

Sistem Deteksi Dan Manajemen Prioritas Adaptif Kendaraan Darurat Untuk Pengendalian lampu Lalu Lintas

1st Made Hady Sadya Wibawa

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

hadysadya@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Erlangga Rahmat Soetedjo

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

erlanggate@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Edward Christhoper Mua

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

edwardmua@student.telkomuniversity.ac.id

4th Yulinda Eliskar

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

yulindaeliskar@telkomuniversity.ac.id

5th Rita Purnamasari

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

ritapurnamasari@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Keterlambatan kendaraan darurat di persimpangan lalu lintas dapat berdampak serius terhadap keselamatan publik, khususnya di lingkungan perkotaan yang padat. Untuk mengatasi tantangan ini, makalah ini mengusulkan sistem kontrol lalu lintas berbasis edge secara real-time yang secara dinamis memprioritaskan kendaraan darurat melalui deteksi multimodal. Sistem ini mengintegrasikan pengenalan sirene berbasis audio dan deteksi objek visual menggunakan algoritma YOLOv5, yang diimplementasikan pada platform komputasi edge Raspberry Pi. Mikrofon arah dan modul kamera digunakan untuk menangkap data lingkungan, yang kemudian diproses secara paralel untuk mengidentifikasi keberadaan serta arah kedatangan kendaraan darurat. Berdasarkan hasil deteksi, sistem akan menyesuaikan waktu sinyal lalu lintas normal dengan mengaktifkan fase lampu hijau pada lajur yang sesuai, sehingga memastikan kendaraan darurat dapat melintas segera. Evaluasi eksperimental yang dilakukan pada prototipe skala 1:50 menunjukkan akurasi deteksi yang tinggi dan latensi yang rendah. Subsistem audio mencapai waktu respons di bawah 50 ms dengan deteksi yang konsisten dari berbagai arah. Modul visual menghasilkan skor kepercayaan rata-rata di atas 0,87 dan berhasil mengklasifikasikan semua kendaraan darurat maupun non-darurat dengan benar. Sistem ini juga menunjukkan kinerja komputasi yang stabil di bawah beban kerja berkelanjutan. Temuan ini membuktikan kelayakan penerapan mekanisme kontrol sinyal lalu lintas yang ringan, responsif, dan tidak bergantung pada infrastruktur, sejalan dengan tujuan kota cerdas dalam mengoptimalkan respons terhadap keadaan darurat.

Kata Kunci—deteksi kendaraan darurat, kontrol lampu lalu lintas, komputasi edge, YOLOv5, sensor multimodal, Raspberry Pi, sistem waktu nyata, kota cerdas.

I. PENDAHULUAN

Kemacetan lalu lintas di kawasan perkotaan tetap menjadi permasalahan krusial yang memengaruhi efisiensi dan keselamatan sistem transportasi modern, terutama di wilayah metropolitan yang padat penduduk. Dampak dari kemacetan bersifat multidimensi, mencakup peningkatan waktu tempuh, konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, polusi lingkungan, serta stres psikologis pada pengguna jalan. Lebih penting lagi, kemacetan secara signifikan menghambat mobilitas kendaraan darurat seperti ambulans dan mobil pemadam kebakaran, sehingga mengorbankan waktu respons dan keselamatan publik [1], [4].

Sistem pengendalian lampu lalu lintas konvensional umumnya dirancang untuk kondisi lalu lintas yang dapat diprediksi dan seragam. Sistem seperti ini sering kali tidak memiliki kemampuan untuk beradaptasi terhadap skenario prioritas tinggi secara dinamis, seperti ketika kendaraan darurat melintas. Selain itu, meskipun sirene digunakan untuk menandai keberadaan kendaraan darurat, efektivitasnya dapat berkurang akibat kabin kendaraan modern yang kedap suara, sistem audio dalam mobil yang keras, atau pengemudi yang tidak memperhatikan [2], [5]. Kurangnya responsivitas ini, ditambah dengan disiplin dan kerja sama pengemudi yang rendah, memperparah keterlambatan dan membahayakan nyawa dalam kondisi darurat yang sensitif terhadap waktu [3].

Berbagai pendekatan teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan ini. Sistem berbasis frekuensi radio (RF), misalnya, mengirimkan sinyal dari kendaraan darurat ke pengendali lalu lintas untuk memicu prioritas lampu hijau; namun, sistem ini sering memerlukan aktivasi manual, rentan terhadap gangguan sinyal, serta memiliki keterbatasan dalam jangkauan dan skalabilitas [6]. Pendekatan lain memanfaatkan skema pengendalian lalu lintas berbasis algoritma yang menyesuaikan waktu sinyal secara dinamis berdasarkan aturan prioritas dan data sensor waktu nyata. Namun, sistem seperti ini bisa sangat mahal dan sulit diintegrasikan ke dalam infrastruktur lama [3].

Solusi yang lebih baru dan menjanjikan melibatkan penggunaan komputasi edge dan Internet of Things (IoT) untuk memungkinkan pengambilan keputusan lalu lintas secara lokal dan waktu nyata. Komputasi edge memungkinkan pemrosesan data berlatensi rendah yang dilakukan dekat dengan sumber data, sehingga mengurangi ketergantungan pada server terpusat dan meningkatkan responsivitas sistem [7]. Meskipun demikian, implementasi yang ada saat ini sering hanya mengandalkan satu jenis deteksi (modalitas), baik audio maupun visual saja, yang dapat mengurangi akurasi dan meningkatkan latensi di lingkungan perkotaan yang kompleks.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, makalah ini mengusulkan sistem cerdas dan adaptif untuk deteksi kendaraan darurat dan manajemen prioritas yang mengintegrasikan teknik deteksi multimodal. Sistem ini menggabungkan pengenalan sirene berbasis audio dan deteksi

visual menggunakan algoritma YOLOv5, yang diimplementasikan pada platform komputasi edge berbasis Raspberry Pi. Arsitektur ini memungkinkan pemrosesan dan pengambilan keputusan secara waktu nyata langsung di persimpangan lalu lintas, tanpa bergantung pada infrastruktur cloud. Setelah mendeteksi kendaraan darurat yang mendekat, sistem secara otomatis menyesuaikan siklus lampu lalu lintas guna memastikan kelancaran dan kecepatan perlintasan.

II. KAJIAN TEORI

Berbagai sistem kontrol lalu lintas cerdas telah diperkenalkan untuk memfasilitasi kelancaran perlintasan kendaraan darurat (Emergency Vehicles/EV) di persimpangan jalan. Strategi umum yang digunakan meliputi deteksi multimodal, komputasi edge, dan pengendalian sinyal dinamis guna meningkatkan responsivitas sistem dan akurasi pengambilan keputusan.

Salah satu pendekatan mengintegrasikan pembelajaran mendalam (deep learning) dengan fusi audio-visual, yang secara signifikan meningkatkan akurasi deteksi di lingkungan perkotaan yang padat. Namun, model-model seperti ini sering kali membutuhkan sumber daya komputasi tinggi, sehingga kurang cocok untuk implementasi edge yang bersifat hemat daya dan sensitif terhadap latensi [8]. Metode lain berfokus pada deteksi berbasis audio saja menggunakan analisis domain frekuensi dan fitur MFCC, yang menunjukkan kinerja baik dalam kondisi terkontrol, tetapi dapat mengalami penurunan performa signifikan di lingkungan dengan sumber kebisingan tumpang tindih, seperti persimpangan perkotaan dengan banyak kendaraan [9].

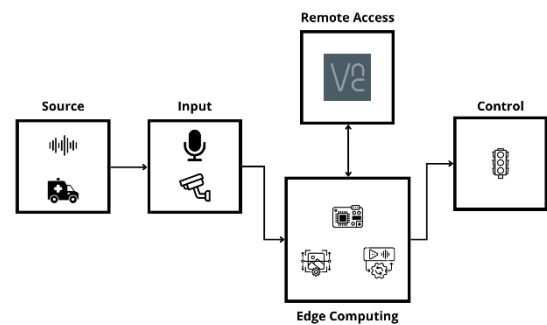
Sistem kontrol lalu lintas waktu nyata yang menggunakan logika terprogram dan pemicu berbasis sensor telah terbukti efektif dalam mengurangi keterlambatan EV. Namun demikian, ketergantungannya pada infrastruktur tetap membatasi kemampuan adaptasi terhadap perubahan tata letak jalan [10]. Metode deteksi visual berbasis segmentasi warna menunjukkan akurasi klasifikasi yang baik dalam kondisi pencahayaan memadai, tetapi kinerjanya menurun dalam kondisi terhalang (occlusion) atau cahaya rendah [11].

Sistem berbasis IoT yang memanfaatkan komunikasi kendaraan-ke-infrastruktur (V2I) memungkinkan pengendalian lampu lalu lintas secara jarak jauh, namun menghadapi tantangan berupa latensi cloud dan ketergantungan pada konektivitas jaringan yang stabil [12]. Kerangka kerja kontrol lalu lintas otonom berbasis penglihatan (vision-based) menunjukkan potensi adaptasi waktu nyata yang menjanjikan, namun sering kali belum memiliki mekanisme khusus untuk memprioritaskan kendaraan darurat di atas arus lalu lintas umum [13]. Skema optimasi berbasis logika fuzzy juga telah diusulkan, menawarkan adaptasi sinyal lalu lintas yang fleksibel berdasarkan kedekatan dan kepadatan EV. Akan tetapi, pendekatan ini umumnya memerlukan kalibrasi sensor yang presisi dan ketersediaan data lalu lintas secara waktu nyata [14].

III. METODE

Sistem ini dirancang untuk memungkinkan deteksi kendaraan darurat secara waktu nyata dan pengendalian prioritas lampu lalu lintas melalui kombinasi sensor multimodal dan komputasi edge tertanam. Rincian mengenai tata letak arsitektur dan alur operasional akan dibahas pada bagian-bagian berikutnya.

A. Arsitektur Sistem



GAMBAR 1
Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang diusulkan dirancang untuk memfasilitasi deteksi dan pemberian prioritas kendaraan darurat secara waktu nyata menggunakan masukan sensor multimodal dan komputasi edge. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, arsitektur ini terdiri dari lima komponen utama: Sumber (Source), Masukan (Input), Komputasi Edge (Edge Computing), Akses Jarak Jauh (Remote Access), dan Pengendali (Control).

Sumber (Source) merujuk pada kendaraan darurat yang memancarkan sinyal akustik (sirene) dan isyarat visual yang dapat dikenali. Sinyal-sinyal ini ditangkap oleh modul Input, yang terdiri dari mikrofon dan kamera. Mikrofon merekam tingkat tekanan suara untuk pengenalan sirene berbasis audio, sedangkan kamera menangkap citra untuk deteksi objek visual.

Data dari sensor kemudian dikirim ke unit Komputasi Edge, yang diimplementasikan menggunakan Raspberry Pi, tempat pemrosesan audio dan visual dilakukan. Aliran visual diproses menggunakan algoritma deteksi objek YOLOv5 untuk mengidentifikasi jenis kendaraan darurat, sementara aliran audio dianalisis menggunakan pemrosesan sinyal digital untuk mendeteksi keberadaan sirene berdasarkan ambang batas desibel. Inferensi audio dan visual dijalankan secara paralel pada thread terpisah, memungkinkan deteksi simultan tanpa mengganggu responsivitas sistem.

Antarmuka Akses Jarak Jauh, yang diimplementasikan melalui VNC (Virtual Network Computing), memungkinkan pemantauan sistem secara waktu nyata, diagnostik, dan penyesuaian parameter tanpa perlu akses fisik ke perangkat keras. Antarmuka VNC ini memberikan akses jarak jauh ke sistem Raspberry Pi untuk keperluan pemantauan dan konfigurasi selama pengujian.

B. Mekanisme Deteksi Audio dan Visual

Sistem yang diusulkan menggunakan mekanisme deteksi hibrida yang memanfaatkan kedua modalitas, yaitu audio dan visual, untuk meningkatkan akurasi dan ketahanan identifikasi kendaraan darurat dalam kondisi lingkungan yang terkontrol.

1) Deteksi Berbasis Audio

Deteksi audio dilakukan menggunakan empat mikrofon omnidireksional yang ditempatkan secara strategis untuk mencakup empat lajur arah: Utara, Selatan, Timur, dan Barat. Setiap mikrofon terhubung ke unit Raspberry Pi terpusat yang secara simultan menerima sinyal audio dari keempat arah tersebut. Sistem secara terus-menerus menangkap suara lingkungan dan

memprosesnya menggunakan perhitungan energi Root Mean Square (RMS). Nilai hasil perhitungan tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan decibel full scale (dBFS) untuk mengkuantifikasi intensitas suara dari setiap arah. Ambang batas tertentu telah ditentukan untuk mengidentifikasi keberadaan sinyal sirene, suatu teknik yang telah divalidasi dalam penelitian sebelumnya untuk membedakan suara sirene dalam lingkungan akustik yang kompleks [15].

Selain mendeteksi keberadaan sinyal, sistem juga menentukan arah kedatangan (Direction of Arrival/DOA) dengan mengidentifikasi mikrofon yang mencatat nilai RMS tertinggi pada saat deteksi. Logika deteksi arah ini mengikuti prinsip bahwa arah sumber suara ditentukan berdasarkan posisi mikrofon yang mencatat intensitas suara tertinggi. Metode ini memungkinkan respons yang cepat dan berbasis spasial dengan latensi kurang dari 50 ms saat sumber sirene berada dalam jangkauan efektif.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

Root Mean Square (RMS) adalah metode untuk menghitung akar kuadrat dari rata-rata nilai kuadrat dalam suatu himpunan data. Dalam rumusnya, x_i merepresentasikan setiap nilai individu dalam himpunan data, n adalah jumlah total data, dan $\sum_{i=1}^n x_i^2$ menyatakan jumlah dari kuadrat semua nilai. Dengan kata lain, RMS diperoleh dengan menghitung rata-rata dari nilai-nilai kuadrat dalam dataset, kemudian mengambil akar kuadrat dari hasil tersebut.

$$dBFS = 20 \times \log_{10}\left(\frac{RMS}{RMS_{full\ scale}}\right) \quad (2)$$

Dalam konteks konversi RMS ke dBFS, RMS merepresentasikan nilai Root Mean Square terukur dari sinyal, yang mengkuantifikasi amplitudo sinyal dalam domain waktu. Istilah RMS full scale mengacu pada nilai RMS dari sinyal skala penuh. Untuk sinyal sinusoidal dalam sistem digital, RMS full scale dihitung sebagai $\frac{\text{peak amplitude}}{\sqrt{2}}$. Karena amplitudo puncak dalam sistem digital umumnya bernilai 1, maka diperoleh $RMS_{full\ scale} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menormalisasi sinyal saat dikonversi ke skala dBFS (decibel full scale).

2) Deteksi Berbasis Visual

Deteksi visual dilakukan menggunakan modul kamera Raspberry Pi yang menangkap frame citra secara waktu nyata dari segmen jalan yang dipantau. Frame yang ditangkap diproses menggunakan algoritma deteksi objek YOLOv5 (You Only Look Once versi 5), yang telah dilatih sebelumnya pada dataset yang mencakup kelas kendaraan darurat seperti ambulans, mobil pemadam kebakaran, dan mobil polisi. Model ini dioptimalkan untuk implementasi di perangkat edge, sehingga memungkinkan proses inferensi yang ringan dengan keterlambatan minimal.

Proses deteksi diimplementasikan melalui modul khusus yang secara waktu nyata menangkap, memproses, dan mengklasifikasikan setiap frame. Setelah objek

terdeteksi, label kelas dari objek yang dikenali dikirimkan ke main control thread melalui antrian komunikasi antar thread (inter-thread communication queue). Model YOLO berbasis edge seperti YOLOv4-Tiny dan YOLOv5-Nano telah menunjukkan waktu inferensi di bawah 30 ms ketika dioptimalkan untuk platform Raspberry Pi, yang semakin memvalidasi kelayakan pendekatan ini untuk pengelolaan lalu lintas waktu nyata [16]. Deteksi visual ini melengkapi subsistem audio dan sangat penting terutama dalam skenario di mana sinyal sirene mengalami distorsi, tidak terdengar, atau terhalang secara akustik.

$$Loss_{total} = \lambda_{box} \times Loss_{box} + \lambda_{obj} \times Loss_{obj} + \lambda_{cls} \times Loss_{cls} \quad (3)$$

Dalam kerangka kerja pembelajaran mesin YOLOv5, fungsi loss total merupakan kombinasi berbobot dari tiga komponen utama: Lossbox, Lossobj, dan Losscls. Lossbox mengukur akurasi dalam pelokalan bounding box, yakni seberapa dekat kotak prediksi terhadap kotak ground truth. Lossobj menilai objectness, yaitu menentukan apakah terdapat objek pada suatu sel grid tertentu. Sementara itu, Losscls mengevaluasi akurasi klasifikasi, dengan mengukur seberapa tepat model dalam memprediksi kelas objek yang terdeteksi. Ketiga komponen loss ini dibobotkan dengan hiperparameter λ_{box} , λ_{obj} , dan λ_{cls} , yang mengatur kontribusi relatif masing-masing terhadap total loss, dan biasanya didefinisikan dalam berkas konfigurasi YOLOv5.

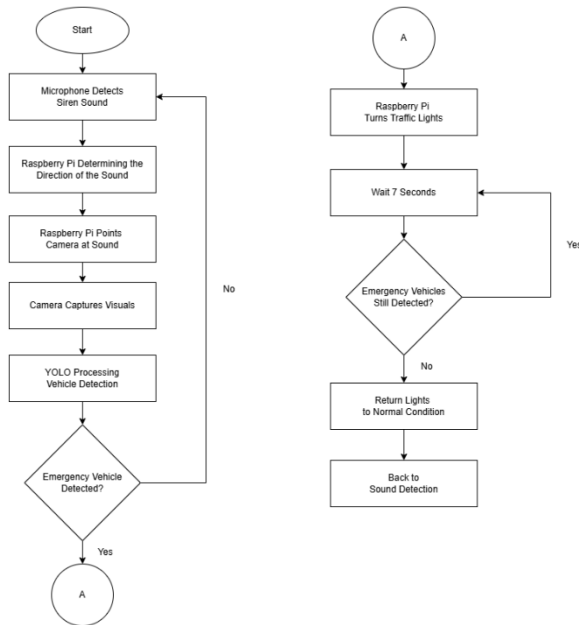
C. Logika Pengendalian Lampu Lalu Lintas

Logika pengendalian lampu lalu lintas dirancang untuk beradaptasi secara dinamis terhadap peristiwa deteksi kendaraan darurat, guna memastikan pemberian prioritas secara waktu nyata di persimpangan jalan. Mekanisme kontrol ini beroperasi berdasarkan masukan multimodal dari modul deteksi audio dan visual.

Begitu kendaraan darurat terdeteksi melalui salah satu modalitas, sistem akan masuk ke dalam mode prioritas. Dalam mode ini, Raspberry Pi mengirimkan sinyal kontrol melalui antarmuka GPIO (General Purpose Input/Output) untuk mengaktifkan sistem lampu lalu lintas yang terhubung. Secara spesifik, sistem akan mengabaikan siklus waktu default dan mengaktifkan fase hijau pada lajur yang sesuai dengan arah datangnya kendaraan darurat, sekaligus mengatur fase merah pada semua lajur lainnya untuk membersihkan jalur. Logika ini memastikan bahwa lampu hijau tetap aktif selama durasi aman yang telah ditentukan sebelumnya berdasarkan ambang batas waktu yang dapat dikonfigurasi.

Jika tidak ada sinyal kendaraan darurat yang terdeteksi, sistem akan kembali ke mode normal, yang beroperasi berdasarkan siklus lampu lalu lintas statis atau yang telah ditentukan sebelumnya. Pergantian dua mode ini menjamin kelancaran operasi dan arus lalu lintas baik dalam kondisi normal maupun darurat. Logika desentralisasi ini memungkinkan respons waktu nyata tanpa bergantung pada infrastruktur terpusat.

D. Alur Kerja Sistem



GAMBAR 2

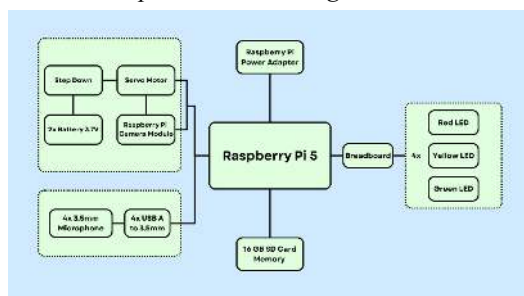
Diagram alur kerja sistem yang menunjukkan logika berurutan untuk deteksi kendaraan darurat dan pengendalian lampu lalu lintas dinamis berdasarkan masukan audio dan visual.

Alur kerja sistem menggambarkan logika berurutan dari operasi sistem deteksi kendaraan darurat dan pengendalian lampu lalu lintas yang diusulkan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, proses dimulai dengan pemantauan suara secara terus-menerus melalui modul mikrofon. Ketika sirene terdeteksi, Raspberry Pi memperkirakan arah sumber suara dan menyesuaikan orientasi kamera sesuai arah tersebut.

Selanjutnya, kamera menangkap data visual dari arah yang dicurigai, yang kemudian dianalisis menggunakan algoritma deteksi objek YOLOv5 untuk memverifikasi keberadaan kendaraan darurat. Jika kendaraan berhasil diidentifikasi, sistem mengaktifkan pengendalian lampu lalu lintas dengan mengalihkan fase hijau ke lajur yang sesuai.

Setelah sinyal diaktifkan, sistem memasuki sebuah loop yang mempertahankan lampu hijau selama durasi tetap, yaitu 7 detik pada prototipe, dan secara terus-menerus memeriksa apakah kendaraan darurat masih terdeteksi. Jika kendaraan sudah tidak terdeteksi, sistem akan mengembalikan lampu lalu lintas ke kondisi normal dan melanjutkan pemantauan suara.

E. Desain dan Implementasi Perangkat Keras



GAMBAR 3

Diagram implementasi perangkat keras yang menunjukkan interkoneksi antara Raspberry Pi 5, sensor audio-visual, indikator LED, motor servo, dan modul catu daya.

Implementasi perangkat keras dari sistem yang diusulkan berpusat pada Raspberry Pi 5, yang berperan sebagai unit pemrosesan utama untuk logika deteksi dan pengendalian. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, sistem ini disusun secara modular untuk menangani akuisisi data waktu nyata, inferensi, dan aktuasi.

Lapisan input terdiri dari empat mikrofon 3.5 mm yang terhubung melalui adaptor USB-A ke 3.5 mm, memungkinkan deteksi audio arah secara tersebar. Secara bersamaan, modul kamera Raspberry Pi menangkap frame video waktu nyata untuk keperluan deteksi visual. Raspberry Pi juga dilengkapi dengan kartu SD 16 GB yang digunakan untuk pencatatan data dan penyimpanan lokal.

Untuk pengelolaan sinyal keluaran, empat LED (merah, kuning, hijau) dipasang pada breadboard dan dikendalikan melalui pin GPIO. LED ini mensimulasikan indikasi lampu lalu lintas sebagai respons terhadap peristiwa deteksi kendaraan darurat. Sebuah motor servo, yang juga terhubung ke antarmuka GPIO, digunakan untuk meniru mekanisme aktuatur berbasis mekanik.

Untuk distribusi daya, Raspberry Pi disuplai melalui adaptor daya teregulasi, sementara motor servo mendapatkan daya dari dua baterai 3,7 V yang diatur melalui konverter step-down untuk memastikan operasi yang stabil. Desain ini mengutamakan efisiensi energi dan keselamatan dalam kondisi implementasi di lapangan.

Gambar 3 merangkum struktur perangkat keras secara visual, menggambarkan interkoneksi antara semua komponen utama termasuk input sensor, unit pemrosesan, output kontrol, dan catu daya. Pengaturan ini mendukung integrasi yang ringkas, operasi berlatensi rendah, dan kemudahan perawatan, sehingga cocok untuk penerapan sistem lalu lintas cerdas di dunia nyata.

F. Asumsi dan Keterbatasan

Sistem yang diusulkan dirancang dan dievaluasi berdasarkan asumsi operasional tertentu untuk memastikan pengujian yang terkontrol dan kinerja yang andal. Sistem ini mengasumsikan bahwa kendaraan darurat dilengkapi dengan sirene standar yang beroperasi dalam rentang frekuensi dan intensitas khas yang dapat dideteksi oleh modul mikrofon (≥ -40 dBFS). Sistem ini dirancang untuk pemantauan lajur satu arah, dengan asumsi bahwa kendaraan darurat akan datang dari satu arah dalam bidang pandang kamera. Kondisi lingkungan, termasuk pencahayaan dan kebisingan latar, dianggap sedang, tidak mencakup skenario kemacetan perkotaan ekstrem. Model YOLOv5 untuk deteksi objek dilatih pada dataset yang mewakili karakteristik visual kendaraan darurat, khususnya ambulans. Selain itu, pemrosesan waktu nyata mengandalkan sumber daya komputasi edge dengan tegangan dan suhu yang stabil, menggunakan Raspberry Pi 5 dalam lingkungan indoor atau semi-terkontrol.

Meskipun sistem ini menunjukkan efektivitas, terdapat beberapa keterbatasan yang melekat. Akurasi deteksi audio dapat menurun di lingkungan dengan tingkat kebisingan tinggi atau ketika suara sirene terhalang oleh penghalang fisik atau kabin kendaraan yang kedap suara. Deteksi visual sensitif terhadap pencahayaan yang buruk, halangan (occlusion), dan sudut kamera, yang dapat mengurangi akurasi pengenalan. Saat ini, sistem belum mendukung pemantauan lalu lintas dari banyak arah atau deteksi simultan

dari beberapa kendaraan darurat. Selain itu, penggunaan model skala 1:50 dan lampu lalu lintas simulasi mungkin belum sepenuhnya merepresentasikan dinamika waktu pada persimpangan skala penuh di lingkungan perkotaan. Pemantauan jarak jauh melalui VNC juga terbatas oleh latensi jaringan, yang dapat menghambat penerapan skala besar tanpa optimalisasi lebih lanjut.

IV. HASIL EKSPERIMEN

A. Pengaturan Pengujian

Untuk mengevaluasi kinerja sistem deteksi kendaraan darurat dan pengendalian lampu lalu lintas yang diusulkan, serangkaian eksperimen terkontrol dilakukan menggunakan prototipe fisik berskala 1:50. Lingkungan pengujian ditempatkan di dalam ruangan untuk menjaga konsistensi pencahayaan sekitar dan kebisingan latar belakang.

Perangkat keras yang digunakan dalam eksperimen meliputi Raspberry Pi 5 (RAM 8 GB), dilengkapi dengan modul PiCamera2, empat mikrofon 3,5 mm yang terhubung melalui adaptor audio USB, serta LED RYG untuk mensimulasikan lampu lalu lintas. Sistem ini dijalankan menggunakan Python 3.11 dan memanfaatkan model deteksi objek YOLOv5 yang diterapkan melalui PyTorch.

Catu daya disuplai menggunakan adaptor 9V/3A untuk Raspberry Pi dan sepasang baterai lithium-ion 3,7 V yang diatur melalui konverter step-down untuk servo. Server VNC diaktifkan untuk pemantauan jarak jauh, memungkinkan akses sistem secara real-time tanpa antarmuka HDMI langsung.

Untuk mensimulasikan kondisi yang realistis, digunakan speaker yang memancarkan audio sirine standar dengan intensitas yang telah dikalibrasi. Jarak deteksi divariasikan dari 0 cm hingga 20 cm untuk menilai efektivitas modul audio. Kamera menangkap frame dengan kecepatan 30 fps, yang kemudian diproses oleh mesin inferensi YOLOv5.

B. Hasil Kuantitatif

TABLE I.
KINERJA DETEKSI MODUL AUDIO
PADA BERBAGAI JARAK.

Jarak Deteksi (cm)	Terdeteksi (Y/T)
20	Y
15	Y
10	Y
5	Y
0	Y
-5	Y
-10	Y
-15	Y
-20	Y

TABLE II.
KINERJA WAKTU MODUL AUDIO
PADA BERBAGAI PERCOBAAN.

Percobaan Ke-	Waktu (ms)
1	37,28
2	45,91
3	31,05
4	49,67
5	33,42
6	41,19
7	39,83
8	47,56
9	35,70
10	43,34
Rata-rata	40,49

TABLE III.
RATA-RATA LEVEL AUDIO TERDETEKSI
PADA BERBAGAI JARAK DETEKSI.

Jarak Deteksi (cm)	Rata-rata Level Audio Terdeteksi (dBFS)
20	-30,1
15	-28,1
10	-22,5
5	-20,5
0	-18,8
-5	-22,3
-10	-24,9
-15	-30,4
-20	-34,0

Kinerja modul deteksi audio dievaluasi berdasarkan tiga metrik utama: konsistensi deteksi pada berbagai jarak, waktu respons, dan intensitas sinyal. Seperti ditunjukkan pada Tabel I, sistem berhasil mendeteksi sinyal sirine pada seluruh posisi pengujian, mulai dari +20 cm hingga -20 cm relatif terhadap mikrofon. Hal ini menunjukkan sensitivitas arah dan ketahanan spasial modul audio dalam skenario jarak dekat.

Untuk mengevaluasi responsivitas, sepuluh percobaan deteksi dilakukan dan waktu respons sistem dicatat dalam milidetik. Seperti ditampilkan pada Tabel II, waktu respons bervariasi antara 31,05 ms hingga 49,67 ms, dengan rata-rata 40,49 ms. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi dan memproses peristiwa akustik dengan latensi di bawah 50 ms, yang memadai untuk pengambilan keputusan waktu nyata dalam preemption sinyal lalu lintas.

Selain itu, intensitas sinyal diukur dalam desibel relatif terhadap skala penuh (dBFS) pada setiap jarak deteksi. Berdasarkan Tabel III, tingkat sinyal tertinggi tercatat pada jarak 0 cm (-18,8 dBFS), sedangkan yang terendah pada -20 cm (-34,0 dBFS). Data ini mengonfirmasi bahwa ambang

deteksi telah ditetapkan secara tepat untuk mengakomodasi berbagai tingkat intensitas masukan, sehingga memastikan kinerja yang andal meskipun terjadi pelemahan sinyal akibat jarak.

TABLE IV.
KINERJA DETEKSI VISUAL
PADA BERBAGAI JARAK DAN ARAH.

Jarak Deteksi (cm)	Terdeteksi Secara Visual (Y/T)		
	Timur	Selatan	Barat
5	Y	Y	Y
10	Y	Y	Y
15	Y	Y	Y
20	Y	Y	Y

TABLE V.
KINERJA WAKTU DETEKSI VISUAL
PADA BERBAGAI UJI COBA DAN ARAH.

Percobaan Ke-	Waktu (ms)		
	Timur	Selatan	Barat
1	14,42	39,65	39,21
2	31,53	14,76	26,74
3	20,75	34,75	24,64
4	14,23	33,11	39,74
5	33,53	41,45	39,89
6	41,75	44,86	26,32
7	13,54	31,74	43,56
8	34,64	46,95	37,98
9	36,96	33,43	26,47
10	46,43	29,87	29,52
Rata-rata	28,77	35,05	33,20

TABLE VI.
NILAI CONFIDENCE SCORE DETEKSI VISUAL KENDARAAN
DARURAT PADA BERBAGAI UJI COBA DAN ARAH.

Percobaan Ke-	Confidence Score			Status Darurat (Y/T)
	Timur	Selatan	Barat	
1	0,90	0,92	0,94	Y
2	0,91	0,92	0,94	Y
3	0,93	0,90	0,93	Y
4	0,94	0,93	0,92	Y
5	0,91	0,92	0,92	Y
6	0,93	0,93	0,93	Y

Percobaan Ke-	Confidence Score			Status Darurat (Y/T)
	Timur	Selatan	Barat	
7	0,89	0,91	0,89	Y
8	0,89	0,93	0,89	Y
9	0,73	0,91	0,88	Y
10	0,68	0,90	0,66	Y
Rata-rata	0,87	0,91	0,89	Y

TABLE VII.
NILAI CONFIDENCE SCORE DETEKSI VISUAL KENDARAAN
NORMAL PADA BERBAGAI UJI COBA DAN ARAH.

Percobaan Ke-	Confidence Score			Status Darurat (Y/T)
	Timur	Selatan	Barat	
1	0,92	0,94	0,94	T
2	0,90	0,96	0,93	T
3	0,92	0,92	0,87	T
4	0,93	0,95	0,92	T
5	0,93	0,95	0,93	T
6	0,86	0,95	0,85	T
7	0,66	0,93	0,95	T
8	0,92	0,96	0,95	T
9	0,90	0,96	0,94	T
10	0,80	0,95	0,93	T
Rata-rata	0,87	0,94	0,92	T

Untuk mengevaluasi kemampuan deteksi visual sistem, berbagai aspek performa dianalisis pada beberapa jarak dan orientasi arah. Seperti yang ditampilkan pada Tabel IV, sistem berhasil mendeteksi dan mengidentifikasi objek secara visual dari arah Timur, Selatan, dan Barat pada seluruh jarak uji (5 cm hingga 20 cm). Hal ini menunjukkan keandalan algoritma estimasi visual dalam mencakup area deteksi yang luas.

Tabel V menyajikan waktu deteksi visual (dalam milidetik) dari sepuluh kali pengujian untuk masing-masing arah. Rata-rata waktu deteksi visual tercatat sebesar 28,77 ms (Timur), 35,05 ms (Selatan), dan 33,20 ms (Barat). Angka-angka ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara konsisten di bawah ambang batas 50 ms, sehingga sesuai untuk pemrosesan visual secara real-time dalam preemption sinyal lalu lintas.

Untuk menilai akurasi deteksi visual lebih lanjut, skor kepercayaan (confidence score) yang dihasilkan oleh model YOLOv5 dicatat untuk kendaraan darurat dan non-darurat dari berbagai arah. Seperti pada Tabel VI, rata-rata skor kepercayaan untuk kendaraan darurat adalah 0,87 (Timur), 0,91 (Selatan), dan 0,89 (Barat), dengan seluruh uji coba berhasil mengidentifikasi kendaraan sebagai unit darurat (Y).

Sebaliknya, Tabel VII menunjukkan skor kepercayaan untuk kendaraan non-darurat, dengan rata-rata sedikit lebih tinggi yaitu 0,87 (Timur), 0,94 (Selatan), dan 0,92 (Barat), namun tetap diklasifikasikan dengan benar sebagai non-darurat (T) dalam seluruh pengujian.

Hasil-hasil ini secara keseluruhan memvalidasi kapabilitas kerangka kerja deteksi multimodal. Sistem menunjukkan performa yang akurat dalam deteksi visual dan estimasi arah, membuktikan presisinya dalam mengidentifikasi serta menentukan lokasi objek. Selain itu, waktu respon yang cepat memastikan pengoperasian yang tepat waktu, yang sangat penting dalam aplikasi real-time. Terakhir, kerangka ini unggul dalam membedakan kendaraan darurat dan non-darurat dengan tingkat kepercayaan tinggi, sehingga menunjukkan keandalannya dalam pengambilan keputusan pada situasi kritis.

TABLE VIII.
KINERJA SISTEM DAN METRIK KONEKTIVITAS
PADA BERBAGAI UJI COBA.

Percobaan Ke-	Performa		Konektivitas (KB/s)	
	Kecepatan Processor (GHz)	Suhu (°C)	Upload	Download
1	2,4	84,2	123,45	4,25
2	2,4	86,1	127,89	6,12
3	2,4	87,3	124,67	5,83
4	2,4	85,0	126,33	4,67
5	2,4	84,8	125,78	5,91
6	2,4	86,7	123,92	3,74
7	2,4	85,9	127,14	6,28
8	2,4	83,6	124,56	5,45
9	2,4	87,4	126,81	4,89
10	2,4	85,0	123,65	5,86
Rata-rata	2,4	85,6	125,42	5,30

Untuk mengevaluasi keandalan komputasi dan aksesibilitas jaringan sistem, serangkaian uji coba dilakukan untuk mengukur kinerja prosesor, stabilitas suhu, dan konektivitas data. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel VIII, Raspberry Pi 5 mempertahankan kecepatan prosesor yang konsisten sebesar 2.4 GHz selama seluruh pengujian, yang mengonfirmasi kemampuan pemrosesan yang stabil di bawah beban operasional. Suhu permukaan rata-rata tercatat sebesar 85.6 °C, dengan rentang antara 83.6 °C hingga 87.4 °C. Meskipun cukup tinggi, nilai-nilai ini masih berada dalam batas termal yang dapat diterima untuk tugas pemrosesan edge jangka pendek.

Konektivitas dipantau melalui akses jarak jauh menggunakan VNC, dengan kecepatan unggah rata-rata sebesar 125.42 KB/s dan kecepatan unduh sebesar 5.30 KB/s. Nilai-nilai ini menunjukkan operasi berkecepatan rendah yang sesuai untuk pemantauan waktu nyata sederhana tanpa memberikan beban besar pada jaringan lokal. Konsistensi kecepatan unggah mendukung transfer data yang andal dari

sistem edge ke sistem pengawas, sementara nilai unduh yang relatif rendah mencerminkan ringan-nya aliran data VNC.

C. Diskusi dan Analisis

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan efektif dalam mendeteksi kendaraan darurat dan merespons melalui pengendalian lalu lintas cerdas dengan akurasi tinggi dan latensi rendah. Sistem mencapai tingkat keberhasilan deteksi audio sebesar 100% pada semua jarak pengujian (± 20 cm), dengan waktu respons rata-rata 40,49 ms, yang menunjukkan responsivitas yang sangat baik untuk aplikasi waktu nyata.

Deteksi visual menggunakan YOLOv5 menghasilkan skor kepercayaan rata-rata di atas 0,87 untuk kendaraan darurat, dan logika klasifikasi berhasil membedakan dengan tepat antara kendaraan darurat dan non-darurat. Skor kepercayaan untuk kendaraan non-darurat sedikit lebih tinggi secara rata-rata, namun sistem mengklasifikasikan seluruh kasus dengan benar sebagai non-darurat, menunjukkan tidak adanya salah klasifikasi selama seluruh uji coba.

Meskipun terdapat beban pemrosesan tinggi akibat aliran video dan audio yang terus-menerus, sistem mempertahankan performa yang stabil pada frekuensi CPU konstan 2,4 GHz, dengan suhu operasi rata-rata sebesar 85,6 °C. Tidak ditemukan gejala thermal throttling atau crash selama pengujian berkepanjangan. Selain itu, pemantauan jarak jauh melalui VNC tetap andal, hanya membutuhkan kecepatan rendah (~5,3 KB/s unduhan), menjadikan sistem ini layak diterapkan di lingkungan dengan kecepatan jaringan terbatas.

Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, seluruh pengujian dilakukan di lingkungan dalam ruangan dan menggunakan skala prototipe; performa mungkin berbeda dalam kondisi luar ruangan yang kompleks. Kedua, estimasi arah saat ini terbatas pada tiga sudut yang telah ditentukan, yang meskipun fungsional dalam prototipe, akan lebih optimal jika diperluas untuk mendukung deteksi arah secara penuh 360°. Terakhir, meskipun skor kepercayaan cukup kuat, nilainya mulai menurun pada level di bawah -30 dBFS, yang menunjukkan perlunya pengaturan gain adaptif atau peningkatan sinyal dalam implementasi selanjutnya.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan sistem deteksi kendaraan darurat dan pengendalian lampu lalu lintas secara waktu nyata yang mengintegrasikan deteksi multimodal menggunakan input audio dan visual, yang diproses secara lokal melalui platform komputasi tepi. Sistem yang diusulkan memanfaatkan array mikrofon arah dan modul kamera Raspberry Pi untuk mengidentifikasi sinyal sirene dan kendaraan darurat secara berturut-turut. Hasil deteksi digunakan untuk mengendalikan fase lampu lalu lintas secara dinamis, guna memprioritaskan perlintasan kendaraan darurat di persimpangan.

Evaluasi eksperimental yang dilakukan pada prototipe skala 1:50 menunjukkan tingkat responsivitas dan keandalan sistem yang tinggi. Modul audio mencapai akurasi deteksi 100% dalam jangkauan 20 cm, dengan waktu respons rata-rata di bawah 50 ms. Deteksi visual menggunakan YOLOv5 secara konsisten menghasilkan skor kepercayaan di atas 0,87 dan berhasil membedakan kendaraan darurat dari kendaraan non-darurat dalam semua skenario pengujian. Selain itu, sistem mempertahankan performa operasional yang stabil,

termasuk stabilitas suhu dan bandwidth dalam kondisi deployment berbasis edge computing.

Meskipun efektif, sistem ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti resolusi arah yang terbatas dan penurunan akurasi saat berada pada kondisi sinyal atau pencahayaan rendah. Peningkatan di masa mendatang dapat mencakup deteksi arah 360°, pengujian di luar ruangan pada kondisi lalu lintas nyata, serta integrasi dengan jenis sensor tambahan untuk meningkatkan ketahanan sistem secara keseluruhan.

REFERENCES

- [1] G. Karmakar, A. Chowdhury, J. Kamruzzaman and I. Gondal, "A Smart Priority-Based Traffic Control System for Emergency Vehicles," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 15849-15858, 15 July 15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3023149.
- [2] V. -T. Tran and W. -H. Tsai, "Acoustic-Based Emergency Vehicle Detection Using Convolutional Neural Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75702-75713, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988986.
- [3] S. Deepajothi, D. P. Rajan, P. Karthikeyan and S. Velliangiri, "Intelligent Traffic Management for Emergency Vehicles using Convolutional Neural Network," 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2021, pp. 853-857, doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441929.
- [4] J. P. Byrne, N. C. Mann, M. Dai, S. A. Mason, P. Karanicolas, S. Rizoli, and A. B. Nathens, "Association Between Emergency Medical Service Response Time and Motor Vehicle Crash Mortality in the United States," *JAMA Surg.*, vol. 154, no. 4, pp. 286-293, Apr. 2019, doi: 10.1001/jamasurg.2018.5097.
- [5] V. -T. Tran and W. -H. Tsai, "Audio-Vision Emergency Vehicle Detection," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 24, pp. 27905-27917, 15 Dec. 15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3127893.
- [6] N. A. Syauqi, "Lampu Lalu Lintas Adaptif untuk Prioritas Kendaraan Ambulans," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 6, Dec. 2024.
- [7] 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, 2023, Art. no. 100697, doi: 10.1016/j.measen.2023.100697.
- [8] M. Zohaib, M. Asim, and M. ELAffendi, "Enhancing Emergency Vehicle Detection: A Deep Learning Approach with Multimodal Fusion," *Mathematics*, vol. 12, no. 10, p. 1514, 2024, doi: 10.3390/math12101514.
- [9] B. Fatimah, A. Preethi, V. Hrushikesh, A. Singh B. and H. R. Kotion, "An automatic siren detection algorithm using Fourier Decomposition Method and MFCC," 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kharagpur, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225414.
- [10] W. N. S. F. Wan Ariffin, C. S. Keat, T. P. A. L. Suriyan, N. A. Mohamad Nore, M. I. S. Mohd Lazim, H. L. Zakaria, N. B. Mohd Hashim, and A. S. Md Zain, "Real-time Dynamic Traffic Light Control System with Emergency Vehicle Priority," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1878, p. 012063, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1878/1/012063.
- [11] H. Razalli, R. Ramli and M. H. Alkawaz, "Emergency Vehicle Recognition and Classification Method Using HSV Color Segmentation," 2020 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), Langkawi, Malaysia, 2020, pp. 284-289, doi: 10.1109/CSPA48992.2020.9068695.
- [12] A. Chowdhury, S. Kaisar, M. E. Khoda, R. Naha, M. A. Khoshkholghi, and M. Aiash, "IoT-Based Emergency Vehicle Services in Intelligent Transportation System," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5324, 2023, doi: 10.3390/s23115324.
- [13] M. Humayun, M. F. Almufareh, and N. Z. Jhanjhi, "Autonomous Traffic System for Emergency Vehicles," *Electronics*, vol. 11, no. 4, p. 510, 2022, doi: 10.3390/electronics11040510.
- [14] R. R. Rout, S. Vemireddy, S. K. Raul, and D. V. L. N. Somayajulu, "Fuzzy logic-based emergency vehicle routing: An IoT system development for smart city applications," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 88, p. 106839, 2020, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106839.
- [15] H. Sun, X. Liu, K. Xu, J. Miao, and Q. Luo, "Emergency Vehicles Audio Detection and Localization in Autonomous Driving," *arXiv preprint arXiv:2109.14797*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2109.14797>
- [16] S. Boddu and A. Mukherjee, "Efficient Edge Deployment of Quantized YOLOv4-Tiny for Aerial Emergency Object Detection on Raspberry Pi 5," *arXiv preprint arXiv:2506.09300*, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2506.09300>