

BAB 1

USULAN GAGASAN

1.1 Deskripsi Umum Masalah

Kemacetan lalu lintas merupakan salah satu permasalahan utama di kawasan perkotaan yang berdampak luas terhadap berbagai aspek kehidupan, mulai dari lingkungan, ekonomi, kesehatan, hingga keselamatan pengguna jalan. Salah satu titik kritis terjadinya kemacetan adalah pada persimpangan jalan yang dikendalikan oleh lampu lalu lintas. Persimpangan jenis ini sering menjadi bottleneck, terutama pada jam-jam sibuk, karena arus kendaraan dari berbagai arah bertemu dalam satu titik dan bergantung pada siklus sinyal lampu lalu lintas yang bersifat tetap.

Kemacetan di persimpangan tidak hanya memperlambat arus kendaraan umum, tetapi juga menghambat kendaraan darurat seperti ambulans, mobil pemadam kebakaran, dan patroli kepolisian yang memerlukan prioritas tinggi dalam berlalu lintas. Meskipun peraturan perundang-undangan telah menetapkan bahwa kendaraan darurat memiliki hak utama untuk melintas [2], implementasinya di lapangan sering tidak berjalan optimal karena pengemudi tidak selalu mendengar sirene atau tidak memiliki ruang untuk menepi.

Permasalahan menjadi lebih kompleks ketika kendaraan darurat terpaksa menerobos lampu lalu lintas untuk mengejar waktu. Keputusan ini memang dapat dimaklumi dalam situasi darurat, namun berisiko menyebabkan kecelakaan lalu lintas, baik bagi kendaraan darurat maupun pengguna jalan lain yang tidak siap. Keterlambatan ambulans dan kecelakaan sering kali terjadi karena kondisi lalu lintas yang padat dan tidak adanya sistem pendukung yang memfasilitasi prioritas aman [23].

Beberapa kasus nyata di Indonesia menguatkan temuan tersebut. Misalnya, pada tahun 2022 di Denpasar, sebuah ambulans yang menerobos lampu merah menabrak seorang pengendara sepeda motor hingga tewas [24]. Kasus serupa juga terjadi di simpang Wates, Yogyakarta, pada 2024, ketika ambulans RSUD Banyumas menabrak pengendara karena tidak adanya jalur prioritas [25].

Sistem kontrol lampu lalu lintas berperan penting dalam memperlancar mobilitas kendaraan darurat. Namun, sistem yang ada saat ini umumnya dirancang untuk mengatur lalu lintas dalam kondisi stabil dan konsisten. Dalam situasi lalu lintas yang dinamis, seperti saat kehadiran kendaraan darurat, belum tersedia sistem kontrol lampu lalu lintas cerdas yang

mampu merespons secara adaptif [3]. Keterbatasan ini memperburuk dampak kemacetan terhadap kendaraan darurat, karena absennya mekanisme otomatis untuk mendeteksi dan memprioritaskan kendaraan tersebut. Akibatnya, keterbatasan infrastruktur dan ketidakefisienan pengaturan lalu lintas dalam menangani situasi darurat meningkatkan risiko terhadap keselamatan jiwa.

1.2 Analisis Masalah

Kemacetan lalu lintas di wilayah perkotaan merupakan permasalahan kompleks dengan dampak yang signifikan, khususnya terhadap waktu tanggap kendaraan darurat. Meskipun dilengkapi dengan sirene, kendaraan darurat sering kali menghadapi kendala dalam menavigasi kepadatan lalu lintas, yang diperparah oleh keterbatasan sistem pengendalian lampu lalu lintas saat ini. Sistem tersebut belum memiliki kemampuan untuk beradaptasi secara dinamis terhadap situasi darurat. Kondisi ini menegaskan urgensi pengembangan sistem manajemen lalu lintas yang lebih cerdas dan responsif, yang mampu memprioritaskan kendaraan darurat secara efektif sambil menjaga efisiensi arus lalu lintas secara keseluruhan.

1.2.1 Aspek Teknis

Tantangan teknis utama dalam mengatasi dampak kemacetan lalu lintas terhadap kendaraan darurat terletak pada keterbatasan sistem manajemen lalu lintas saat ini. Sistem pengendalian lampu lalu lintas konvensional dirancang untuk mengakomodasi pola lalu lintas yang stabil dan dapat diprediksi, sehingga kurang mampu beradaptasi dengan situasi dinamis, seperti kedatangan kendaraan darurat [3]. Penentuan waktu sinyal lalu lintas yang bersifat statis tidak mempertimbangkan keadaan darurat, yang mengakibatkan penundaan signifikan bagi kendaraan darurat di persimpangan. Selain itu, kurangnya sistem komunikasi terintegrasi antara kendaraan darurat dan pusat pengendalian lalu lintas menghambat transmisi data lokasi dan rute yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan arus lalu lintas. Di banyak kota, ketiadaan sistem terpadu yang menggabungkan data dari berbagai sumber, seperti pelacak GPS pada kendaraan darurat dan informasi lalu lintas secara real-time, turut menghambat pengembangan solusi manajemen lalu lintas yang komprehensif dan responsif.

1.2.2 Aspek Ekonomi

Dampak ekonomi dari kemacetan lalu lintas terhadap layanan darurat bersifat signifikan dan multifaset. Keterlambatan waktu respons kendaraan darurat akibat kemacetan menyebabkan peningkatan biaya operasional, meliputi konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, biaya perawatan kendaraan yang meningkat, serta kebutuhan akan tambahan kendaraan dan personel untuk mempertahankan cakupan layanan di tengah waktu respons yang lebih lama. Dalam konteks layanan medis darurat, keterlambatan dapat memperburuk hasil kesehatan pasien, yang berpotensi memerlukan perawatan medis yang lebih intensif dan mahal. Sebuah studi di Amerika Serikat menunjukkan bahwa waktu respons layanan darurat yang lebih lama berkorelasi erat dengan peningkatan angka kematian akibat kecelakaan kendaraan bermotor [4]. Selain itu, dalam situasi darurat kebakaran, keterlambatan dapat mengakibatkan kerusakan properti yang lebih parah, sehingga meningkatkan kerugian ekonomi dan klaim asuransi.

1.2.3 Aspek Lingkungan

Kemacetan lalu lintas berdampak signifikan terhadap lingkungan, khususnya dalam konteks operasional kendaraan darurat. Kemacetan menyebabkan kendaraan, termasuk kendaraan darurat, berada dalam kondisi diam atau bergerak tersendat, yang secara substansial meningkatkan emisi karbon dioksida [1]. Peningkatan emisi ini memperburuk kualitas udara di wilayah perkotaan, yang menimbulkan risiko kesehatan bagi personel darurat yang sering terpapar kondisi tersebut. Selain itu, penggunaan sirene yang intensif oleh kendaraan darurat di kawasan padat penduduk dapat menyebabkan polusi suara, yang berpotensi mengganggu kesehatan masyarakat.

1.2.4 Aspek Kesehatan

Dari perspektif kesehatan, keterlambatan kendaraan darurat dalam mencapai tujuan dapat menimbulkan risiko serius, terutama dalam situasi darurat medis. Kemacetan lalu lintas yang menghambat laju kendaraan darurat, seperti ambulans, dapat memperburuk kondisi pasien yang memerlukan penanganan segera. Dalam kasus serangan jantung, stroke, atau cedera berat akibat kecelakaan, setiap menit memiliki nilai kritis. Kepadatan lalu lintas sering kali menghambat akses cepat kendaraan darurat, sehingga memperlambat respons medis. Tanpa sistem pengendalian lalu lintas yang optimal, peluang pasien untuk bertahan hidup atau pulih dapat menurun secara signifikan [3].

1.2.5 Aspek Sosial

Kurangnya kerja sama dari pengemudi, khususnya pengemudi kendaraan pribadi, sering kali menjadi faktor penyebab keterlambatan pelayanan darurat yang disediakan oleh kendaraan darurat [5]. Banyak pengemudi kendaraan pribadi tidak menyadari keberadaan kendaraan darurat di sekitar mereka karena berbagai faktor, seperti suara sirene yang tidak terdengar akibat kabin kendaraan yang kedap suara, volume audio yang tinggi, atau gangguan pendengaran pada pengemudi. Selain itu, sebagian pengemudi mengalami kepanikan setelah mendengar sirene, sehingga kesulitan membuat keputusan cepat untuk memberikan prioritas jalan. Di sisi lain, penerapan teknologi baru untuk mendukung deteksi kendaraan darurat dapat menimbulkan kebingungan atau keraguan di kalangan masyarakat jika tidak disertai sosialisasi yang memadai. Oleh karena itu, sosialisasi yang efektif diperlukan untuk memastikan pemahaman dan dukungan masyarakat terhadap implementasi teknologi tersebut.

1.3 Analisis Solusi Yang Ada

Terdapat sejumlah tantangan dalam mengimplementasikan alat atau sistem deteksi kendaraan darurat pada sistem pengendalian lampu lalu lintas. Tantangan ini mendorong penulis untuk menganalisis berbagai solusi yang telah tersedia guna mengatasi permasalahan tersebut.

1.3.1 Sistem Berbasis Teknologi Radio Frequency

Teknologi Radio Frequency (RF) menawarkan solusi potensial untuk mengatasi kemacetan lalu lintas yang menghambat kendaraan darurat, khususnya ambulans, dalam mencapai tujuan secara cepat. Salah satu sistem yang diusulkan memanfaatkan modul nRF24L01+ untuk mengirimkan sinyal dari ambulans ke pusat pengendalian lampu lalu lintas, yang secara otomatis mengalihkan mode lampu dari normal ke darurat [6]. Pendekatan berbasis RF ini memiliki beberapa keunggulan, termasuk efisiensi energi, dengan konsumsi daya sekitar 22,1 mA pada mode normal dan 43,9 mA pada mode darurat. Selain itu, efektivitas biaya sistem ini ditingkatkan melalui penggunaan komponen ekonomis, seperti modul nRF24L01+ dan Arduino Nano, yang mendukung produksi massal dan implementasi skala luas.

Namun, sistem ini memiliki sejumlah keterbatasan. Teknologi RF rentan terhadap gangguan akibat penghalang fisik dan interferensi sinyal dari perangkat lain, yang dapat mengurangi jangkauan deteksi secara signifikan. Sistem ini juga memerlukan intervensi

manual, karena pengemudi ambulans harus mengaktifkan tombol pemicu untuk mengirim sinyal ke lampu lalu lintas, sehingga menambah beban tanggung jawab selama situasi darurat. Lebih lanjut, desain saat ini hanya mampu memproses sinyal dari satu ambulans pada satu waktu, yang berpotensi menyebabkan konflik ketika beberapa kendaraan darurat beroperasi secara bersamaan. Kinerja sistem juga dapat menurun di lingkungan perkotaan yang padat dengan banyak penghalang fisik. Meskipun demikian, sistem pengendalian lalu lintas berbasis RF merupakan langkah progresif dalam meningkatkan waktu respons darurat.

1.3.2 Sistem Berbasis Algoritma Prioritas

Sistem pengendalian lalu lintas berbasis prioritas untuk kendaraan darurat memberikan keunggulan signifikan dalam mengelola respons darurat [1]. Sistem ini mampu menetapkan tingkat prioritas berdasarkan jenis dan tingkat keparahan insiden, sehingga memungkinkan respons darurat yang lebih cepat dan efisien. Dengan memanfaatkan algoritma canggih untuk menghitung intervensi sinyal hijau yang diperlukan, sistem ini secara signifikan mengurangi waktu respons kendaraan darurat. Selain itu, sistem ini mempertimbangkan dampak terhadap arus lalu lintas di sekitarnya, sehingga meminimalkan gangguan bagi pengguna jalan lain. Integrasi teknologi sensor canggih, seperti magnetometer, detektor ultrasonik, dan radar gelombang mikro, memungkinkan pengumpulan data lalu lintas secara real-time. Data tersebut terbukti sangat penting dalam memprediksi waktu intervensi sinyal yang optimal dan mempercepat penyelesaian insiden, yang pada gilirannya meningkatkan efektivitas sistem.

Meskipun demikian, sistem ini memiliki sejumlah keterbatasan. Salah satu kekhawatiran utama adalah ketergantungan pada infrastruktur sensor yang mahal, yang memerlukan perawatan rutin dan dapat membebani anggaran. Tantangan implementasi juga muncul dari kebutuhan akan integrasi yang kompleks antara berbagai komponen teknologi dan infrastruktur lalu lintas yang sudah ada, yang menuntut koordinasi yang erat antara otoritas lalu lintas dan layanan darurat. Selain itu, efektivitas sistem dapat terganggu dalam kondisi lalu lintas yang sangat dinamis, di mana perubahan mendadak dapat mengurangi keakuratan prediksi dan efektivitas intervensi sinyal. Meskipun pendekatan ini menawarkan solusi inovatif untuk manajemen lalu lintas darurat, pertimbangan mendalam terhadap keterbatasan dan potensi tantangannya sangat penting untuk keberhasilan implementasi. Keseimbangan antara manfaat dan tantangan sistem akan menjadi faktor penentu dalam mengevaluasi kelayakan dan keberlanjutan jangka panjangnya dalam meningkatkan kemampuan respons darurat.

1.3.3 Sistem Berbasis Edge Computing dan IoT

Strategi pengendalian optimal untuk sistem prioritas kendaraan darurat dalam konteks kota pintar memanfaatkan teknologi edge computing dan sensor Internet of Things (IoT) untuk mengatasi keterbatasan sistem Prioritas Kendaraan Darurat yang ada, sekaligus menyeimbangkan kebutuhan responden darurat dan arus lalu lintas reguler [7]. Pendekatan ini menawarkan keunggulan signifikan, termasuk pengurangan rata-rata waktu tunggu sebesar 73,23% untuk kendaraan non-darurat dibandingkan dengan sistem konvensional. Dengan memanfaatkan edge computing, strategi ini memungkinkan pengambilan keputusan dan tindakan dengan latensi di bawah 100 ms, memastikan respons cepat terhadap situasi darurat. Selain itu, pendekatan ini menerapkan metode manajemen lalu lintas yang lebih terperinci dengan mendistribusikan tahapan waktu sinyal, sehingga mengurangi gangguan mendadak pada arus lalu lintas dan menghasilkan pengalaman lalu lintas yang lebih lancar secara keseluruhan.

Namun, sistem ini menghadapi sejumlah tantangan dan keterbatasan. Ketergantungan pada sensor GPS dan IoT dapat menyebabkan masalah keandalan di lingkungan perkotaan dengan cakupan GPS yang terbatas, yang berpotensi menghasilkan data lokasi yang tidak akurat dan mengurangi ketepatan pengambilan keputusan. Efektivitas sistem juga dapat terganggu dalam kondisi lalu lintas yang sangat padat, di mana kendaraan darurat yang diprioritaskan tetap menghadapi kesulitan navigasi. Meskipun edge computing secara signifikan mengurangi latensi, implementasinya memerlukan investasi infrastruktur yang besar untuk penyebaran edge server di seluruh wilayah perkotaan, yang dapat membebani anggaran kota. Selain itu, sistem ini mengasumsikan kompatibilitas universal kendaraan darurat dengan sensor IoT, yang mungkin tidak selaras dengan kondisi dunia nyata. Untuk mengevaluasi kelayakan sistem sebagai solusi kota pintar yang dapat diterapkan secara luas, pengujian menyeluruh dalam berbagai skenario dan pengembangan mekanisme penanganan kegagalan yang andal sangat diperlukan. Pertimbangan ini menegaskan pentingnya evaluasi mendalam dan penyempurnaan lebih lanjut sebelum implementasi skala besar dapat dilakukan dengan keyakinan.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi kendaraan darurat secara real-time yang terintegrasi dengan pengendalian lampu lalu lintas. Sistem ini diharapkan mampu memberikan prioritas bagi kendaraan darurat, seperti ambulans dan pemadam kebakaran, guna mempercepat waktu respons layanan darurat di tengah kemacetan lalu lintas perkotaan. Secara khusus, tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan sistem deteksi kendaraan darurat berbasis audio dan visual untuk mengidentifikasi keberadaan kendaraan darurat secara otomatis.
2. Mendesain sistem pengendalian lampu lalu lintas adaptif yang dapat merespons kehadiran kendaraan darurat dengan mengubah siklus sinyal secara dinamis untuk memberikan prioritas jalur.
3. Menerapkan arsitektur yang mendukung pengambilan keputusan cepat untuk memungkinkan proses deteksi dan kontrol dilakukan secara lokal dan real-time.
4. Mengevaluasi performa sistem dari segi akurasi deteksi, waktu deteksi, serta dampaknya terhadap kelancaran arus lalu lintas secara keseluruhan melalui pengujian di lingkungan simulasi terkontrol.

1.5 Batasan Tugas Akhir

Untuk menjaga fokus, keterukuran, serta keterlaksanaan dari pengembangan dan pengujian sistem dalam tugas akhir ini, ditetapkan sejumlah batasan teknis sebagai berikut:

1. Deteksi audio kendaraan darurat memiliki batasan teknis berupa jarak respon hingga 20 cm dalam skala 1:50, waktu respon maksimal 50 milidetik, dan level sinyal yang berada dalam rentang -40 dBFS hingga 0 dBFS.
2. Deteksi visual kendaraan darurat dibatasi dengan jarak deteksi hingga 20 cm dalam skala 1:50, waktu deteksi maksimal 50 milidetik, serta akurasi deteksi yang harus berada di atas 80%.
3. Pada bagian edge computing dan IoT, batasan teknis yang diterapkan mencakup performa prosesor optimal sebesar 2,4 GHz, temperatur operasional optimal hingga 85 derajat Celsius, serta kualitas konektivitas dengan kecepatan unduh dan kecepatan unggah yang cukup untuk konektivitas jaringan sederhana.