

BAB 1

USULAN GAGASAN

1.1. Deskripsi Umum Masalah

Perkembangan jumlah kendaraan di Indonesia terus mengalami peningkatan yang signifikan setiap tahunnya. Berdasarkan data dari Korps Lalu Lintas Kepolisian Negara Republik Indonesia (Korlantas Polri), jumlah kendaraan bermotor di Indonesia tercatat meningkat dari 133,6 juta unit pada tahun 2020 menjadi 146,7 juta unit pada tahun 2021, atau mengalami pertumbuhan sebesar 9,8% [1]. Tren peningkatan ini berlanjut pada tahun-tahun berikutnya, dengan estimasi jumlah kendaraan mencapai 152,3 juta unit pada tahun 2022 dan 158,6 juta unit pada tahun 2023 [2]. Peningkatan populasi kendaraan ini berdampak langsung terhadap peningkatan volume lalu lintas serta menimbulkan berbagai tantangan dalam pengelolaan infrastruktur transportasi, khususnya di ruas jalan tol.

Salah satu kendala utama yang dihadapi adalah keterbatasan kapasitas infrastruktur jalan tol. Penambahan jumlah lajur maupun pembangunan gerbang tol baru memerlukan investasi yang sangat besar dan sering kali terhambat oleh keterbatasan ketersediaan lahan, terutama di kawasan perkotaan yang memiliki kepadatan penduduk tinggi [3]. Sebagai ilustrasi, proyek pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Elevated sepanjang 36,4 km membutuhkan total investasi sebesar Rp 16,23 triliun [4]. Selain kendala investasi, proses pembebasan lahan yang kompleks dan memakan waktu menjadi faktor tambahan yang menghambat percepatan peningkatan kapasitas jalan tol.

Kemacetan yang terjadi di gerbang tol merupakan permasalahan serius yang memberikan dampak luas, baik dari segi waktu, biaya, maupun efisiensi transportasi. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Kementerian Perhubungan, kemacetan di gerbang tol dapat menyebabkan pemborosan bahan bakar hingga 20% serta peningkatan waktu tempuh hingga 60% [5]. Kondisi ini berdampak signifikan terhadap efisiensi distribusi logistik, mobilitas masyarakat, dan produktivitas nasional. Laporan dari Bank Dunia memperkirakan bahwa kerugian ekonomi akibat kemacetan di wilayah Jabodetabek mencapai Rp 65 triliun per tahun [6].

Upaya modernisasi infrastruktur jalan tol melalui penerapan sistem pembayaran elektronik (e-toll) telah dilakukan sejak tahun 2017. Namun, implementasi sistem ini masih menghadapi berbagai tantangan yang kompleks, khususnya terkait dengan integrasi sistem database, jaringan komunikasi, dan sistem pembayaran elektronik yang memerlukan investasi besar serta koordinasi yang efektif antar pemangku kepentingan [7]. Selain itu, kendala interoperabilitas antar penyedia layanan serta permasalahan keandalan sistem, terutama saat terjadi lonjakan transaksi pada periode puncak, masih menjadi isu yang harus diatasi [8].

Faktor keamanan data dan privasi pengguna juga menjadi perhatian penting dalam pengembangan sistem pembayaran elektronik di jalan tol. Berdasarkan laporan dari Badan Siber dan Sandi Negara (BSSN), sektor transportasi termasuk dalam lima besar sektor yang paling rentan terhadap serangan siber di Indonesia[9]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem keamanan yang kuat serta penerapan kebijakan yang sesuai dengan regulasi perlindungan data pribadi untuk memastikan keamanan dan kenyamanan pengguna dalam penerapan sistem pembayaran elektronik di jalan tol.

1.2. Analisis Masalah

1.2.1. Aspek Ekonomi

Dari sisi ekonomi, kemacetan dan antrean panjang yang terjadi di gerbang tol memberikan dampak negatif yang signifikan, terutama dalam hal pemborosan bahan bakar dan peningkatan biaya operasional kendaraan. Berdasarkan hasil studi yang dilakukan oleh Kementerian Perhubungan, kemacetan di gerbang tol dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar kendaraan hingga 20% [10], [11]. Kondisi ini tidak hanya berdampak terhadap individu pengguna jalan, namun juga terhadap efisiensi logistik dan distribusi barang.

Selain itu, waktu yang hilang saat menunggu di pintu tol berdampak langsung pada produktivitas, terutama untuk perjalanan bisnis dan pengiriman barang. Menurut laporan dari Bank Dunia, kerugian ekonomi akibat kemacetan di area Jabodetabek diperkirakan mencapai Rp 65 triliun per tahun [6]. Hal ini mengindikasikan bahwa kemacetan di pintu tol bukan hanya isu transportasi, tetapi juga memiliki pengaruh besar terhadap ekonomi negara.

1.2.2. Aspek Lingkungan

Kemacetan yang terjadi di gerbang tol turut memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu dampak utama adalah peningkatan polusi udara akibat emisi kendaraan bermotor yang idle (diam) dalam antrean. Penelitian menunjukkan bahwa kendaraan yang berada dalam kondisi idle menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang lebih tinggi dibandingkan saat kendaraan bergerak lancar [12].

Selain emisi gas buang, suara bising yang dihasilkan oleh kemacetan, terutama dari suara klakson kendaraan, menjadi isu lingkungan yang serius. Tingkat kebisingan di sekitar pintu masuk tol sering kali melampaui batas yang disarankan oleh World Health Organization (WHO), yaitu 55 dB untuk kawasan pemukiman [13]. Situasi ini dapat mengurangi kenyamanan dan kualitas hidup penduduk yang tinggal di dekat jalan tol.

1.2.3. Aspek Sosial

Dari segi sosial, kemacetan di gerbang tol tidak hanya menyebabkan keterlambatan perjalanan, tetapi juga meningkatkan tingkat stres dan emosi negatif di kalangan pengguna jalan. Studi dalam bidang psikologi transportasi mengungkapkan bahwa kondisi kemacetan lalu lintas dapat meningkatkan kadar hormon stres (kortisol) hingga 60% lebih tinggi dibandingkan kondisi lalu lintas normal [14].

Selain itu, waktu yang terbuang selama terjebak dalam antrean gerbang tol mengurangi waktu yang dapat dimanfaatkan untuk kegiatan sosial, berkumpul dengan keluarga, ataupun beristirahat. Dampak kumulatif dari kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas hidup masyarakat secara keseluruhan [15].

1.2.4. Aspek Lainnya

Selain dampak langsung terhadap pengguna jalan, kemacetan yang terus-menerus terjadi di area gerbang tol juga berimplikasi terhadap keandalan dan ketahanan infrastruktur jalan itu sendiri. Volume kendaraan yang menumpuk dan berhenti dalam waktu lama di area gerbang tol dapat mempercepat kerusakan permukaan jalan, terutama akibat beban statis kendaraan yang besar. Kondisi ini meningkatkan kebutuhan biaya perawatan dan perbaikan jalan tol yang diperkirakan dapat mencapai 15–20% dari total biaya operasional tahunan jalan tol [16].

Di sisi lain, kemacetan yang berkepanjangan juga berpotensi menurunkan daya tarik investasi di daerah terdampak. Inefisiensi sistem transportasi, khususnya di akses utama seperti jalan tol, dapat menjadi hambatan bagi pertumbuhan ekonomi regional dan mengurangi minat investor untuk menanamkan modal di wilayah tersebut [17].

1.3. Analisis Solusi yang Ada

Kemacetan di jalan tol merupakan salah satu permasalahan serius yang membutuhkan solusi komprehensif dan terintegrasi. Berbagai upaya telah dilakukan oleh pemerintah maupun pihak operator jalan tol untuk mengatasi permasalahan ini. Solusi yang diterapkan meliputi berbagai aspek, mulai dari peningkatan kapasitas infrastruktur hingga penerapan teknologi modern untuk efisiensi sistem pembayaran dan pengelolaan lalu lintas [18].

Salah satu solusi yang telah diimplementasikan adalah penerapan sistem pembayaran elektronik melalui penggunaan e-Toll dan pengembangan sistem *Multi Lane Free Flow* (MLFF), yaitu sistem pembayaran yang memungkinkan kendaraan melakukan transaksi tanpa perlu berhenti di gerbang tol. Penerapan sistem ini terbukti dapat mengurangi antrean kendaraan di gerbang tol secara signifikan, sehingga memperlancar arus lalu lintas [16].

Selain itu, pembangunan infrastruktur baru seperti pelebaran jalan, penambahan jumlah gerbang tol, dan pembangunan area istirahat (rest area) di lokasi strategis juga dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi kemacetan, khususnya di ruas-ruas jalan tol yang memiliki volume lalu lintas tinggi [19]. Meskipun solusi ini cukup efektif dalam meningkatkan kapasitas layanan, namun terdapat keterbatasan pada ketersediaan lahan, terutama di wilayah perkotaan yang padat penduduk, sehingga tidak semua lokasi memungkinkan dilakukan perluasan [20].

Sistem e-Toll Card berbasis contactless smart card yang telah diperkenalkan juga memberikan dampak positif dalam percepatan transaksi pembayaran tol. Kelebihan utama sistem ini adalah waktu transaksi yang lebih cepat dibandingkan metode pembayaran tunai. Namun demikian, sistem ini masih memiliki beberapa kelemahan, antara lain pengguna tetap harus menghentikan kendaraan dan menempelkan kartu pada alat pembaca (reader). Selain itu, risiko kartu tertinggal, hilang, atau rusak menjadi kendala yang masih perlu diatasi [21].

Alternatif lain yang diusulkan adalah sistem *Multi Lane Free Flow* (MLFF) yang memanfaatkan teknologi On-Board Unit (OBU). Dengan sistem ini, pengguna tidak perlu menghentikan kendaraan saat melintasi gerbang tol, sehingga waktu transaksi dapat diminimalisir dan arus lalu lintas menjadi lebih lancar [22].

Penggunaan teknologi identifikasi otomatis berbasis *Radio Frequency Identification* (RFID) juga menjadi salah satu solusi yang dinilai efektif untuk diterapkan dalam sistem pembayaran tol otomatis. Sistem ini memungkinkan identifikasi kendaraan secara otomatis melalui RFID *Ultra High Frequency* (UHF) yang terpasang pada kendaraan. Data identifikasi kendaraan kemudian dicatat dan dikelola pada basis data operator jalan tol [23].

Teknologi RFID merupakan teknologi yang dapat melakukan identifikasi objek menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mengirim dan menerima data dalam jarak yang relatif jauh. Oleh karena itu, teknologi ini sangat sesuai untuk diimplementasikan dalam sistem pembayaran tol otomatis, karena memungkinkan identifikasi kendaraan tanpa perlu menghentikan laju kendaraan [24].

Dalam implementasinya, sistem pembayaran retribusi jalan tol berbasis RFID terdiri dari perangkat RFID reader yang dipasang di gerbang tol dan RFID tag yang ditempel pada kendaraan. Proses pengolahan dan penyimpanan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis antarmuka Delphi 7 dan sistem manajemen basis data Microsoft Access [25].

1.4. Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk merancang, merealisasikan, dan menguji prototipe sistem pembayaran tol otomatis berbasis teknologi *Radio Frequency Identification* (RFID) Long Range (*Ultra High Frequency* / UHF), sebagai salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan kemacetan di gerbang tol. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi transaksi tol melalui penerapan metode identifikasi kendaraan secara otomatis tanpa perlu menghentikan laju kendaraan. Secara khusus, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan merealisasikan antena tag RFID dengan frekuensi kerja pada rentang UHF yang sesuai untuk aplikasi identifikasi kendaraan di lingkungan jalan tol.
2. Merancang dan mengintegrasikan modul pembaca (reader) RFID dengan sistem pengolahan data yang terhubung, sehingga mampu menerima, mengolah, dan menyimpan data identifikasi kendaraan secara otomatis.
3. Mengembangkan sistem basis data yang berfungsi untuk mencatat, memantau, dan mengelola data hasil identifikasi kendaraan secara real-time.
4. Melakukan pengujian terhadap unjuk kerja sistem secara menyeluruh, yang mencakup pengujian jarak jangkauan pembacaan tag, tingkat akurasi identifikasi, kecepatan transmisi data, serta keandalan sistem dalam kondisi operasional yang menyerupai lingkungan nyata.
5. Memberikan rekomendasi teknis dan evaluasi terhadap keunggulan dan keterbatasan prototipe yang dikembangkan, sebagai masukan untuk pengembangan sistem serupa dalam skala yang lebih besar dan implementasi di lapangan.

Dengan tercapainya tujuan-tujuan tersebut, diharapkan sistem pembayaran tol otomatis berbasis RFID yang dikembangkan dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi transaksi di gerbang tol, mengurangi kemacetan, serta memberikan kontribusi terhadap modernisasi sistem transportasi jalan tol di Indonesia.

1.5. Batasan Tugas Akhir

Untuk menjaga fokus dan kejelasan ruang lingkup dalam pelaksanaan tugas akhir ini, serta mempertimbangkan keterbatasan waktu, sumber daya, dan cakupan implementasi, maka kegiatan pengembangan sistem dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Sistem yang dirancang merupakan prototipe berbasis teknologi RFID pasif frekuensi UHF (*Ultra High Frequency*), dengan cakupan pengujian dilakukan dalam skala laboratorium atau simulasi statis.

2. Desain tag RFID difokuskan pada bentuk antena berbasis *microstrip* planar menggunakan material substrat tertentu, tanpa mengeksplorasi variasi jenis antena lain atau teknologi tag aktif/semi-aktif.
3. Perangkat pembaca (reader) yang digunakan merupakan reader UHF dengan antarmuka USB dan dukungan konektivitas Wi-Fi, yang diintegrasikan dengan mikrokontroler untuk kebutuhan kontrol dan pemrosesan data secara lokal.
4. Sistem komunikasi data antara reader dan server berbasis jaringan nirkabel Wi-Fi standar, dan tidak mencakup implementasi sistem komunikasi alternatif seperti GSM, NB-IoT, atau LPWAN.
5. Evaluasi kinerja sistem dibatasi pada parameter teknis umum yang relevan dengan sistem RFID, serta dilakukan melalui pendekatan pengujian dan simulasi dengan asumsi kondisi lingkungan yang terkontrol.
6. Integrasi perangkat lunak mencakup pengembangan aplikasi mobile dan website, dengan fokus pada fungsi dasar seperti registrasi, pemantauan data kendaraan, serta pengelolaan akun pengguna dan data transaksi.
7. Sistem yang dikembangkan tidak mencakup integrasi langsung dengan layanan pembayaran elektronik, seperti sistem perbankan, e-wallet, atau gateway pembayaran nasional.
8. Pengujian sistem dilakukan dalam skenario terbatas, tanpa melibatkan uji coba lapangan secara langsung di lingkungan jalan tol sesungguhnya, serta tidak mencakup uji performa kendaraan bergerak.
9. Aspek legal, regulasi nasional, serta kelayakan bisnis dan implementasi massal berada di luar ruang lingkup pembahasan dalam tugas akhir ini, meskipun diperhatikan secara konseptual sebagai latar belakang pengembangan.
10. Sistem yang dirancang belum ditujukan sebagai produk komersial siap pakai, melainkan sebagai studi awal dan validasi konsep dalam bentuk prototipe berbasis teknologi RFID untuk kebutuhan identifikasi kendaraan secara otomatis.