

# Kajian Penerapan Teknologi Cerdas dalam Sistem *Multi-Lane Free Flow* (MLFF) Pada Jalan Toll Trans Sumatera

Lisa Ayu Winanti<sup>1\*</sup>, Heni Fitriani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Palembang

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya

\*Email: [lisaayuwinanti@gmail.com](mailto:lisaayuwinanti@gmail.com)

## Abstract

*Queues at toll gates remain a major problem on highways. This often causes congestion when approaching the toll gates, as the number of incoming vehicles exceeds the existing service capacity. The Indonesian government will implement a Multi-Lane Free Flow (MLFF) system as a solution so that toll road users do not need to stop their vehicles when making toll payments. However, the government needs to further investigate the problems that may arise from eliminating queues, such as changes in traffic characteristics and vehicle arrival times at major toll road intersections. This study examines the implementation plan and attempts to identify potential problems when MLFF is implemented. It also examines how to maintain these positive impacts so that the toll road can meet minimum service standards. This study uses forecasting or time series methods for traffic occurrences, taking into account service times, queuing systems, and gate capacity. This study also considers the project's financial feasibility based on toll revenues and a cost-benefit analysis of the toll road. Based on the results of this study, it can be concluded that the implementation of the MLFF system at the Keramasan toll gate is feasible from a physical and financial perspective. However, in the transition process, good socialization is needed from the government and toll road investors, as well as public acceptance of the MLFF system or this new payment transaction.*

**Keywords :** Queue, Multi Lane Free Flow (MLFF), Transaction Time

## 1. PENDAHULUAN

Jalan tol adalah suatu jalan yang termasuk dalam sistem jaringan jalan umum dan berfungsi sebagai jalan nasional di mana para penggunanya harus membayar biaya tol. Fungsi jalan tol adalah untuk meningkatkan efektivitas layanan distribusi yang mendukung pertumbuhan ekonomi, terutama di daerah yang telah memiliki tingkat perkembangan yang tinggi (Budiharjo dkk., 2019).

Pada awal periode pemerintahan kabinet kerja, Pemerintah menetapkan sasaran pembangunan jalan tol sepanjang 3.196 km hingga akhir tahun 2024, sesuai dengan target yang tercantum dalam rencana strategis (Renstra) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat untuk periode 2020-2024. Hingga tahun 2024, jumlah penambahan jalan tol yang terwujud mencapai 919 km, dan

diperkirakan pada akhir 2024 akan ada 204 km tambahan (BPJT, 2020-2024).

Jalan tol adalah suatu jaringan jalan di mana pengguna harus membayar sesuai tarif yang telah ditetapkan oleh pengelola tol (Husin dkk., 2019). Untuk mendukung pertumbuhan ekonomi, khususnya di daerah yang sudah berkembang pesat, Indonesia telah menerapkan beberapa pengontrolan akses masuk ke jalan tol, termasuk penggunaan kartu elektronik (e-Toll) untuk melakukan transaksi tanpa uang tunai (cashless) (Lutfi Ramadhansyah, 2023). Sebelumnya, pembayaran dilakukan secara langsung dengan uang tunai, tetapi dengan adanya sistem pembayaran baru menggunakan e-Toll, pengguna kini dapat melakukan transaksi dengan cara yang lebih modern. Jalan tol kini tidak perlu lagi menyiapkan uang tunai untuk membayar tarif.

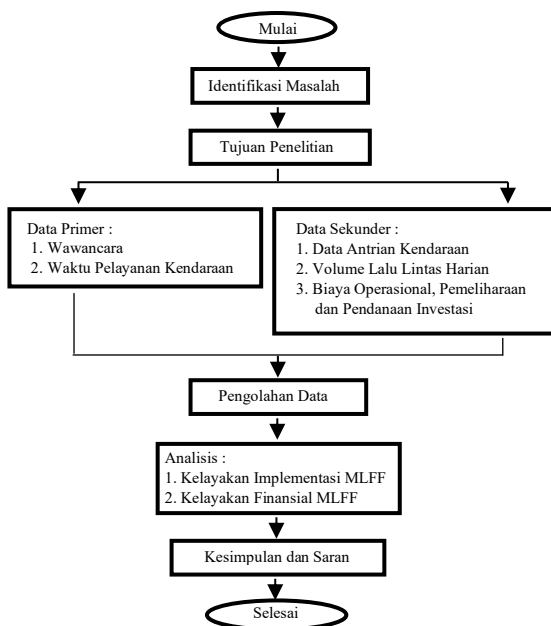
Cukup dengan menempelkan kartu e-Toll pada mesin pembaca, saldo akan secara otomatis terpotong sesuai dengan tarif yang telah ditetapkan. Meskipun sistem e-Toll telah diterapkan, saat lalu lintas ramai masih terlihat antrian kendaraan yang cukup panjang di gerbang tol. Hal ini terjadi karena setiap pengendara memerlukan waktu yang lama untuk menempelkan kartu e-Toll mereka. Selain itu, sering kali pengendara mengalami kesulitan dalam melakukan transaksi karena saldo yang tidak mencukupi. (Budiharjo dkk., 2019).

Berdasarkan penelitian kelayakan roatex pada tahun 2020, Indonesia kehilangan sekitar Rp 4,4 Triliun setiap tahun akibat kemacetan (Feasibility Study, 2020). Sebagai ilustrasi, di jalan tol Jakarta, volume lalu lintas mencapai 204 juta kendaraan dalam satu tahun dengan rata-rata antrian 5 kendaraan di masing-masing gerbang tol. Ini menunjukkan perlunya pergeseran dari sistem transaksi e-Toll menjadi sistem yang dikenal sebagai Multi Lane Free Flow (MLFF), yang memungkinkan pengendara tidak perlu berhenti atau memperlambat kendaraan saat membayar tol (Suprayitno dkk., 2020). Namun, sebelum adanya MLFF, sistem pembayaran tol nontunai telah diterapkan di jalan tol di Indonesia melalui sistem Single Lane Free Flow (SLFF); kedua sistem ini bertujuan untuk mengurangi waktu tunggu kendaraan di gerbang tol. Dengan cara ini, kepadatan kendaraan di tol dapat teratasi dengan cepat tanpa penghalang. Perbedaan utama antara kedua sistem ini terletak pada perangkat yang digunakan dalam transaksi nirsentuh MLFF, yaitu Electronic On-Board Unit atau yang lebih dikenal sebagai E-OBU. Melalui sistem ini, pengendara dapat merasakan penghematan biaya operasional dan penurunan konsumsi bahan bakar (BPJT, 2020). Pada awalnya, ada rencana untuk mengimplementasikan MLFF di Indonesia pada akhir tahun 2018, namun pelaksanaannya tertunda karena belum ada kepastian hukum, keamanan, pendapatan tol, serta keandalan teknologi yang sesuai untuk mendukung sistem MLFF di negara ini (BPJT, 2023). Salah satu jalan tol yang ada di Indonesia yaitu jalan tol Kayu Agung - Palembang - Betung sepanjang 111,69 km berada di Provinsi Sumatera Selatan adalah Proyek Strategis Nasional (PSN) berdasarkan Perpres No. 109 Tahun 2020 yang dibangun

atas prakarsa dari Badan Usaha Jalan Tol BUJT adalah PT. Waskita Sriwijaya Tol. Tol Kapal Betung adalah bagian dari jalur utama Jalan Tol Trans Sumatera yang bertujuan untuk meningkatkan hubungan antar kota di bagian Selatan Sumatera serta memperkuat konektivitas kawasan, memudahkan distribusi barang dari pusat industri di jalur Palembang-Jambi. Jalan tol ini juga terhubung dengan jalan nasional di Sumatera, sehingga diharapkan dapat mendukung pengembangan area, khususnya di Sumatera Selatan yang juga merupakan pemegang konsesi pengelolaan tol. Lingkup kerjasamanya mencakup pembangunan infrastruktur, manajemen operasional jalan tol, serta pemeliharaan dengan semua pembiayaan, termasuk biaya pengadaan tanah, berasal dari BUJT sebagai investasi. Pada tahun 2020, segmen Kayuagung-Keramasan telah mulai beroperasi dengan panjang 42,50 km. Oleh karena itu, studi ini memiliki tujuan untuk memberikan sumbangan yang signifikan terhadap pengembangan dan implementasi sistem pembayaran tol yang menggunakan konsep Multilane Free Flow (MLFF), yaitu sistem pembayaran tol tanpa henti di beberapa jalur. Penelitian ini menerapkan metode sistem antrian yang dipertimbangkan dari segi waktu pelayanan dan pengamatan di gerbang tol, juga dari kapasitas yang ada di gerbang tol tersebut, serta aspek kelayakan dan daya tarik finansial dari perspektif Investor atau Badan Usaha Jalan Tol (BUJT). Dalam konteks ini, sistem MLFF diharapkan dapat mengatasi masalah antrian kendaraan di gerbang tol (Husin, 2019). Tujuan akhir yang diharapkan dalam upaya mencapai standar pelayanan minimal untuk jalan tol adalah menciptakan transaksi tol yang lebih efektif, efisien, aman, dan nyaman.

## 2. METODOLOGI

Bagan alir penelitian digunakan sebagai dasar pelaksanaan penelitian serta untuk mempermudah penelitian tersebut. Bagan alir penelitian dapat dilihat Gambar 1.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara dan penghitungan waktu pelayanan, dan data sekunder diperoleh dari instansi terkait seperti Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT), PT. Jasamarga Tol. Data sekunder meliputi antrian kendaraan, volume lalu lintas harian, biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan pendanaan investasi.

#### 3.1. Data Primer

Data utama dikumpulkan secara langsung melalui wawancara langsung dengan pengguna jalan tol dan pemakai jalan tol yang relevan. Pertanyaan yang dikumpulkan mencakup pendapat dan penilaian tentang kelayakan penerapan MLFF. Selanjutnya, observasi langsung dilakukan di lokasi penelitian, yang terletak di jalan tol Kayuagung Palembang Betung di gerbang tol Keramasan.

##### 3.1.1. Wawancara

Hasil wawancara (penilaian ahli) dengan sepuluh orang yang disurvei menghasilkan penilaian kelayakan pemasangan MLFF rata-rata dengan skala 50-59%. Tahun implementasi diproyeksikan

adalah 2034. Ini karena ada banyak faktor yang memengaruhi penerapan sistem transaksi menggunakan MLFF. Beberapa faktor yang menjadi pertimbangan saat menerapkan MLFF di jalan tol trans Sumatera, terutama di gerbang tol Keramasan-Kayuagung, adalah volume lalu lintas harian yang rendah, tingkat kesadaran hukum pengguna jalan tol yang rendah, kesiapan sumber daya manusia, dan biaya yang diperlukan untuk menerapkan MLFF.

#### 3.1.2. Waktu Pelayanan Kendaraan

Untuk mendapatkan data primer, alat penghitung stop watch digunakan di pintu tol keramasan. Ini digunakan di satu titik pengamatan, yaitu di gerbang tol. Observasi dilakukan selama tiga hari, dihitung mulai pukul 07.00 hingga 17.00, dengan waktu luang satu jam per putaran. Tabel 3.1 menunjukkan data waktu pelayanan yang telah dikumpulkan.

Tabel 1. Waktu Pelayanan Kendaraan

| No | Hari Observasi       | Jam         | Waktu Transaksi (Detik) | Rata-Rata (Detik) |
|----|----------------------|-------------|-------------------------|-------------------|
| 1  | Senin, 15 April 2024 | 07.00-08.00 | 5,12                    | 6,034             |
|    |                      | 08.00-09.00 | 5,20                    |                   |
|    |                      | 12.00-13.00 | 5,24                    |                   |
|    |                      | 15.00-16.00 | 6,43                    |                   |
|    |                      | 16.00-17.00 | 8,28                    |                   |
| 2  | Rabu, 17 April 2024  | 07.00-08.00 | 8,43                    | 9,050             |
|    |                      | 08.00-09.00 | 7,67                    |                   |
|    |                      | 12.00-13.00 | 8,48                    |                   |
|    |                      | 15.00-16.00 | 9,61                    |                   |
|    |                      | 16.00-17.00 | 11,06                   |                   |
| 3  | Sabtu, 20 April 2024 | 07.00-08.00 | 11,43                   | 10,058            |
|    |                      | 08.00-09.00 | 10,56                   |                   |
|    |                      | 12.00-13.00 | 10,80                   |                   |
|    |                      | 15.00-16.00 | 8,67                    |                   |
|    |                      | 16.00-17.00 | 8,83                    |                   |

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Rata-rata = 8,381 detik/kendaraan

$$\frac{1}{\mu} = 8,381 \text{ detik/kendaraan}$$

$$\mu = \frac{1 \times 3600}{8,381}$$

$$= 429,543 \text{ kendaraan/jam}$$

Tingkat pelayanan ( $\mu$ ) adalah 8,381 detik/kendaraan, atau 429,543 kendaraan/jam, untuk melakukan transaksi pembayaran tol di gerbang Tol Keramasan.

### 3.2. Data Sekunder

Untuk penelitian ini, data sekunder digunakan, yang berasal dari sumber terkait, seperti sistem layanan transaksi, jumlah kendaraan yang masuk dan keluar tol, jumlah antrian kendaraan, laju pertumbuhan lalu lintas, dan biaya operasional, perawatan, dan investasi. Data sekunder juga berasal dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal, dan laporan.

#### 3.2.1. Sistem Layanan Transaksi

Saat ini, ruas tol Kayuagung-Palembang menggunakan sistem transaksi terbuka (Open System). Pengguna jalan sudah diberlakukan tarif. Tabel 3.2 menunjukkan tarif tol yang diberlakukan saat ini.

**Tabel 2.** Tarif Tol Berdasarkan Tujuan dan Golongan Kendaraan

| TUJUAN     | GOL I  | GOL II | GOL III | GOL IV  | GOL V   |
|------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Kramasan   | 50.000 | 75.000 | 75.000  | 100.000 | 100.000 |
| Kayu Agung | 50.000 | 75.000 | 75.000  | 100.000 | 100.000 |

Sumber : Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT), 2024

Tabel 2 menunjukkan bahwa tarif tol dapat dikategorikan ke dalam lima (5) kategori berdasarkan tujuan yang berbeda. Tarif tol diputuskan oleh Menteri PUPR setiap dua tahun sekali. Laju inflasi, pemenuhan Standar Pelayanan Minimal (SPM) jalan tol, kemampuan bayar pengguna jalan, besar keuntungan biaya operasi kendaraan, dan kelayakan investasi adalah semua komponen yang digunakan untuk menentukan tarif tol.

#### 3.2.2. Kendaraan Yang Masuk dan Keluar Tol

Jalan tol adalah sarana transportasi yang dibuat untuk kendaraan yang cepat. Sebagian besar, kendaraan beroda empat atau lebih diizinkan melintasi jalan tol. Kendaraan non-motor tidak diizinkan karena alasan keamanan dan perbedaan kecepatan. Hanya di beberapa jalan raya yang diizinkan kendaraan roda dua, seperti sepeda motor. Tol Mandara di Bali, Tol Surabaya ke Madura melalui

Jembatan Suramadu, dan Tol Balikpapan ke Penajam Paser Utara memungkinkan kendaraan roda dua melintasi. Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) mengatur golongan kendaraan di jalan tol. Grup kendaraan ini mempengaruhi tarif tol yang harus dibayar dan bagaimana kendaraan ini mempengaruhi infrastruktur jalan tol.

**Tabel 3.** Golongan Kendaraan Bermotor di Jalan Tol

| Golongan     | Jenis Kendaraan                         |
|--------------|---|
| Golongan I   | Sedan, Jip, Pick Up/Truk Kecil, dan Bus |
| Golongan II  | Truk dengan 2 (dua) gandar              |
| Golongan III | Truk dengan 3 (tiga) gandar             |
| Golongan IV  | Truk dengan 4 (empat) gandar            |
| Golongan V   | Truk dengan 5 (lima) gandar             |
| Golongan VI  | Kendaraan bermotor roda 2 (dua)         |

Sumber : Badan Pengatur Jalan Tol, 2007

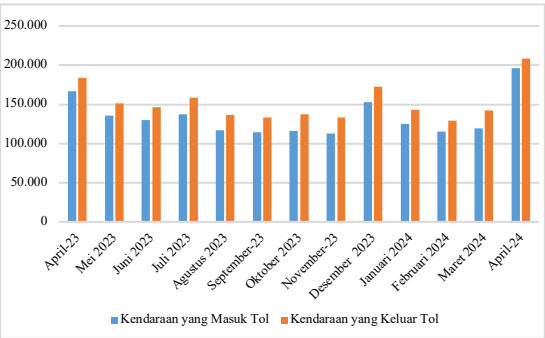
Tabel 3 menunjukkan bahwa kendaraan beroda empat atau lebih biasanya diizinkan melintasi jalan tol; ini termasuk sedan, jip, pick-up atau truk kecil, bus, truk besar dengan dua gandar, truk besar dengan tiga gandar, truk besar dengan empat gandar, dan truk besar dengan lima gandar. Karena alasan keamanan dan perbedaan kecepatan, kendaraan seperti sepeda motor, kendaraan lambat, dan kendaraan non-motor tidak diizinkan. Motor, seperti sepeda motor, hanya diizinkan di beberapa jalan raya. Tol Mandara di Bali, Tol Surabaya ke Madura melalui Jembatan Suramadu, dan Tol Balikpapan ke Penajam Paser Utara memungkinkan kendaraan roda dua melintasi.

**Tabel 4.** Data kendaraan yang masuk dan Keluar

| No | Bulan          | Masuk   | Keluar  | Persentase Kenaikan |
|----|----------------|---------|---------|---------------------|
| 1  | April 2023     | 167,056 | 183,960 | 19%                 |
| 2  | Mei 2023       | 135,613 | 151,510 | 4%                  |
| 3  | Juni 2023      | 129,746 | 146,520 | 6%                  |
| 4  | Juli 2023      | 137,252 | 158,891 | 15%                 |
| 5  | Agustus 2023   | 116,742 | 136,204 | 2%                  |
| 6  | September 2023 | 114,231 | 133,594 | 2%                  |
| 7  | Oktober 2023   | 116,426 | 137,350 | 3%                  |
| 8  | November 2023  | 111,055 | 133,432 | 35%                 |
| 9  | Desember 2023  | 152,503 | 172,577 | 18%                 |
| 10 | Januari 2024   | 125,107 | 142,807 | 8%                  |
| 11 | Februari 2024  | 115,067 | 128,870 | 4%                  |
| 12 | Maret 2024     | 119,681 | 142,007 | 64%                 |
| 13 | April 2024     | 195,808 | 208,374 | 100%                |

Sumber : PT. Waskita Sriwijaya Tol, PT. Jasamarga Tol, 2024

Tabel 4 menunjukkan volume lalu lintas harian, atau data dari kendaraan yang masuk dan keluar selama satu tahun terakhir. Data ini dikumpulkan dari bulan April tahun 2023 hingga April tahun 2024, dan dikategorikan menurut golongan untuk mengetahui rata-rata kendaraan yang masuk dan keluar tol.



Gambar 2. Kendaraan yang Masuk dan keluar tol

Gambar 2 menunjukkan hal ini. Jumlah kendaraan yang masuk dan keluar gerbang tol pada bulan mei 2023 menurun dari bulan april 2023. Jumlah kendaraan yang masuk gerbang tol terus meningkat dan menurun. Pada bulan November tahun 2023, gerbang tol menerima jumlah lalu lintas harian yang paling sedikit. Namun, pada bulan April tahun 2024, karena angkutan lebaran dan hari libur nasional, jumlah kendaraan yang keluar tol meningkat secara signifikan.

### 3.2.3. Jumlah Antrian Kendaraan

Tabel 5. Jumlah Antrian

| No | Periode        | Antrian Kendaraan |
|----|----------------|-------------------|
| 1  | April 2023     | 4                 |
| 2  | Mei 2023       | 5                 |
| 3  | Juni 2023      | 5                 |
| 4  | Juli 2023      | 6                 |
| 5  | Agustus 2023   | 7                 |
| 6  | September 2023 | 7                 |
| 7  | Oktober 2023   | 7                 |
| 8  | November 2023  | 8                 |
| 9  | Desember 2023  | 8                 |
| 10 | Januari 2024   | 9                 |
| 11 | Februari 2024  | 9                 |
| 12 | Maret 2024     | 9                 |
| 13 | April 2024     | 10                |

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Data antrian kendaraan adalah data yang menunjukkan jumlah kendaraan yang sedang menunggu giliran di suatu tempat. Setiap pengguna jalan tol memiliki kendala masing-masing dalam berkendara, maka setiap antrian memiliki waktu yang berbeda. Pada bulan april tahun 2023 rata-rata kendaraan yang antri di gerbang tol sebanyak 4 kendaraan, kemudian setiap bulan mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan jumlah kendaraan dan antrian kendaraan setiap bulannya.

### 3.2.4. Laju Pertumbuhan Lalu Lintas

Salah satu faktor yang memengaruhi pertumbuhan lalu lintas di suatu wilayah adalah laju pertumbuhan lalu lintas. Faktor-faktor ini termasuk peningkatan kesejahteraan masyarakat, peningkatan kemampuan untuk membeli kendaraan, dan perkembangan daerah. Untuk menghitung laju pertumbuhan lalu lintas, Anda dapat menggunakan data seperti volume lalu lintas harian, total pendapatan per golongan, atau total pendapatan per golongan per tahun.

Tabel 6. Pertumbuhan Lalu Lintas

| Tahun       | Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (%) |
|-------------|----------------------------------|
| 2022 - 2023 | 5,75                             |
| 2023 - 2024 | 13,07                            |
| 2024 - 2025 | 9,61                             |
| 2025 - 2026 | 11,92                            |
| 2026 - 2027 | 6,01                             |
| 2027 - 2028 | 6,01                             |
| 2028 - 2029 | 6,02                             |
| 2029 - 2030 | 6,01                             |
| 2030 - 2039 | 4,22                             |
| 2039 - 2048 | 4,22                             |
| 2048 - 2057 | 4,22                             |
| 2057 - 2066 | 2,42                             |

Sumber : Jasamarga Tol, 2024

Tabel 6 menunjukkan perkiraan pertumbuhan lalu lintas yang didasarkan pada data yang diperkirakan akan meningkat dari saat tol dibuka pada tahun 2021 hingga saat ini. Namun, pertumbuhan diperkirakan akan berlanjut pada tahun-tahun berikutnya dengan tingkat pertumbuhan yang lebih rendah dari tahun sebelumnya. Hal ini terkait dengan batasan kapasitas jalan tol untuk kendaraan. Saat kapasitas jalan mendekati batasnya, jalan menjadi sulit untuk menampung lebih banyak kendaraan yang melewatinya.



### 3.3. Pengolahan Data

Mengolah data mentah menjadi informasi yang dapat digunakan adalah proses yang dikenal sebagai pengolahan data. Analisis jumlah antrian kendaraan, analisis kelayakan implementasi Multi Lane Free Flow (MLFF), dan analisis kelayakan finansial dari e-Toll dan *Multi Lane Free Flow* (MLFF) semuanya diproses dalam penelitian ini.

#### 3.3.1. Analisis Antrian Kendaraan

Analisis menunjukkan bahwa sistem terbuka (Open System) adalah sistem antrian yang saat ini digunakan di ruas Kayuagung-Palembang. Gerbang Tol Keramasan, yang merupakan gerbang tol permanen, saat ini beroperasi. Ini terdiri dari dua GTO Multi di jalur Ambon (A)/Keluar dan jalur Bandung (B)/Masuk Ruas Tol Kayu Agung-Palembang.

1. Tingkat kedatangan kendaraan di Gerbang Tol Kayuagung – Palembang dihitung dengan menggunakan formula :

$$\lambda = \frac{\sum n}{t}$$

$$\lambda = \frac{39,357}{60}$$

$$\lambda = 655,950 \text{ kendaraan / jam}$$

Dimana :

$\lambda$  = tingkat kedatangan kendaraan

t = total waktu operasional

n = panjang kedatangan kendaraan

Berdasarkan hasil perhitungan diatas didapatkan hasil tingkat kedatangan kendaraan sebesar 655,950.

2. Tingkat pelayanan kendaraan di gerbang tol Kayuagung – Palembang dihitung dengan menggunakan formula :

$$\frac{1}{\mu} = \bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$\frac{1}{\mu} = 8,381 \text{ detik/kendaraan}$$

$$\mu = \frac{1 \times 3600}{8,381}$$

$$\mu = 429,543 \text{ kendaraan/jam}$$

3. Analisis kapasitas gerbang digunakan untuk mengontrol arus pergerakan dan waktu

pelayanan. Untuk menghitung jumlah gardu tol yang diperlukan untuk optimalisasi kinerja gerbang tol kayuagung-palembang, formula berikut digunakan:

$$\rho = \frac{\lambda}{s \cdot \mu} < 1$$

1. Jika gardu yang dibuka 1 ( $s = 1$ ), maka :

$$\rho = \frac{655,950}{1 \times 429,543} = 1,5271$$

(Karena  $> 1$ , maka antrian tidak terkendali)

2. Jika gardu yang dibuka 2 ( $s = 2$ ), maka :

$$\rho = \frac{655,950}{2 \times 429,543} = 0,7635$$

(Karena  $< 1$ , maka antrian terkendali)

Rumus di atas menunjukkan bahwa antrian kendaraan tidak terkendali jika nilainya lebih besar dari 1, dan antrian kendaraan dapat terkendali jika nilainya lebih kecil dari 1. Perhitungan tingkat utilitas pelayanan selama weekend menghasilkan jumlah gardu minimum sebesar 2, dan jika jumlah gardu yang dibuka lebih kecil dari 2, maka antrian tidak terkendali.

Tabel 7. Hasil Analisis Jumlah Antrian

| No | Model Antrian Jalur Ganda                          | Persamaan   | Hasil Analisis                               |
|----|--|---|--|
| 1  | Faktor Utilitas ( $\rho$ )                         | $\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$                                       | $\rho = 0,7635$                              |
| 2  | Jumlah rata-rata pelanggan dalam antrian ( $L_q$ ) | $L_q = \frac{P_1 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s}{s! (1 - P)^2}$ | $L_q = 4,4243 \approx 5$                     |
| 3  | Jumlah rata-rata pelanggan dalam sistem ( $L_s$ )  | $L_s = L_q + \frac{\lambda}{N\mu}$                                  | $L_s = 6,5271 \approx 7$                     |
| 4  | Rata-rata waktu menunggu dalam antrian ( $W_q$ )   | $W_q = \frac{L_q}{\mu}$   | $W_q = 0,0116 \approx 41,905 \text{ detik}$  |
| 5  | Rata-rata waktu menunggu dalam sistem ( $W_s$ )    | $W_s = W_q + \frac{1}{\mu}$   | $W_s = 0,0140 \approx 50,2860 \text{ detik}$ |

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Dengan waktu menunggu 41,905 detik dan waktu sistem 50,2860 detik, faktor utilitas sebesar 0,7635 didapat untuk jumlah pelanggan rata-rata sebanyak 5 kendaraan dalam antrian dan 7 kendaraan dalam sistem, masing-masing. Jika dibandingkan dengan tingkat kesibukan sistem dan antrian, dan waktu yang dihabiskan oleh masing-masing

kendaraan dalam antrian, hasil perhitungan kinerja antrian dapat dilihat pada tabel 7.

### 3.3.2. Analisis Kelayakan Implementasi MLFF

Analisis kelayakan Ini dilakukan untuk menilai sistem pengelolaan jalan yang menggunakan kartu e-Toll dengan sistem Multi Lane Free Flow (MLFF), dimana yang dianalisis adalah aspek keuangan yang berkaitan dengan sistem Multi Lane Free Flow (MLFF). pada pintu keluar dan masuk pada gerbang tol Keramasan - Kayuagung apabila ditinjau dari segi analisis finansial BUJT dan dilihat dari prediksi kondisi lalu lintas dengan menghitung sistem antrian, tingkat pelayanan dan kapasitas gerbang tol untuk mengetahui kondisi lalu lintas dan mengetahui prediksi rencana waktu mulai implementasi dari sistem transaksi *Multi Lane Free Flow* (MLFF) di gerbang tol Keramasan - Kayuagung.

Analisis prediksi kondisi lalu lintas, diambil dari data pada tahun 2021 yang merupakan tahun pertama gerbang tol dibuka untuk mengetahui implementasi MLFF, ditinjau dari waktu pelayanan yang diambil dari Standar Pelayanan Minimal (SPM) Jalan Tol. Untuk mengetahui kapasitas gerbang tol dilakukan pencarian data dengan menentukan kapasitas gerbang tol dengan data aktual memiliki jumlah lajur 2 dengan volume kapasitas gerbang sebesar 1.050 kendaraan/jam dan hasil dari data perhitungan time series dengan metode peramalan yang mendekati volume aktual kapasitas gerbang yaitu dengan volume kendaraan antara 1049 kendaraan/jam didapatkan tahun implementasi diprediksi pada tahun 2043.

### 3.3.3. Analisis Kelayakan Finansial e-Toll dan MLFF

#### 3.3.3.1. Asumsi Finansial

Dalam melakukan estimasi arus kas masa depan, *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) digunakan sebagai tingkat acuan tingkat diskonto. Pendekatan ini dilakukan untuk memperoleh estimasi paling akurat terhadap kombinasi risiko investasi, biaya modal dan biaya utang yang digunakan untuk membiayai proses pembangunan.

**Tabel 8.** Penghitungan WACC

| Input                    | Nilai    | Sumber Input                                 |
|--------------------------|----------|--|
| Beta Unlevered           | 0,189113 | WSKT - JKSE Sensitivity                      |
| Rate Aset Bebas Risiko   | 6,88%    | Yield Obligasi Pemerintah Indonesia 10 Tahun |
| Premi Risiko Modal       | 6,87%    | Indonesia - Damodaran                        |
| Premi Risiko Negara      | 2,54%    | Indonesia - Damodaran                        |
| Premi Risiko Aset Privat | 2,00%    |  |
| Biaya Modal              | 10,71%   | CAPM Calculation                             |
| % Utang Terhadap Aset    | 83%      |  |
| % Modal Terhadap Aset    | 17%      |  |
| Biaya Utang              | 6,45%    |  |
| Tingkat Pajak            | 22%      |  |
| WACC                     | 5,99%    |  |

Sumber: Laporan Tahunan WST, 2024

Premi risiko aset modal dan Premi risiko negara digunakan dalam penyusunan WACC sebagai proksi risiko dari masing-masing faktor. Ini diharapkan dapat memberikan estimasi yang lebih akurat dibanding model CAPM konvensional yang hanya melibatkan risk premium. Beta dikalkulasi dengan menggunakan estimasi pada sensitivitas pergerakan harga saham perusahaan induk PT Waskita Karya (WSKT) terhadap IHSG (Tabel 3.8). Hasilnya, diperoleh biaya modal sebesar 10,71% dan WACC sebesar 5,99%. Asumsi finansial lain yang digunakan adalah sebagai berikut:

**Tabel 9.** Asumsi Finansial

| Variabel          | Satuan  | Nilai   |
|-------------------|---------|---------|
| Tingkat Diskonto  | %       | 5,99    |
| Tarif Awal:       |         |         |
| Gol 1             | Rp      | 50.000  |
| Gol 2             | Rp      | 75.000  |
| Gol 3             | Rp      | 75.000  |
| Gol 4             | Rp      | 100.000 |
| Gol 5             | Rp      | 100.000 |
| Masa Konsesi      | Tahun   | 50      |
| Penyesuaian Tarif | %/Tahun | 3,5     |
| Tingkat Pajak     | %       | 22      |

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Penyesuaian tarif Toll dilakukan setiap tahun dengan mengestimasi tingkat inflasi konstan per tahun sebesar 3,5% untuk menangkap efek perubahan tarif secara lebih akurat. Tingkat pajak diperoleh dari ketentuan pemerintah terkait penetapan PPh badan sebesar 22% dalam UU No.7 Tahun 2021 tentang harmonisasi peraturan perpajakan (Tabel 9).

### 3.3.3.2. Analisis Biaya

Dalam melakukan proyeksi biaya, digunakan laba rugi secara umum untuk mengestimasi besaran masing-masing bobot biaya terhadap penerimaan trafik. Pendekatan ini digunakan terhadap biaya-biaya yang terikat dengan perubahan nilai pendapatan trafik. Sementara itu, biaya yang tidak memiliki hubungan sensitif terhadap perubahan nilai pendapatan diproyeksikan dengan metode *linear forecast*.

**Tabel 10.** Laba Rugi Secara Umum

| Biaya                       | Satuan | Proporsi |
|-----------------------------|--------|----------|
| Biaya Operasional Tol       | %      | 20.35    |
| Biaya Umum dan Administrasi | %      | 11.72    |
| Provisi Pemeliharaan        | %      | 16.79    |
| Beban Depresiasi Aset Tetap | %      | 0.86     |

Biaya amortisasi dikalkulasi dengan metode garis lurus mengikuti masa konsesi selama 60 tahun, dengan besaran konstan Rp 414,782 juta per tahun hingga tahun 2066. Metode amortisasi garis lurus dipilih untuk mempermudah proses analisis karena tidak mempengaruhi arus kas perusahaan.

### 3.3.3.2. Analisis Pendapatan

Pendapatan trafik sebagai sumber pendapatan utama proek jalan toll diproyeksi menggunakan pertumbuhan volume kendaraan. Alih-alih membuat proyeksi nilai pendapatan secara langsung, metode ini dipilih karena memungkinkan hasil estimasi yang lebih akurat seiring dengan munculnya efek seasonal yang mungkin terjadi pada volume lalu lintas sehingga dapat meminimalisir terjadinya bias dalam estimasi akibat asumsi yang terlalu optimis.

$$Pendapatan\ Trafik = \sum_{Golongan\ i} Volume\ Kendaraan\ Golongan\ i \times Tarif$$

Hasil proyeksi menunjukkan tren pertumbuhan yang konstan dan cukup stabil hingga masa konsesi berakhir dengan rata-rata pertumbuhan tahunan (CAGR) 5%. Selanjutnya dilakukan penghitungan nilai laba bersih dengan aturan berikut :

$$Laba\ bersih = Pendapatan - Beban\ Operasional \pm Pendapatan\ (Beban\ Lain-lain) - Pajak\ Badan\ (22\%).$$

### 3.3.3.3. Analisis Skenario 1

Analisis lebih lanjut diperlukan untuk memperoleh hasil estimasi arus kas yang paling akurat pada skenario normal, saat perusahaan menggunakan infrastruktur pembayaran toll konvensional. Oleh karena itu, digunakan model Discounted Cash Flow (DCF) sebagai alat valuasi nilai proyek serta sebagai bahan perhitungan arus kas masa depan. Berikut alur perhitungan yang dilakukan selama membangun model DCF.

$$Arus\ Kas\ Bersih = Pendapatan\ Operasional - Pajak\ (20\%) + Depresiasi + Amortisasi - Pengeluaran\ Modal - Kenaikan\ (Penurunan)\ NWC.$$

Setelah arus kas bersih diperoleh, masing-masing arus kas didiskon menggunakan tingkat diskonto sebesar 5.99% untuk memperoleh hasil komparasi yang sepadan berdasarkan nilai mata uang terhadap waktu. Berikut proses perhitungan faktor diskonto dengan menggunakan WACC.

$$Discount\ Factor = \frac{1}{(1+r)^n}$$

Di mana:

$r \rightarrow$  tingkat diskonto

$n \rightarrow$  tahun/periode diskon

Terakhir, dilakukan perkalian terhadap faktor diskon dengan arus kas bersih tahun  $n$  untuk memperoleh nilai arus kas yang telah terdiskon. Setelah nilai arus kas dari setiap periode setara, NPV dari nilai keseluruhan proyek dapat dijumlahkan.

Hasil akumulasi Net Present Value (NPV) sebesar Rp 5.731 triliun dari proyek jalan toll dengan skenario infrastruktur pembayaran E-Toll konvensional. Nilai NPV positif menjadi salah satu indikator yang menunjukkan kelayakan investasi toll untuk selanjutnya dapat dieksekusi.

Grafik arus kas menunjukkan tren pertumbuhan positif pada proyek yang dimulai sejak tahun 2026, saat arus kas proyek mulai stabil. Arus kas negatif pada periode awal merepresentasikan pengeluaran besar yang dilakukan pada fase konstruksi proyek. Sementara itu, arus kas (tidak terdiskon) mengalami pertumbuhan yang jauh lebih cepat dibanding arus kas terdiskon mengikuti proyeksi pertumbuhan pendapatan operasional jalan toll. Analisis lebih dalam



juga dilakukan untuk menghasilkan tingkat keyakinan yang lebih tinggi dalam penilaian kelayakan proyek.

Tabel berikut memuat rangkuman indikator lainnya termasuk IRR dan estimasi payback period :

**Tabel 11.** Indikator Finansial E-Toll

| Indikator                     | Satuan | Nilai     |
|-------------------------------|--------|-----------|
| Akumulasi NPV                 | Rp     | 5,731,892 |
| Internal Rate of Return (IRR) | %      | 9,05      |
| Payback Period                | Tahun  | 33        |

Hasil IRR yang lebih besar dibanding tingkat diskonto sebesar 5,99% menunjukkan kelayakan finansial bagi proyek jalan toll. Hal ini berarti tingkat pengembalian yang diperoleh dari arus kas proyek lebih besar dibanding tingkat penerimaan minimum yang disyaratkan untuk dapat memenuhi biaya utang dan biaya modal.

### 3.3.3.4. Analisis Skenario 2

Skenario berbeda diterapkan pada analisis selanjutnya, hal ini dilakukan untuk memperoleh gambaran terhadap hasil berbeda yang mungkin diperoleh pada saat infrastruktur *Muli Lane Free Flow* (MLFF) diterapkan. Dalam analisis ini, asumsi yang sama pada tingkat diskonto, proporsi biaya dalam proyeksi beban operasional, volume kendaraan, serta asumsi finansial lainnya masih digunakan. Tabel berikut memperlihatkan perbedaan hasil arus kas yang diperoleh akibat perubahan pada beban administrasi dan beban operasional jalan toll pada saat infrastruktur MLFF diimplementasikan sejak tahun 2025 hingga masa konsesi proyek berakhir pada tahun 2066.

Akumulasi NPV selanjutnya dihitung setelah arus kas tahunan didiskon terhadap WACC. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan akumulasi Net Present Value (NPV) sebesar Rp 7.281 triliun dari proyek jalan toll dengan skenario infrastruktur pembayaran *Multi Lane Free Flow* (MLFF). Nilai NPV positif menjadi salah satu indikator yang menunjukkan kelayakan investasi toll untuk selanjutnya dapat dieksekusi.

Hasil serupa juga ditunjukkan oleh skenario MLFF dalam kemampuannya menghasilkan arus kas masa depan bagi proyek jalan toll. Sebagai bahan

pertimbangan tambahan, indikator lain turut dikalkulasi dalam valuasi skenario MLFF. Tabel berikut menunjukkan rangkuman indikator penilaian kelayakan finansial lainnya.

**Tabel 12.** Indikator Finansial MLFF

| Indikator                     | Satuan | Nilai     |
|-------------------------------|--------|-----------|
| Akumulasi NPV                 | Rp     | 7.281.015 |
| Internal Rate of Return (IRR) | %      | 9,47      |
| Payback Period                | Tahun  | 32        |

Hasil yang lebih baik ditunjukkan dalam skenario penerapan MLFF. Hal ini menunjukkan kelayakan finansial dalam penerapan infrastruktur MLFF pada proyek jalan toll. Berikut rangkuman hasil yang menunjukkan keunggulan pengimplementasian infrastruktur MLFF.

**Tabel 13.** Perubahan Indikator Finansial Infrastruktur MLFF

| Indikator                     | Satuan   | Perubahan     |
|-------------------------------|----------|---------------|
| Akumulasi NPV                 | Rp       | 1.549.123     |
| Internal Rate of Return (IRR) | %        | 0,42          |
| Payback Period                | Tahun    | 1 Lebih Cepat |
| Investasi Proyek MLFF         | Rp       | 965.342       |
| BCR                           | x (kali) | 1,60          |

Berdasarkan tabel di atas, diketahui performa infrastruktur MLFF dalam mempersingkat jangka waktu pengembalian nilai investasi awal proyek (Payback Period) selama 1 tahun, peningkatan pada NPV sebesar Rp 1.549 triliun, peningkatan IRR sebesar 0,42% dan Benefit to Cost Rasio sebesar 1,60x, diukur melalui komparasi antara nilai investasi infrastruktur MLFF dan selisih kenaikan/penurunan nilai NPV yang dihasilkan.

Mengacu pada indikator-indikator di atas, proyek jalan toll Palembang – Kayuagung diproyeksikan mampu menghasilkan performa finansial yang cukup baik dengan tingkat pengembalian sebesar 9,05% pada kondisi normal (skema pembayaran menggunakan E-Toll) disertai dengan estimasi *discounted payback period* selama 33 tahun berdasarkan tingkat diskonto sebesar 5,99%. Lebih lanjut, pengimplementasian proyek infrastruktur multi lane free flow (MLFF) mampu menjanjikan peluang yang lebih baik bagi proyek untuk dapat menghasilkan nilai arus kas masa depan dalam jumlah lebih besar,

tingkat pengembalian (IRR) lebih tinggi sebesar 9,47% dan jangka waktu payback period yang lebih cepat 1 tahun dibandingkan dengan skema awal yakni 32 tahun.

3.4. Analisis Perbandingan E-Toll dan MLFF

Dari hasil analisis dan data yang sudah didapatkan Perbandingan antara sistem E-Toll dan Multi-Lane Free Flow (MLFF) menunjukkan bahwa meskipun keduanya bertujuan untuk memudahkan pembayaran tol, MLFF lebih unggul dalam hal kelancaran lalu lintas dan kenyamanan pengemudi karena memungkinkan kendaraan melaju tanpa harus berhenti. E-Toll, meskipun lebih sederhana dan terjangkau dalam hal implementasi, masih mengharuskan pengemudi untuk berhenti di gerbang tol. Meskipun demikian, MLFF memerlukan investasi teknologi yang lebih tinggi dan pemeliharaan yang lebih kompleks. Pemilihan antara keduanya bergantung pada prioritas yang diinginkan, baik dari segi efisiensi lalu lintas maupun biaya investasi dan pemeliharaan.

Tabel 14. Perbandingan E-Toll dan MLFF

| No | Kriteria                                | E-Toll  | MLFF  |
|----|---|---|---|
| 1  | Teknologi                               | Kartu Elektronik  | -   |
| 2  | Akurasi                                 | -Tingkat Kemampuan Tinggi<br>- Performances terkadang terganggu mesin tidak dapat mendeteksi kartu elektronik | -Tingkat Kemampuan Tinggi<br>-Teknologi dapat menyediakan data lokasi secara <i>real time</i> |
| 3  | Perangkat Komunikasi                    | Mesin GTO dan Kartu elektronik  | Menggunakan OBU dan e-OBUs  |
| 4  | Peralatan Pendukung                     | -   | Aplikasi di Smartphone bernama “CANTAS”   |
| 5  | Kecepatan Kendaraan                     | Kendaraan harus berhenti ketika melakukan transaksi pembayaran tol  | Kendaraan dapat melakukan transaksi dengan kecepatan berapapun                                |
| 6  | Intensitas Gerbang                      | Dapat digunakan di beberapa lajur   | Dapat digunakan di beberapa lajur   |
| 7  | Waktu Pelayanan                         | 25,142 detik  | 0 detik   |
| 8  | Rata-Rata Kendaraan Dalam Sistem        | 9 Kendaraan   | -   |
| 9  | Rata-Rata Kendaraan Dalam Antrian       | 5 Kendaraan   | -   |
| 10 | Waktu Rata-Rata Kendaraan Dalam Sistem  | 150,85 detik  | -   |
| 11 | Waktu Rata-Rata Kendaraan Dalam Antrian | 125,71 detik  | -   |
| 12 | Faktor Utilitas                         | 0,9162  | -   |

Sumber : Hasil Analisis, 2024

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data dalam penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Kondisi eksisting  
Jumlah kendaraan keluar dan masuk yang diperoleh dari data sekunder dapat dilihat dari setiap golongan, misalnya dilihat pada tahun 2023 golongan 1 sebesar 133.261 kendaraan, golongan 2 sebesar 26.473 kendaraan dan golongan 3 sebesar 5.755 kendaraan, golongan 4 sebesar 418 kendaraan dan golongan 5 sebesar 1.149 kendaraan. Kendaraan golongan I merupakan kendaraan yang sering melintas di gerbang tol, dengan jumlah kendaraan tertinggi di setiap bulannya. Kendaraan yang melintasi gerbang tol terjadi kenaikan dan penurunan di tahun 2023, peningkatan jumlah kendaraan di gerbang tol yang terjadi dalam setiap bulan tidak melebihi dari jumlah kendaraan golongan 1 sama halnya dengan jumlah kendaraan yang keluar. Berdasarkan hasil survei pengamatan langsung ke lokasi penelitian didapatkan waktu pelayanan rata-rata yang dibutuhkan oleh kendaraan untuk dilayani oleh sistem pelayanan sebesar 8,381 detik/kendaraan, dengan panjang antrian rata-rata kendaraan yang menunggu untuk dilayani sebesar 5-7 kendaraan dan waktu rata-rata pelayanan sebanyak 429,543 kendaraan/jam. Hasil perhitungan tingkat utilitas pelayanan pada kondisi lalu lintas, dihasilkan jumlah gardu yang dibutuhkan sebesar 2, jika jumlah gardu yang dibuka lebih kecil dari 2, maka antrian terjadi tidak terkendali.
- Mengacu pada indikator finansial, proyek jalan tol Kayuagung-Palembang diproyeksikan dapat menghasilkan kinerja keuangan yang cukup baik dengan tingkat pengembalian sebesar 9,05% dalam kondisi normal (skema pembayaran menggunakan e-Toll) disertai dengan estimasi periode pengembalian yang didiskontokan selama 33 tahun berdasarkan tingkat diskonto sebesar 5,99%. Selain itu, pelaksanaan proyek infrastruktur multi lane free flow (MLFF) menjanjikan

- peluang yang lebih baik bagi proyek untuk menghasilkan nilai arus kas masa depan yang lebih besar, tingkat pengembalian yang lebih tinggi (IRR) sebesar 9,47% dan periode pengembalian yang lebih cepat selama 1 tahun dibandingkan dengan skema awal selama 32 tahun.
3. Hasil wawancara dari *Expert Judgement* untuk implementasi MLFF bila dilihat dari hasil persentase rata-rata sebesar 50-59% dengan skala kelayakan dari berbagai aspek penilaian dari masing-masing narasumber yang telah memahami dan mengerti dengan objek yang ada di lingkungan proyek. Waktu Implementasi MLFF diperkirakan berkisar pada tahun 2034 dengan syarat standar kelayakan pelayanan telah tercapai. Jika dilihat dari hasil analisis rencana waktu implementasi sistem transaksi MLFF pada gerbang tol keramasan-kayuagung, waktu dan pengoperasian didapatkan pada tahun 2043 dengan volume 1.048,65 kendaraan/jam dengan kapasitas gerbang sebesar 1.050 kendaraan/jam yang bisa dipenuhi, dengan pemenuhan Standar Pelayanan Minimal (SPM). Parameter dari standar pelayanan minimal (SPM) adalah pengumpulan tol berupa waktu transaksi, jika belum terpasang MLFF maka waktu transaksi pada SPM harus terpenuhi. Jika tidak terpenuhi maka sistemnya dianggap tidak *realibility* dan sebaliknya jika sistem MLFF sudah terpasang maka nanti akan ada *Key Performance Indicators* (KPI) tersendiri yang fokus pada reliabilitas sistem, misal keberadaan sistem (*availability*) dan % capturing kendaraan.
  2. Pada kelayakan finansial tidak bisa memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perbaikan kelayakan finansial, dalam penelitian ini porsi antara IRR e-Toll dan MLFF selisih sebesar 0,42% dengan jangka waktu pengembalian investasi yang cukup jauh dari awal investasi. Pada penelitian berikutnya, dapat diusulkan dan dikembangkan melalui skema lain.
  3. Mengingat proyek studi kasus masih dalam tahap pemeliharaan dan perbaikan jalan sehingga asumsi volume lalu lintas aktual yang diterapkan pada gerbang tol keramasan yaitu konservatif rendah. Maka untuk meningkatkan perkiraan kelayakan finansial dan implementasi MLFF, memerlukan besarnya volume lalu lintas kendaraan yang melalui jalan tol. Sehingga mendapatkan hasil yang optimal. Penelitian selanjutnya harus di tinjau dan di prediksi dari semua tol yang beroperasi penuh.
  4. Penelitian dalam tesis ini bersifat deterministik. Analisis kelayakan finansial bersifat stokastik, dapat diusulkan dalam penelitian berikutnya.

## REFERENSI

Meskipun penelitian telah mencapai tujuannya, masih ada beberapa keterbatasan yang tidak dapat dihindari. Berdasarkan hasil kesimpulan diatas, diusulkan saran sebagai berikut :

1. Perbaikan untuk kondisi lalu lintas untuk lebih optimasi dapat diusulkan untuk observasi pada gerbang tol lainnya khususnya gerbang tol trans sumatera, karena pada jalan tol Kayuagung-palembang masih minim untuk lalu lintas pengguna jalan sehingga belum didapatkan hasil yang signifikan.
- Aleatica Labs. 2018. *Multi-Lane Free-Flow tolling system (MLFF)*. Madrid.
- Asif, M. 2020. "The dedicated short range communication (DSRC) system". Diakses pada 6 februari 2025 dari [https://www.researchgate.net/figure/The-dedicated-short-range-communication-DSRC-system-overview-with-road-side-equipment\\_fig1\\_343094326](https://www.researchgate.net/figure/The-dedicated-short-range-communication-DSRC-system-overview-with-road-side-equipment_fig1_343094326).
- Aminah, S. 2018. Transportasi Publik dan Aksesibilitas Masyarakat Perkotaan. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 1142-1155.
- Anthara, M. A. 2014. *Analisis sistem antrian gerbang tol pasteur bandung di pt jasa marga (persero) tbk*. Majalah Ilmiah UNIKOM, 12(1).
- Blank, L. T., & Tarquin, A., 2012. *Engineering Economy 7th Edition*. Newyork: McGraw-Hill, Inc.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2007. *Kementerian Pekerjaan Umum No 370/KPTS/M/2007 tentang Penggolongan Kendaraan pada Jalan Tol, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta*.

- Budiharjo, A. and Margarani, S. R. (2019) 'Kajian Penerapan Multi Lane Fee Flow (MLFF) Di Jalan Tol Indonesia', *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan (Indonesian Journal of Road Safety)*, 6(2), pp. 1–14. doi:10.46447/ktj.v6i2.27.
- Commission, European. 2016. Technology Options and Interoperability for Urban Vehicle Access Regulation (UVAR) Schemes. Eropa.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. 2009. Geometri Jalan Bebas Hambatan Untuk Jalan Tol No.007/BM/2009. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Dimiyati, T. T., & Dimiyati, A. (2011). *Operations Research (Edisi 3)*. Sinar Baru Algesindo.
- Eridani, D., Yuli C. dan Imam Santoso. 2011. *Simulasi Gerbang Tol Menggunakan RFID (Radio Frequency Identification)*. Semarang : TRANSMISI 13 (2).
- Huang, Y., Zhang, X., & Li, Y. (2018). *Smart transportation system and its impact on traffic flow optimization*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 91, 149-161.
- Heizer, Jay and Render, Barry. 2015. *Manajemen Operasi manajemen keberlangsungan dan rantai pasokan Edisi 11*. Jakarta : Salemba Empat.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. 2017. *Principles of Operations Management, Tenth Edition*. England : Pearson Education Limited.
- Ichsan, M. 1998. *Studi Kelayakan Proyek*. Universitas Brawijaya, Malang.
- Johan, Suwinto. 2011. *Studi Kelayakan Pengembangan Bisnis*. Yogyakarta : Graha Ilmu
- Julianto, Eko Nugroho. 2007. *Analisis Kinerja Simpang Bersinyal Simpang Bangkong dan Simpang Milo Semarang Berdasarkan Konsumsi Bahan Bakar Minyak*. Tesis Magister, Program Studi Teknik Sipil, Program Pasca Sarjana, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Rachadian, F, R., Agassi, E, A., Wahyudi, S. 2013. Analisis Kelayakan Investasi Penambahan Mesin Frais Baru Pada Cv. Xyz. *Journal J@TI Undip*, Vol.VIII, No.1.
- Republik Indonesia. 2005. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.15 Tahun 2005 tentang Jalan Tol. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2019. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 16/ PRT/ M/ 2017 tentang Transaksi Tol Nontunai di Jalan Tol*. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. 2014. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No. 16/PRT/M/2014 tentang Standar Pelayanan Minimum Jalan Tol. Jakarta: Menteri PUPR RI.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. 2020. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2020 Tentang Transaksi Tol Nontunai Nirsentuh di Jalan Tol. Jakarta. Menteri PUPR RI
- Krajewsky, L.J., Lerry, P.R., Manoj, K.M. *Operation Management Processes and Supply Chain*. Ninth Edit. New Jersey: Pearson Education, USA; 2010. 263p.
- Lalenoh, R. H., Sendow, T. K., & Jansen, F. (2015). Analisa Kapasitas Ruas Jalan Sam Ratulangi Dengan Metode MKJI 1997 Dan PKJI 2014. *Jurnal Sipil Statik*, 3(11).
- Mitasari, Windy & Aditya Iskandar, Doddy. 2020. Evaluation of economic feasibility of trans sumatera Toll road development (bakauheni – terbanggi besar) Through cost benefit analysis. *Jurnal Riset Pembangunan Volume 3* (1) 2020.
- Mulyani, S., Sukmariningsih, R. M., & Lestari, A. L. T. W. (2022). Konstruksi Pengaturan Hak Konsesi Dan E-Toll Dalam Perspektif Jaminan Fidusia Terhadap Pembangunan Jalan Tol. *JURNAL USM LAW REVIEW*, 5(1), 412-427.
- Morlok, E. K., & Hainim, J. K. 1985. *Pengantar Teknik Dan Perencanaan Transportasi*. Erlangga.
- Park, C.S., 2016 : *Contemporary Engineering Economics*. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

- Prayogi, G. 2021."Sistem pembayaran tol nirsentuh MLFF GNSS". Diakses pada 6 februari 2025 dari <https://kumparan.com/kumparanoto/be-dah-teknologi-tak-perlu-tapping-kartu-uang-elektronik-di-gerbang-tol-1wHG5Ya6g7O/full>.
- Salter, R. J. 1996. *Highway Traffic Analysis And Design*. Macmillan International Higher Education.
- Tamin, O. Z. 2000. *Perencanaan dan Pemodelan Transportasi, Edisi II*. Bandung : Penerbit ITB.