

Evaluasi Kinerja *Mobile Reader* dan *Single Lane Free Flow* pada Gerbang Tol JORR-S: Analisis Operasional, Kepuasan Pengguna, dan Biaya Kepemilikan Studi Kasus di Gerbang Tol Ampera 1 dan Cilandak Utama 2, Jakarta Selatan

Untung Joko Ristyono* , Nur Budi Mulyono

Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Email: 29124187@mahasiswa.itb.ac.id* , nurbudi@itb.ac.id

Keywords:

Single Lane Free Flow; Mobile Reader; M/M/c Queueing Model; Total Cost of Ownership; User Satisfaction.

Abstract

This study evaluates the effectiveness of the Mobile Reader (MR) system as a situational operational intervention and Single Lane Free Flow (SLFF) as an alternative to permanent non-stop transactions, compared to the existing E-Toll system as a baseline condition, operational effectiveness, user satisfaction, and cost efficiency. The method used is a quantitative-comparative case study with service time analysis, peak hour identification, M/M/c (Erlang C) queue model, Customer Satisfaction Level (CSL) analysis, and Total Cost of Ownership (TCO) analysis. Observations of 1,974 vehicle transactions at the Ampera 1 and Cilandak Utama 2 Toll Gates show that MR activated by officers when queues are long results in a service time of 12.72 seconds (5.6% slower than E-Toll 12.04 seconds at the same gate), while SLFF, which during the study period was only available at the Cilandak Utama 2 Toll Gate, recorded a service time of 3.80 seconds with a coefficient of variation of 7.8% (the most consistent). Based on verified data from PT Hutama Karya, SLFF is the system with the lowest annual cost of ownership (TCO of IDR 33.7 million per unit per year), while the high TCO of MR (IDR 384.2 million) reflects the cost structure of human resource-based preparedness for situational interventions and is not an indication of technological inadequacy. In the estimated configuration of the Ampera 1 toll gate, the combination of 2 E-Tolls and 1 SLFF reduces costs to IDR 56.37 per vehicle, providing an estimated savings of 64.4% compared to existing conditions with an estimated payback period (cash flow basis) of approximately 5.2 months. The study concluded that SLFF has the potential to be technically and financially superior as a permanent capacity solution, while MR remains relevant as a situational queue mitigation strategy, provided that the number of SLFF lanes is adjusted to the volume of each gate and the results of the parameter transfer simulation are further verified through direct observation.

Kata Kunci:

Single Lane Free Flow; Mobile Reader; Model Antrian M/M/c; Total Cost of Ownership; Kepuasan Pengguna.

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas sistem *Mobile Reader* (MR) sebagai intervensi operasional situasional dan *Single Lane Free Flow* (SLFF) sebagai alternatif transaksi nirhenti permanen, dibandingkan sistem E-Toll eksisting sebagai kondisi dasar, efektivitas operasional, kepuasan pengguna, dan efisiensi biaya. Metode yang digunakan adalah studi kasus kuantitatif-komparatif dengan analisis waktu pelayanan, identifikasi jam puncak, model antrian M/M/c (Erlang C), analisis *Customer Satisfaction Level* (CSL), dan analisis *Total Cost of Ownership* (TCO). Pengamatan terhadap 1.974 transaksi kendaraan di Gerbang Tol Ampera 1 dan Cilandak Utama 2 menunjukkan bahwa MR yang diaktifkan petugas saat antrian memanjang menghasilkan waktu pelayanan 12,72 detik (5,6% lebih lambat daripada E-Toll 12,04 detik pada gerbang yang sama), sedangkan SLFF, yang pada periode penelitian hanya tersedia di GT Cilandak Utama 2, mencatat waktu pelayanan 3,80 detik dengan koefisien

variasi 7,8% (paling konsisten). Berdasarkan data terverifikasi PT Utama Karya, SLFF merupakan sistem dengan biaya kepemilikan tahunan terendah (TCO Rp33,7 juta per unit per tahun), sedangkan tingginya TCO MR (Rp384,2 juta) mencerminkan struktur biaya kesiapsiagaan berbasis SDM untuk intervensi situasional dan bukan indikasi ketidaklayakan teknologi. Pada estimasi konfigurasi GT Ampere 1, kombinasi 2 E-Toll dan 1 SLFF menurunkan biaya menjadi Rp56,37 per kendaraan, memberikan estimasi penghematan 64,4% terhadap kondisi eksisting dengan estimasi masa pengembalian (basis arus kas) sekitar 5,2 bulan. Penelitian menyimpulkan bahwa SLFF berpotensi unggul secara teknis dan finansial sebagai solusi kapasitas permanen, sementara MR tetap relevan sebagai strategi mitigasi antrian situasional, dengan syarat jumlah lajur SLFF disesuaikan dengan volume tiap gerbang dan hasil simulasi transfer parameter diverifikasi lebih lanjut melalui observasi langsung.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan tol berperan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi nasional melalui peningkatan konektivitas, penurunan biaya logistik, dan efisiensi mobilitas. Di wilayah perkotaan, jalan tol bukan hanya infrastruktur transportasi, tetapi juga sistem kritis yang menentukan kinerja jaringan lalu lintas regional. Meningkatnya permintaan mobilitas di kawasan metropolitan menempatkan tekanan signifikan pada operasi gerbang tol, terutama pada koridor padat di mana permintaan kerap melebihi kapasitas layanan (Zhong & Ren, 2025; Pompigna & Mauro, 2021).

Jalan Tol Lingkar Luar Jakarta Seksi Selatan (JORR-S) merupakan salah satu segmen tol paling kritis di kawasan Jabodetabek, menghubungkan area permukiman, kawasan bisnis, dan zona industri. Jalan tol dengan volume harian di atas 100.000 kendaraan sangat rentan terhadap kemacetan pada titik transaksi apabila sistem layanan tidak dioptimalkan (Lima et al., 2019). Berdasarkan data operasional, JORR-S melayani 150.000–170.000 kendaraan per hari, sehingga gerbang tol berfungsi sebagai simpul kritis dalam aliran lalu lintas. Sistem transaksi konvensional seperti gardu manual dan E-Toll semakin tidak mampu mengakomodasi pertumbuhan tersebut; sumber utama hambatan bukan hanya keterbatasan infrastruktur, melainkan juga inefisiensi waktu pelayanan di gerbang tol (Vijay, 2018; Zahedieh & Lee, 2024).

Pada jam sibuk, panjang antrian di JORR-S kerap melampaui 25 menit dan melewati batas Standar Pelayanan Minimal (SPM) Jalan Tol Tahun 2014, yaitu maksimum 10 kendaraan per gardu dan waktu tunggu maksimum 5 menit. Keterbatasan ruang fisik untuk menambah gardu menjadikan solusi konvensional sulit diterapkan, sehingga diperlukan alternatif non-fisik berbasis inovasi teknologi. Selain itu, biaya operasional yang meningkat, meliputi tenaga kerja gardu, konsumsi listrik, dan pemeliharaan peralatan, menuntut pendekatan yang lebih efisien secara jangka panjang.

Untuk mengatasi persoalan ini, operator tol mulai memadukan teknologi transaksi permanen dengan strategi operasional situasional. Dua pendekatan yang relevan bagi JORR-S adalah *Mobile Reader* (MR) dan *Single Lane Free Flow* (SLFF). *Mobile Reader* merupakan perangkat transaksi portabel berbasis RFID yang dioperasikan petugas secara situasional sebagai intervensi tambahan ketika panjang antrian pada gardu tol telah melampaui ambang operasional tertentu; MR tidak dimaksudkan untuk menggantikan gardu E-Toll secara permanen, melainkan berfungsi memperluas titik pelayanan di dalam antrian pada periode kepadatan tinggi (Legros & Jouini, 2024; Efrosinin & Stepanova, 2021). Sebaliknya, SLFF

merupakan sistem nirhenti penuh yang memanfaatkan RFID dan Automatic Number Plate Recognition (ANPR) sehingga kendaraan dapat melintas tanpa berhenti, dan diposisikan sebagai alternatif peningkatan kapasitas permanen pada lajur tempatnya diterapkan. Sistem free-flow terbukti meningkatkan throughput dan mengurangi kemacetan dengan menghilangkan perilaku *stop-and-go* (Sumardi et al., 2024; Lueanpech et al., 2019; Colombo et al., 2026), sementara solusi berbasis perangkat mobile dipandang sebagai perbaikan jangka pendek yang praktis untuk meredakan antrian di negara berkembang, bukan sebagai sistem transaksi utama yang beroperasi terus-menerus (Kamiliah & Wijaya, 2023; Hussein, 2025).

Meskipun menjanjikan, ketiga sistem berada pada tingkat fungsi operasional yang berbeda: E-Toll berfungsi sebagai sistem transaksi utama dan permanen, MR sebagai intervensi situasional ketika antrian memanjang, dan SLFF sebagai sistem transaksi nirhenti dengan potensi menjadi solusi peningkatan kapasitas permanen. Ketiganya memiliki implikasi berbeda dari sisi efisiensi operasional, struktur biaya, penerimaan pengguna, dan kesiapan implementasi, sehingga perbandingan langsung pada dimensi yang identik perlu dilakukan secara hati-hati. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi komparatif yang memperhitungkan perbedaan fungsi tersebut untuk menentukan strategi paling efektif dan efisien bagi jalan tol berlalu lintas tinggi seperti JORR-S.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem E-Toll sebagai kondisi dasar, efektivitas MR sebagai intervensi penanganan antrian, serta potensi SLFF sebagai alternatif peningkatan kapasitas permanen, berdasarkan kinerja operasional, efisiensi biaya, dan kepuasan pengguna, sehingga menghasilkan bukti empiris yang mendukung pengambilan keputusan strategis dalam manajemen operasi jalan tol oleh PT Hutama Karya (Persero). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian merumuskan tiga pertanyaan: (1) bagaimana kinerja operasional MR sebagai intervensi situasional dan SLFF sebagai sistem nirhenti, ditinjau dari waktu pelayanan, kapasitas, dan stabilitas antrian, dibandingkan sistem E-Toll eksisting; (2) seberapa tinggi tingkat efisiensi biaya operasional masing-masing sistem berdasarkan pendekatan *Total Cost of Ownership* (TCO); dan (3) seberapa puas pengguna terhadap layanan MR dan SLFF dibandingkan sistem eksisting. Ketiga pertanyaan tersebut menjadi batas fokus penelitian dan menjadi dasar penyusunan kerangka analisis. Manfaat teoretis penelitian ini adalah memperkaya literatur tentang evaluasi kinerja sistem transaksi tol dengan pendekatan terintegrasi yang menggabungkan analisis operasional, kepuasan pengguna, dan biaya kepemilikan, sedangkan manfaat praktisnya adalah memberikan masukan bagi operator tol dalam memilih dan mengonfigurasi sistem transaksi yang paling efektif dan efisien. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi tiga dimensi evaluasi (operasional, kepuasan, dan biaya) dalam satu kerangka analisis, serta pada penggunaan data terverifikasi dari PT Hutama Karya untuk analisis TCO.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan desain studi kasus kuantitatif-komparatif. Pendekatan kuantitatif dipilih karena analisis bertumpu pada indikator terukur, yaitu waktu pelayanan, volume lalu lintas jam puncak, parameter antrian, *Customer Satisfaction Level*, dan *Total Cost of Ownership*. Pendekatan komparatif diterapkan karena penelitian membandingkan tiga sistem transaksi pada dimensi analisis yang sama, sedangkan pendekatan studi kasus sesuai karena evaluasi dilakukan pada konteks operasional nyata, yaitu gerbang tol terpilih pada

koridor JORR-S. Sistem E-Toll eksisting digunakan sebagai kondisi dasar (*baseline*), MR dievaluasi sebagai intervensi operasional situasional berbantuan petugas dan bukan sebagai sistem transaksi permanen, sedangkan SLFF dievaluasi sebagai sistem transaksi nirhenti dengan potensi menjadi solusi kapasitas permanen.

Lokasi, Objek, dan Pengumpulan Data

Penelitian dilakukan pada dua gerbang tol JORR-S, yaitu Gerbang Tol (GT) Ampera 1 dan GT Cilandak Utama 2, yang dipilih secara purposif (Etikan et al., 2016), mengingat pendekatan probabilitas seperti pengambilan sampel acak sederhana (Cochran, 1977) sulit diterapkan pada populasi transaksi kendaraan yang bergerak kontinu di lapangan karena merepresentasikan gerbang berintensitas lalu lintas tinggi dengan persoalan antrian dan relevansi implementasi MR maupun SLFF. GT Ampera 1 berfungsi sebagai on/off-ramp menuju permukiman Cilandak, Lebak Bulus, dan Pasar Minggu, sedangkan GT Cilandak Utama 2 merupakan gerbang barrier pada Tol Desari (Depok–Antasari) yang menghimpun seluruh lalu lintas dari arah Depok, Sawangan, dan Andara. Survei dilaksanakan pada Senin 18 Mei 2026, Selasa 19 Mei 2026, dan Sabtu 23 Mei 2026 untuk menangkap karakteristik lalu lintas hari kerja maupun akhir pekan. Data primer mencakup waktu pelayanan per kendaraan dan volume lalu lintas per interval lima menit, sementara data kuesioner kepuasan dikumpulkan secara langsung di lokasi. Data biaya diperoleh dari dokumen kontrak PT Utama Karya (Persero) dan estimasi standar industri. Perlu dicatat bahwa pada periode penelitian, lajur SLFF baru tersedia di GT Cilandak Utama 2 sebagai penerapan tahap awal, sedangkan GT Ampera 1 belum mengoperasikan SLFF; dengan demikian seluruh data observasi SLFF, termasuk 21 transaksi bersih pada Tabel 3, berasal dari GT Cilandak Utama 2. Skenario penerapan SLFF di GT Ampera 1 yang disajikan pada bagian hasil merupakan simulasi transfer parameter (parameter-transfer simulation) dan bukan hasil pengukuran langsung di lokasi tersebut.

Waktu pelayanan tiap kendaraan diuraikan menjadi tiga komponen: waktu pendekatan (T1), waktu transaksi (T2), dan waktu keberangkatan (T3), sehingga waktu pelayanan total mengikuti Persamaan (4).

$$T_{\text{total}} = T1 + T2 + T3 \quad (4)$$

Sebelum dianalisis, data dibersihkan dari pencilan (outlier) dengan metode Interquartile Range (IQR). Tingkat penghapusan outlier berkisar 3,5%–5,3% pada gardu konvensional dengan rata-rata 4,7%, sebuah proporsi yang tergolong wajar untuk data waktu pelayanan lapangan dan tidak mengindikasikan masalah pengukuran sistematis, meskipun proses pembersihan ini tetap berpotensi menghilangkan sebagian variasi ekstrem yang valid (misalnya akibat kendaraan bermasalah atau gangguan operasional). Ringkasan sampel waktu pelayanan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran sampel observasi dan hasil pembersihan outlier.

Gerbang / Metode	N Awal	N Bersih	Dibuang (%)
Ampera 1 – E-Toll	900	859	4,6
Ampera 1 – MR	250	238	4,8
Cilandak Utama 2 – E-Toll	700	663	5,3
Cilandak Utama 2 – MR	200	193	3,5
Cilandak Utama 2 – SLFF	21	21	0,0
Total	2.071	1.974	4,7

Sumber: Pengolahan data penulis, 2026.

Variabel dan Metode Analisis

Variabel penelitian dikelompokkan ke dalam tiga dimensi: efektivitas operasional (waktu pelayanan, volume, PHF, laju kedatangan, laju pelayanan, utilisasi, panjang antrian, waktu tunggu, throughput), kepuasan pengguna (kecepatan, antrian/tidak berhenti, keandalan, kenyamanan, kemudahan, kepuasan keseluruhan), dan efisiensi biaya (CAPEX, OPEX, biaya pemeliharaan, biaya SDM, TCO tahunan, biaya per kendaraan, payback). Identifikasi jam puncak menggunakan metode *rolling one-hour* dan *Peak Hour Factor* (PHF) (Federal Highway Administration, 2018) sesuai Persamaan (5), yang membandingkan volume jam puncak terhadap laju arus lima-menitan tertinggi.

$$PHF = VPH \div (12 \times V5, \text{maks}) \quad (5)$$

Kepuasan pengguna diukur melalui *Customer Satisfaction Level* (CSL) atas enam dimensi, mengadaptasi prinsip pengukuran kualitas layanan multi-dimensi (Parasuraman et al., 1988). Validitas instrumen diuji dengan korelasi Pearson dan reliabilitas dengan Cronbach's Alpha. Konsistensi waktu pelayanan dinilai dengan koefisien variasi ($CV = \text{simpangan baku} \div \text{rata-rata}$). CSL dihitung melalui Persamaan (6).

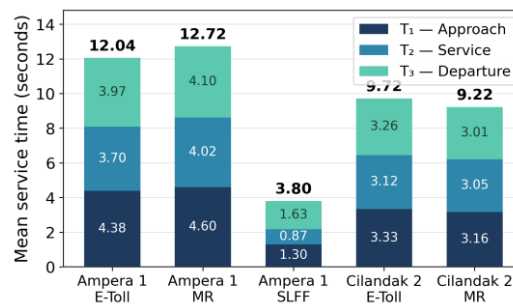
$$CSL = (\text{skor rata-rata} \div \text{skor maksimum}) \times 100\% \quad (6)$$

Efisiensi biaya dievaluasi dengan kerangka TCO. Depresiasi dihitung dengan metode garis lurus (nilai sisa 10% CAPEX), kemudian dijumlahkan dengan OPEX untuk memperoleh TCO per unit per tahun; TCO per kendaraan diperoleh dengan membagi TCO konfigurasi tahunan terhadap volume kendaraan tahunan. Untuk kelayakan investasi, masa pengembalian (*payback period*) dihitung pada basis arus kas (*cash-flow*), yaitu selisih OPEX tunai tahunan (bukan TCO yang memuat depresiasi non-kas) dibagi terhadap CAPEX bersih tambahan yang benar-benar dikeluarkan. Mengingat CAPEX Mobile Reader pada konfigurasi eksisting telah dibeli sebelum penelitian ini dilakukan, biaya tersebut diperlakukan sebagai sunk cost dan tidak diperhitungkan kembali dalam estimasi payback konversi ke SLFF.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komponen dan Total Waktu Pelayanan

Nilai rata-rata setiap komponen waktu pelayanan untuk lima skenario disajikan pada Gambar 1. Pada gardu konvensional, proporsi ketiga komponen relatif berimbang. Di GT Ampera 1, waktu transaksi (T2) sebesar 3,70 detik untuk E-Toll dan 4,02 detik untuk MR; MR justru sedikit lebih lama, konsisten dengan sifatnya sebagai intervensi situasional yang diaktifkan justru ketika antrian sudah terbentuk dan ruang gerak petugas terbatas, bukan karena keterbatasan teknologi RFID itu sendiri. Sebaliknya, pada skenario SLFF di GT Cilandak Utama 2 satu-satunya gerbang JORR-S yang telah mengoperasikan lajur nirhenti ini pada periode penelitian seluruh komponen jauh lebih kecil ($T1 = 1,30$; $T2 = 0,87$; $T3 = 1,63$ detik) sehingga waktu pelayanan total hanya 3,80 detik. Dibandingkan dengan E-Toll pada gerbang yang sama (9,72 detik), SLFF sekitar 2,6 kali lebih cepat; bila dibandingkan lintas-gerbang dengan E-Toll di GT Ampera 1 (12,04 detik), rasionya mencapai 3,2 kali, meskipun perbandingan lintas-gerbang tersebut perlu dimaknai hati-hati karena perbedaan volume dan geometri gerbang.



Gambar 1. Komposisi rata-rata waktu pelayanan per skenario.

Sumber: Pengolahan data penulis, 2026.

Statistik deskriptif waktu pelayanan total disajikan pada Tabel 4. Skenario SLFF tidak hanya memiliki rata-rata terendah, tetapi juga rentang yang sangat sempit (0,98 detik) dengan simpangan baku 0,30 detik, menandakan pelayanan yang cepat sekaligus seragam. Sebaliknya, gardu E-Toll dan MR di Ampera 1 memiliki nilai maksimum melampaui 22 detik, menimbulkan risiko pembentukan antrian yang lebih tinggi pada jam sibuk.

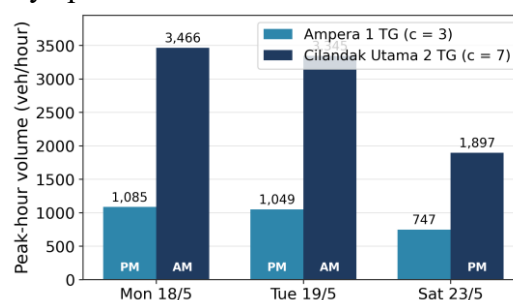
Tabel 2. Statistik deskriptif waktu pelayanan total (detik).

Statistik	A1 ET	A1 MR	CL2 ET	CL2 MR	CL2 SLFF
n	859	238	663	193	21
Rata-rata	12,04	12,72	9,72	9,22	3,80
Median	11,42	12,59	9,42	9,21	3,79
Simp. baku	3,65	3,67	1,79	1,49	0,30
Min	4,50	5,27	6,01	6,41	3,27
Maks	22,43	23,37	15,12	13,01	4,25
CV	0,303	0,289	0,184	0,161	0,078

Sumber: Pengolahan data penulis, 2026. ET = E-Toll.

Analisis Jam Puncak

Pola jam puncak kedua gerbang berbeda secara struktural. GT Ampera 1 memuncak pada sesi sore hari kerja, dengan volume 1.085 kendaraan/jam (Senin, 16:10–17:10) dan 1.049 kendaraan/jam (Selasa, 16:55–17:55); volume sore Senin mencapai 2,4 kali volume pagi pada hari yang sama, menegaskan dominasi arus balik pekerja. Sebaliknya, GT Cilandak Utama 2 memuncak pada sesi pagi hari kerja, dengan volume 3.466 kendaraan/jam (Senin, 07:15–08:15) dan 3.345 kendaraan/jam (Selasa, 07:10–08:10), setara sekitar satu kendaraan setiap 1,04 detik pada titik puncaknya. Perbandingan jam puncak kedua gerbang disajikan pada Gambar 3, dan rekapitulasinya pada Tabel 3.



Gambar 3. Perbandingan volume jam puncak GT Ampera 1 dan GT Cilandak Utama 2.

Sumber: Survei lapangan JORR-S, 2026 (AM = pagi, PM = sore).

Tabel 3. Matriks perbandingan jam puncak kedua gerbang.

Parameter	Ampera 1	Cilandak 2
Sesi puncak (hari kerja)	Sore	Pagi
Vol. puncak (kend/jam)	1.067	3.406
PHF jam puncak	0,763	0,895
Lajur aktif (c)	3	7
λ /lajur (kend/jam)	356	487
Rasio antar-gerbang	1	3,2

Sumber: Survei lapangan JORR-S, 2026.

Secara absolut, volume hari kerja Cilandak Utama 2 melampaui Ampera 1 dengan rasio sekitar 3,2:1. Namun, ketika dinormalisasi per lajur aktif, selisihnya menyempit menjadi 487 vs 356 kendaraan/jam per lajur, sehingga Cilandak memikul beban per lajur lebih berat meski memiliki lebih banyak gardu. PHF pagi Cilandak yang tinggi (0,882–0,908) menandakan arus komuter yang merata sepanjang jam puncak. Selisih volume jam puncak antarahari kerja tergolong kecil, yaitu 3,4% di Ampera 1 dan 3,5% di Cilandak Utama 2, sehingga data dinilai cukup konsisten untuk dijadikan basis analisis. Untuk analisis antrian, digunakan rata-rata volume jam puncak dua hari kerja (Senin dan Selasa) sebagai nilai λ representatif: $\lambda = 1.067$ kendaraan/jam (0,2964 kend/detik) untuk Ampera 1 dan $\lambda = 3.406$ kendaraan/jam (0,9460 kend/detik) untuk Cilandak Utama 2. Pemilihan rata-rata dua hari kerja bukan volume hari tunggal tertinggi maupun volume akhir pekan digunakan karena tingkat konsistensi antarahari kerja yang tinggi menjadikannya nilai representatif kondisi jam puncak hari kerja yang lebih stabil, sekaligus tetap konservatif karena mencerminkan kondisi beban tinggi dan bukan volume rata-rata harian keseluruhan.

Analisis Antrian Kondisi Eksisting

Analisis antrian M/M/c diterapkan untuk menguji apakah konfigurasi gardu eksisting mampu melayani lalu lintas jam puncak. Dua pendekatan diterapkan: model M/M/1 per lajur dan model agregat M/M/c per gerbang (Erlang C). Pada model per lajur, setiap gardu E-Toll di Ampera 1 menerima beban 355,67 kend/jam terhadap kapasitas $\mu = 298,92$ kend/jam, menghasilkan $\rho = 1,19$; sedangkan di Cilandak Utama 2, beban 486,57 kend/jam terhadap $\mu = 370,53$ kend/jam menghasilkan $\rho = 1,31$. Hasil model agregat per gerbang dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan indikator antrian kondisi eksisting (M/M/c, Erlang C).

Parameter	Ampera 1 (c=3)	Cilandak 2 (c=7)
λ (kend/jam)	1.067	3.406
μ_{avg} (kend/jam)	293,62	373,39
Intensitas a (Erlang)	3,634	9,122
Utilisasi ρ	1,211	1,303
Status	Jenuh	Jenuh
Lq, Wq, W	∞	∞

Sumber: Analisis penulis berdasarkan model M/M/c dan data lapangan, 2026.

Kedua gerbang berada dalam kondisi jenuh dengan utilisasi di atas 100%, yakni Ampera 1 dengan $\rho = 1,211$ dan Cilandak Utama 2 dengan $\rho = 1,303$, sehingga seluruh indikator antrian (Lq, Wq, W) menuju tak hingga. Pada kondisi ini, antrian tidak pernah mencapai keseimbangan

selama periode puncak dan terus bertambah setiap menit, konsisten dengan pengamatan lapangan berupa antrian panjang di kedua gerbang. Persoalan di kedua gerbang bersifat struktural, bukan sekadar operasional: menambah lajur E-Toll konvensional atau mengganti E-Toll dengan MR (yang memiliki μ hampir sama) tidak mengubah status stabilitas selama volume puncak melebihi total kapasitas. Solusi efektif memerlukan peningkatan laju pelayanan per lajur secara substansial, sebagaimana ditawarkan SLFF dengan $\mu = 946,78$ kendaraan/jam. Nilai μ_{SLFF} ini diperoleh dari observasi langsung di GT Cilandak Utama 2 dan digunakan sebagai parameter transfer pada simulasi skenario GT Ampera 1 yang disajikan pada bagian selanjutnya; dengan demikian, hasil simulasi tersebut perlu dibaca sebagai estimasi, bukan sebagai kondisi hasil implementasi aktual.

Analisis Kepuasan Pengguna

Kuesioner berhasil dikumpulkan dari 117 responden pengguna aktif gerbang JORR-S, melebihi sampel minimum 100 (formula Slovin, margin 10%). Seluruh responden (100%) pernah menggunakan sistem eksisting, 52 responden (44,4%) pernah menggunakan MR, dan 13 responden (11,1%) pernah menggunakan SLFF. Mayoritas responden berusia 36–45 tahun (34,2%) dan menggunakan jalan tol setiap hari (43,6%), sehingga memiliki pengalaman memadai untuk menilai sistem transaksi. Uji validitas Pearson menyatakan seluruh 18 butir valid ($r\text{-hitung} > r\text{-tabel}$), dan uji reliabilitas memperoleh Cronbach's Alpha sangat tinggi (Taherdoost, 2016), sebagaimana Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji reliabilitas (Cronbach's Alpha).

Instrumen	n	k	α	Status
Existing (E-Toll)	117	6	0,9138	Sangat reliabel
Mobile Reader	52	6	0,9319	Sangat reliabel
SLFF	13	6	0,9555	Sangat reliabel

Sumber: Perhitungan Cronbach's Alpha, 2026. Mengingat $n_{SLFF} = 13$, hasilnya bersifat eksploratif.

CSL per dimensi untuk ketiga sistem disajikan pada Gambar 4 dan dirinci pada Tabel 8. SLFF memperoleh CSL keseluruhan tertinggi (90,8%, kategori Sangat Puas), diikuti MR (80,9%) dan Existing (78,3%) yang keduanya berkategori Puas. Dimensi 'antrian/tidak berhenti' menunjukkan selisih terbesar antarsistem (+21,5 poin dari Existing ke SLFF), naik dari 70,8% (Existing) ke 79,2% (MR) lalu melonjak ke 92,3% (SLFF).

Tabel 6. Perbandingan CSL per dimensi antarsistem (%).

Dimensi	Exist.	MR	SLFF
Kecepatan transaksi	80,9	79,6	90,8
Antrian / tidak berhenti	70,8	79,2	92,3
Keandalan sistem	77,4	78,5	89,2
Kenyamanan	80,3	85,8	89,2
Kemudahan penggunaan	80,9	80,8	89,2
Kepuasan keseluruhan	79,5	81,5	90,8
CSL rata-rata	78,3	80,9	90,8

Sumber: Data kuesioner primer JORR-S, 2026.

Kenaikan yang non-linear pada dimensi antrian menunjukkan bahwa meski MR meringankan persoalan antrian, SLFF menghadirkan perubahan yang jauh lebih fundamental

dengan menghilangkan akar persoalan, yaitu keharusan berhenti dan menempelkan kartu. Uji t berpasangan pada 52 pengguna yang sama menunjukkan perbedaan kepuasan Existing vs MR tidak signifikan secara statistik ($t = 0,1355$; $p = 0,8928$), sehingga keunggulan MR dibandingkan kondisi eksisting lebih terasa pada dimensi kenyamanan (dimensi M4, CSL 85,8%) daripada pada dimensi lain. Analisis preferensi memperlihatkan pola yang tampak kontradiktif: meski SLFF meraih CSL tertinggi, hanya 18,8% responden memilihnya sebagai preferensi utama, sedangkan E-Toll dipilih 44,4%, sebuah pola yang mengindikasikan kemungkinan kecenderungan mempertahankan sistem yang telah dikenal (*status quo bias*), meskipun faktor lain seperti familiaritas, kepercayaan terhadap teknologi baru, dan kekhawatiran akan kegagalan sistem tidak dapat disingkirkan sebagai penjelasan tambahan berdasarkan data yang tersedia. Terdapat selisih dukungan 39,4 poin persentase antara pengguna yang pernah mencoba SLFF (84,6% mendukung perluasan) dan yang belum (45,2%), sebuah pola yang sejalan dengan argumentasi Technology Acceptance Model bahwa pengalaman langsung dan persepsi manfaat dapat berkaitan dengan peningkatan penerimaan teknologi.

Analisis Total Cost of Ownership

Seluruh parameter biaya yang digunakan dalam analisis ini telah dikonfirmasi secara langsung oleh PT Hutama Karya (Persero) melalui formulir permintaan data resmi, sehingga tidak lagi memerlukan pembedaan antara data terverifikasi dan estimasi. CAPEX per unit (termasuk instalasi) adalah Rp169 juta untuk E-Toll per gardu, Rp14 juta untuk MR per unit, dan Rp162,4 juta untuk SLFF per lajur. Temuan ini berbeda dari estimasi awal yang menempatkan SLFF sebagai sistem termahal; data terverifikasi menunjukkan bahwa pasar perangkat free flow telah cukup matang sehingga harga per lajur turun signifikan, bahkan sedikit lebih rendah daripada E-Toll. Rincian CAPEX disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Biaya investasi awal (CAPEX) ketiga sistem (termasuk instalasi).

Sistem	Satuan	CAPEX (Rp)
E-Toll (GTO)	per gardu	169,0 jt
Mobile Reader	per unit	14,0 jt
SLFF	per lajur	162,4 jt

Sumber: PT Hutama Karya (Persero), data terverifikasi 2026 (jt = juta rupiah).

Umur ekonomis ditetapkan secara konservatif oleh PT Hutama Karya, yaitu 5 tahun untuk E-Toll dan SLFF serta 3 tahun untuk Mobile Reader, dengan nilai sisa 10% CAPEX dan metode depresiasi garis lurus. Penetapan ini lebih pendek daripada asumsi standar industri internasional (10 sampai 15 tahun) dan mencerminkan kebijakan terhadap teknologi elektronik di lingkungan operasional Indonesia yang menghadapi depresiasi nilai aset lebih cepat. Konsekuensinya, beban depresiasi tahunan E-Toll dan SLFF menjadi relatif berimbang meskipun CAPEX keduanya berbeda. Komponen biaya dan TCO per unit per tahun dirangkum pada Tabel 8.

Tabel 8. Komponen dan total TCO per unit per tahun (Rp).

Komponen	E-Toll	MR	SLFF
Depresiasi tahunan	30,42 jt	4,20 jt	29,23 jt
OPEX pemeliharaan	49,63 jt	74,04 jt	4,50 jt
OPEX SDM (basis Ampera)		306,0 jt	
TCO per unit/thn	80,05 jt	384,24 jt	33,73 jt

Sumber: Pengolahan penulis berdasarkan data terverifikasi HK, 2026 (jt = juta rupiah).

Tabel 8 mengungkap kontras yang sangat tajam. Mobile Reader memiliki TCO per unit per tahun tertinggi, yaitu Rp384,24 juta, jauh melampaui E-Toll (Rp80,05 juta) maupun SLFF (Rp33,73 juta). Tingginya TCO Mobile Reader sepenuhnya bersumber dari beban SDM Rp306 juta per tahun untuk satu unit MR di GT Ampera 1, sementara biaya perangkatnya sendiri tergolong murah. Sebaliknya, SLFF yang semula tampak paling mahal dari sisi investasi justru menjadi sistem dengan TCO tahunan terendah, hanya sekitar 42% TCO E-Toll dan kurang dari 9% TCO MR. Dalam basis per unit per tahun, Mobile Reader tercatat 11,4 kali lebih mahal daripada SLFF.

Setiap sistem memiliki struktur biaya yang khas dengan implikasi strategis berbeda. Pada Mobile Reader, komponen SDM mendominasi hingga 79,6% dari total biaya, sehingga sistem ini akan terus membengkak seiring kenaikan upah, sebuah karakteristik yang sangat tidak diinginkan untuk infrastruktur jangka panjang. Pada E-Toll, beban terbesar berasal dari OPEX pemeliharaan (62,0%), diikuti depresiasi (38,0%), tanpa komponen SDM karena sistem beroperasi otomatis. Adapun SLFF menampilkan struktur paling efisien dengan depresiasi mendominasi (86,7%) dan pemeliharaan hanya 13,3%. Komposisi yang didominasi depresiasi, yakni biaya tetap yang menurun secara proporsional seiring waktu, mengindikasikan profil biaya paling dapat diprediksi dan paling resilient terhadap risiko inflasi upah.

Perlu ditegaskan bahwa cakupan TCO SLFF pada penelitian ini didasarkan pada data biaya yang diverifikasi PT Hutama Karya pada tingkat perangkat lajur (CAPEX unit RFID/ANPR dan OPEX pemeliharaan lajur), dan belum tentu mencakup seluruh komponen biaya sistem secara penuh, seperti biaya server dan back office terpusat, lisensi perangkat lunak, integrasi dengan sistem pembayaran elektronik, biaya komunikasi data, pemantauan dan penegakan pelanggaran (enforcement) bagi kendaraan yang gagal terbaca, potensi kehilangan pendapatan akibat kegagalan pembacaan (misread/no-read), maupun biaya keamanan siber. Apabila komponen-komponen tersebut belum sepenuhnya terhitung, TCO SLFF yang dilaporkan berpotensi merupakan batas bawah (lower bound) dari biaya kepemilikan sistem secara penuh. Pembaca disarankan memperlakukan angka TCO SLFF pada penelitian ini sebagai estimasi tingkat perangkat lajur, dan penelitian lanjutan perlu memverifikasi apakah komponen back office dan enforcement telah dialokasikan secara terpisah oleh operator atau belum termasuk dalam data yang diperoleh. Keterbatasan serupa juga berlaku pada sisi biaya Mobile Reader: dokumen biaya yang diterima dari PT Hutama Karya (Persero) memuat beberapa pos yang belum secara eksplisit merinci jumlah unit aktif, jumlah petugas per sif, dan jumlah sif per hari pada tiap gerbang, sehingga rincian tersebut tidak dapat disajikan sebagai tabel terpisah dalam penelitian ini. Angka total biaya SDM Mobile Reader per gerbang (Rp306 juta untuk Ampera 1 dan Rp619 juta untuk Cilandak Utama 2) diperlakukan sebagai basis perhitungan TCO agregat, sementara rincian granular jumlah petugas dan pola sif tetap menjadi kebutuhan data lanjutan bagi manajemen operasional yang lebih presisi.

Analisis pada tingkat unit kemudian dipadukan dengan hasil analisis antrian untuk mengevaluasi konfigurasi gerbang secara utuh. Biaya per kendaraan diperoleh dengan membagi TCO konfigurasi tahunan terhadap volume kendaraan tahunan (3.438.223 kendaraan untuk Ampera 1 dan 6.491.609 kendaraan untuk Cilandak Utama 2). Evaluasi gabungan stabilitas antrian dan biaya per kendaraan untuk tujuh konfigurasi disajikan pada Gambar 6 dan Tabel 11. Pada GT Ampera 1, kondisi eksisting (2 E-Toll + 1 MR) jenuh ($\rho = 1,211$) sekaligus termahal (Rp158,32 per kendaraan). Skenario simulasi rekonfigurasi dari 2 E-Toll + 1 MR menjadi 2 E-Toll + 1 SLFF menggunakan parameter laju pelayanan SLFF yang ditransfer dari hasil observasi di GT Cilandak Utama 2 menjadi pilihan estimasi terbaik pada kedua kriteria: utilisasi turun ke $\rho = 0,691$ (stabil dan dalam buffer) dan biaya turun ke Rp56,37 per kendaraan, atau estimasi penghematan 64,4% dari kondisi eksisting. Penambahan gardu konvensional (4 E-Toll) hanya menurunkan ρ ke 0,892, masih di atas buffer 0,85, dengan biaya tertinggi di antara skenario perbaikan, menegaskan bahwa penambahan gardu konvensional adalah cara paling tidak efisien.

Tabel 9. Stabilitas antrian dan TCO per konfigurasi gerbang.

Konfigurasi	ρ	Status	TCO/Kend (Rp)
A1: 2 E-Toll + 1 MR (eksisting)	1,211	Jenuh	158,32
A1: 4 E-Toll	0,892	Stabil*	93,13
A1: 3 E-Toll + 1 SLFF	0,579	Stabil	79,66
A1: 2 E-Toll + 1 SLFF	0,691	Stabil	56,37
C2: 6 E-Toll + 1 MR (eksisting)	1,303	Jenuh	253,63
C2: 6 E-Toll + 1 SLFF	1,074	Jenuh	79,18
C2: 6 E-Toll + 2 SLFF	0,827	Stabil	84,38

Sumber: Pengolahan penulis, 2026. *Stabil namun di atas buffer 0,85.

Pada GT Cilandak Utama 2 yang bervolume sangat tinggi, kondisi eksisting yang mengoperasikan 6 E-Toll dan 7 unit MR fisik menghasilkan biaya Rp253,63 per kendaraan, sebagian besar disebabkan oleh beban SDM untuk 7 unit MR sebesar Rp619 juta per tahun, meskipun MR hanya melayani 3,34% transaksi. Estimasi mengganti seluruh MR dengan satu lajur SLFF (6 E-Toll + 1 SLFF) menggunakan parameter yang diukur langsung di lokasi yang sama menurunkan biaya menjadi Rp79,18 per kendaraan, namun karena volumenya yang luar biasa tinggi, satu lajur SLFF belum cukup sehingga utilisasi masih $\rho = 1,074$ (tetap jenuh). Untuk mencapai buffer keandalan, dibutuhkan estimasi dua lajur SLFF (6 E-Toll + 2 SLFF) yang menghasilkan $\rho = 0,827$ (stabil) dengan biaya Rp84,38 per kendaraan, atau estimasi penghematan 66,7% terhadap kondisi eksisting, setara penghematan absolut sekitar Rp1,1 miliar per tahun.

Keunggulan biaya tahunan SLFF pada Tabel 9 (TCO tahunan) merepresentasikan perbandingan biaya kepemilikan total, termasuk depresiasi sebagai komponen non-kas. Untuk menilai kelayakan investasi konversi, periode pengembalian (payback period) dihitung secara terpisah menggunakan basis arus kas: hanya OPEX tunai (pemeliharaan dan SDM) yang diperhitungkan sebagai penghematan, sedangkan CAPEX Mobile Reader yang telah dibeli diperlakukan sebagai sunk cost dan tidak dikurangkan dari kebutuhan investasi baru, kecuali unit tersebut terbukti memiliki nilai pelepasan (disposal value). Untuk estimasi skenario GT Ampera 1, biaya tunai tahunan MR (OPEX pemeliharaan Rp74,04 juta + OPEX SDM Rp306,0

juta = Rp380,04 juta) dibandingkan dengan biaya tunai tahunan SLFF (OPEX pemeliharaan Rp4,50 juta), menghasilkan penghematan arus kas Rp375,54 juta per tahun. Terhadap investasi baru sebesar CAPEX SLFF (Rp162,4 juta, tanpa menetralkan CAPEX MR yang sudah menjadi sunk cost), payback period diproyeksikan sekitar 5,2 bulan hampir sama dengan estimasi sebelumnya (5,1 bulan) yang secara tidak sengaja menetralkan CAPEX MR, sehingga kesimpulan kelayakan investasi tetap kokoh meskipun metodologinya diperketat. Karena estimasi ini menggunakan parameter SLFF yang ditransfer dari GT Cilandak Utama 2, angka payback tersebut sebaiknya diperlakukan sebagai proyeksi awal yang memerlukan verifikasi melalui uji coba langsung di GT Ampera 1. Rincian perhitungan disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Analisis payback period investasi SLFF terhadap MR (GT Ampera 1).

Parameter	Nilai
CAPEX SLFF per lajur (investasi baru)	Rp 162,4 jt
CAPEX MR eksisting (sunk cost, tidak dinetralkan)	Rp 14,0 jt
Biaya tunai tahunan MR (pemeliharaan + SDM)	Rp 380,04 jt
Biaya tunai tahunan SLFF (pemeliharaan)	Rp 4,50 jt
Payback period (basis arus kas)	5,2 bulan

Sumber: Pengolahan penulis, 2026 (jt = juta rupiah).

Pada GT Cilandak Utama 2, stabilitas penuh menuntut estimasi penambahan dua lajur SLFF. Dengan basis arus kas yang sama, biaya tunai tahunan armada 7 unit MR ($7 \times$ OPEX pemeliharaan Rp74,04 juta + OPEX SDM aktual Rp619,0 juta = Rp1.137,28 juta) dibandingkan dengan biaya tunai tahunan 2 unit SLFF ($2 \times$ Rp4,50 juta = Rp9,0 juta), menghasilkan penghematan arus kas Rp1.128,28 juta per tahun. Terhadap investasi baru $2 \times$ Rp162,4 juta = Rp324,8 juta (CAPEX 7 unit MR yang sudah dibeli diperlakukan sebagai sunk cost, tidak dinetralkan), payback period diproyeksikan sekitar 3,5 bulan. Angka ini sedikit lebih panjang daripada estimasi awal (2,5 bulan) yang sebelumnya menetralkan CAPEX MR terhadap investasi baru, namun tetap jauh lebih cepat daripada periode payback infrastruktur tol yang umumnya 3 sampai 7 tahun, sekaligus lebih cepat daripada Ampera karena skala penghematan SDM yang jauh lebih besar dan karena parameter laju pelayanan yang digunakan diukur langsung di lokasi yang sama (bukan hasil transfer lintas-gerbang). Temuan ini menegaskan bahwa keunggulan SLFF tidak terbatas pada efisiensi biaya tingkat unit, melainkan konsisten hingga biaya per kendaraan dan periode pengembalian pada konfigurasi gerbang yang realistis bahkan setelah metodologi payback diperketat dengan basis arus kas dan perlakuan sunk cost selama jumlah lajur SLFF dikalibrasikan terhadap volume tiap gerbang dan parameter transfer antar-gerbang diverifikasi lebih lanjut.

Temuan Strategis: Pemanfaatan dan Biaya Kesiapsiagaan Mobile Reader

Analisis TCO mengungkap temuan penting mengenai pola pemanfaatan Mobile Reader yang perlu dimaknai sesuai dengan fungsinya sebagai intervensi situasional. Di GT Ampera 1, MR hanya melayani 0,07% dari total transaksi (sekitar 6 sampai 7 transaksi per hari), sementara biaya SDM tercatat Rp306 juta per tahun untuk 3 petugas siaga. Apabila seluruh biaya SDM tersebut dibagi rata pada volume transaksi MR aktual, biaya per transaksi di Ampera mencapai sekitar Rp127.000 jauh melampaui tarif tol JORR-S yang umumnya kurang dari Rp20.000 per transaksi. Di GT Cilandak Utama 2, MR melayani 3,34% transaksi dengan biaya per transaksi sekitar Rp2.855, atau sekitar 15% dari tarif rata-rata tol. Sebagai pembanding, biaya per transaksi E-Toll dan SLFF jauh di bawah Rp100. Perhitungan biaya-per-transaksi ini,

meskipun secara aritmetik benar, berpotensi menyesatkan apabila diinterpretasikan seolah-olah MR dimaksudkan untuk menangani volume tinggi seperti E-Toll atau SLFF. Karena MR pada praktiknya diaktifkan hanya ketika antrian telah memanjang, biaya SDM MR lebih tepat dipahami sebagai biaya kesiapsiagaan (standby readiness cost) analog dengan peralatan darurat yang tingkat penggunaannya rendah namun nilai ekonominya berasal dari kerugian yang dapat dicegah pada saat diaktifkan. Oleh karena itu, kelayakan MR seharusnya dinilai berdasarkan frekuensi aktivasi, durasi rata-rata pengoperasian, dan manfaat pengurangan antrian selama periode aktivasi, bukan semata-mata berdasarkan biaya per transaksi tahunan. Dengan kerangka ini, tingkat pemanfaatan MR yang rendah menunjukkan bahwa desain kesiapsiagaannya saat ini kemungkinan berlebih (over-provisioned) dibandingkan frekuensi aktivasi aktual sebuah temuan yang tetap relevan secara finansial namun mengarah pada rekomendasi optimalisasi jumlah unit dan skema aktivasi MR, bukan penghapusan fungsinya sebagai strategi mitigasi antrian.

Sintesis Tiga Dimensi Evaluasi

Penyatuan ketiga dimensi evaluasi memperlihatkan pola yang konsisten dan saling menguatkan, meski perlu dibaca sebagai indikasi awal mengingat ukuran sampel SLFF yang masih kecil ($n = 21$ transaksi; $n = 13$ responden). Pada dimensi efektivitas operasional, SLFF menunjukkan keunggulan melalui waktu pelayanan terendah (3,80 detik) dan utilisasi yang berpotensi dikembalikan ke kondisi stabil; pada dimensi kepuasan pengguna, SLFF meraih CSL tertinggi (90,8%) dengan keunggulan paling menonjol pada dimensi antrian; dan pada dimensi efisiensi biaya, SLFF mencatat TCO tahunan terendah sekaligus estimasi biaya per kendaraan termurah pada konfigurasi optimal. Mobile Reader, di sisi lain, menunjukkan waktu pelayanan dan biaya per transaksi tahunan yang kurang menguntungkan bila diukur dengan tolok ukur volume tinggi seperti E-Toll dan SLFF hasil yang sejalan dengan sifatnya sebagai intervensi situasional bervolume rendah, bukan indikasi kegagalan teknologi sembari tetap memberikan perbaikan persepsi yang moderat pada kepuasan pengguna. Pola ini mengindikasikan bahwa keunggulan SLFF tidak bertumpu pada satu aspek tunggal, melainkan tampak konsisten secara simultan pada efektivitas, penerimaan, dan efisiensi berdasarkan data eksploratif yang tersedia; konfirmasi lebih lanjut melalui sampel yang lebih besar tetap diperlukan sebelum kesimpulan ini dapat digeneralisasi.

Tabel 11 merangkum posisi relatif ketiga sistem pada indikator-indikator utama. Perbandingan ini memperjelas bahwa MR berfungsi sebagai solusi transisi dengan manfaat terbatas, sedangkan SLFF merupakan solusi struktural yang menyelesaikan akar persoalan keterisian gardu, unggul pada dimensi-dimensi paling kritis termasuk TCO total, OPEX pemeliharaan, dan kontribusi pada kapasitas pelayanan.

Tabel 11. Ringkasan perbandingan kinerja antarsistem pada indikator utama.

Indikator	E-Toll	MR	SLFF
Waktu pelayanan (detik)	12,04	12,72	3,80
Konsistensi (CV)	30,3%	28,9%	7,8%
Laju pelayanan μ (kend/jam)	≈ 294	≈ 283	947
CSL keseluruhan	78,3%	80,9%	90,8%
TCO per unit/thn (Rp jt)	80,1	384,2	33,7
Posisi keseluruhan	Menengah	Transisi	Terbaik

Sumber: Pengolahan penulis, 2026 (jt = juta rupiah).

Interpretasi Kinerja Waktu Pelayanan dan Antrean

Ketiga sistem menunjukkan pola kinerja yang berbeda secara struktural, bukan sekadar berbeda secara kuantitatif. E-Toll dan MR beroperasi pada kisaran waktu pelayanan yang berdekatan (12,04 dan 12,72 detik) karena keduanya tetap mengandalkan interaksi kartu-pembaca yang mengharuskan kendaraan melambat atau berhenti sejenak, sedangkan SLFF memangkas waktu pelayanan menjadi 3,80 detik dengan menghilangkan interaksi tersebut sama sekali. Kondisi kedua gerbang yang berada di atas ambang jenuh ($\rho = 1,211$ di Ampora 1 dan $\rho = 1,303$ di Cilandak Utama 2) menegaskan bahwa persoalan antrian pada JORR-S bersifat struktural: kapasitas total gardu telah terlampaui oleh volume kendaraan, sehingga penambahan gardu dengan laju pelayanan setara E-Toll termasuk MR hanya memberi pengaruh marginal terhadap stabilitas sistem. Nilai ρ pada kondisi ini lebih tepat dibaca sebagai penanda derajat ketakstabilan struktural dibandingkan sebagai estimasi kuantitatif waktu tunggu aktual, mengingat model M/M/c mengasumsikan kondisi keseimbangan yang tidak terpenuhi ketika $\rho > 1$ (Klodzinski & Al-Deek, 2002a). Kondisi $\rho > 1$ pada kedua gerbang ini juga sejalan dengan persoalan yang diangkat Pompigna dan Mauro (2021) dalam model waktu-tunggu tak-stasioner (time-dependent) di gerbang tol, yang menunjukkan bahwa pendekatan kesetimbangan seperti M/M/c cenderung meremehkan variabilitas antrian aktual ketika permintaan mendekati atau melampaui kapasitas layanan. Pembacaan level-of-service pada kondisi jenuh semacam ini juga perlu mempertimbangkan bahwa klasifikasi LOS konvensional pada gerbang tol umumnya diturunkan dari asumsi throughput yang relatif stabil (Vijay (2018)), sehingga kategori LOS terburuk yang teramati pada JORR-S kemungkinan masih meremehkan tingkat keparahan kondisi lapangan yang sesungguhnya. Interpretasi ini menjadi dasar bagi pembahasan lebih rinci mengenai posisi MR dan SLFF pada dua subbagian berikut.

Mobile Reader sebagai Intervensi Kapasitas Situasional

Temuan bahwa waktu pelayanan Mobile Reader (12,72 detik) sedikit lebih lambat daripada E-Toll (12,04 detik) tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai bukti inefisiensi teknologi RFID genggam. Karena MR pada praktik operasional JORR-S baru diaktifkan petugas ketika antrian telah memanjang, data waktu pelayanannya secara struktural dikumpulkan pada kondisi yang lebih berat daripada E-Toll, yaitu saat arus sudah padat, ruang gerak petugas terbatas, dan diperlukan koordinasi manual antarkendaraan. Kerangka evaluasi yang lebih sesuai bukan sekadar membandingkan kecepatan transaksi per kendaraan, melainkan menilai apakah pengoperasian MR mampu menambah kapasitas pelayanan agregat atau mempercepat disipasi antrian dibandingkan kondisi tanpa MR sebuah pertanyaan yang lebih dekat dengan kajian queue relief intervention dan kebijakan aktivasi server bertingkat pada literatur teori antrian (Legros & Jouini, 2024; Efrosinin & Stepanova, 2021). Pendekatan evaluasi berbasis kejadian (sebelum–selama–sesudah aktivasi), sebagaimana diterapkan pada kajian pengendalian lalu lintas proaktif di gerbang tol (Zhou et al., 2023), evaluasi penambahan lajur ekspres pada gerbang tol eksisting (Klodzinski & Al-Deek, 2004), dan evaluasi dampak open road tolling pada gerbang tol utama (Klodzinski et al., 2007), akan memungkinkan pengukuran indikator seperti perubahan panjang antrian per menit, tambahan transaksi yang dilayani MR per jam aktivasi, dan waktu pemulihan antrian ke kondisi normal indikator yang lebih relevan bagi fungsi MR dibandingkan rata-rata waktu pelayanan semata. Dengan demikian, kesimpulan bahwa MR “belum efektif” perlu diperhalus menjadi: MR belum

terbukti mempercepat transaksi per kendaraan dibandingkan E-Toll, tetapi efektivitasnya sebagai strategi mitigasi antrian situasional belum dapat disimpulkan dari desain penelitian saat ini.

Model M/M/c agregat yang digunakan pada bagian hasil mengasumsikan jumlah kanal pelayanan tetap sepanjang jam puncak, asumsi yang wajar untuk E-Toll dan SLFF tetapi kurang tepat bagi MR yang jumlah unit aktifnya berubah mengikuti kondisi antrian. Literatur teori antrian menawarkan sejumlah kerangka yang lebih sesuai untuk merepresentasikan server situasional semacam ini, antara lain kebijakan aktivasi server berbasis ambang (threshold-based server activation) (Efrosinin & Stepanova, 2021), strategi transient staffing untuk menjaga panjang antrian tetap di bawah target tertentu (Legros & Jouini, 2024), dan pendekatan limit heavy-traffic untuk antrian dengan parameter yang berubah terhadap waktu (Liu & Whitt, 2014). Untuk konteks operasional gerbang tol secara khusus, simulasi kejadian diskret (discrete-event simulation) telah digunakan secara luas untuk mengevaluasi kinerja gerbang tol pada berbagai konfigurasi lajur dan teknologi (Silveira-Santos et al., 2023; Al-Deek et al., 2005; Nezamuddin & Al-Deek, 2008), dan berpotensi diterapkan pada JORR-S untuk memodelkan aktivasi-dan-nonaktivasi MR secara dinamis, sesuatu yang tidak dapat direpresentasikan oleh model antrian analitik keseimbangan seperti M/M/c. Penelitian lanjutan yang menggabungkan data historis waktu aktivasi MR dengan simulasi kejadian diskret akan memberikan estimasi yang lebih presisi mengenai kontribusi kapasitas riil MR dibandingkan pendekatan agregat yang digunakan pada penelitian ini.

Kinerja dan Potensi Penerapan SLFF

Observasi SLFF pada penelitian ini dilakukan secara eksklusif di GT Cilandak Utama 2. Dua puluh satu transaksi SLFF yang dianalisis, beserta laju pelayanan $\mu = 946,78$ kendaraan/jam, seluruhnya berasal dari gerbang tersebut. Oleh karena itu, skenario “rekonfigurasi GT Ampera 1 dari 2 E-Toll + 1 MR menjadi 2 E-Toll + 1 SLFF” harus diposisikan sebagai simulasi transfer parameter lintas lokasi (parameter-transfer scenario), bukan hasil implementasi yang diamati langsung di lokasi tersebut. Praktik transfer parameter laju pelayanan antar-lokasi telah lama menjadi perhatian dalam literatur simulasi gerbang tol; kajian transferabilitas model gerbang tol menemukan bahwa parameter yang dikalibrasi pada satu gerbang tidak selalu berlaku langsung pada gerbang lain akibat perbedaan geometri, volume, komposisi kendaraan, dan pola pemilihan lajur (Klodzinski & Al-Deek, 2002b). Oleh karena itu, estimasi $\rho = 0,691$ dan biaya Rp56,37 per kendaraan pada skenario Ampera 1 tetap informatif sebagai indikasi arah perbaikan, tetapi sebaiknya diperlakukan sebagai hipotesis yang memerlukan verifikasi melalui uji coba SLFF langsung di GT Ampera 1, sebelum dijadikan dasar keputusan investasi definitif. Skenario penambahan lajur SLFF di GT Cilandak Utama 2 (dari satu menjadi dua lajur), sebaliknya, menggunakan parameter yang diukur langsung di lokasi yang sama sehingga secara metodologis lebih kuat, meskipun tetap bersifat proyeksi karena konfigurasi tersebut belum benar-benar dioperasikan pada volume penuh. Estimasi arah perbaikan ini juga selaras dengan evaluasi lapangan Single Lane Free Flow yang dilakukan Lueanpech et al. (2019), yang menemukan bahwa keunggulan SLFF terhadap sistem berbasis kartu paling konsisten muncul pada gerbang dengan volume tinggi dan pola kedatangan yang relatif seragam kondisi yang lebih menyerupai GT Cilandak Utama 2 dibandingkan GT Ampera 1. Meskipun demikian, kajian kritis atas penerapan sistem free-flow

multi-lajur di Indonesia oleh Sumardi et al. (2024) mengingatkan bahwa keberhasilan teknis pada satu lokasi percontohan tidak otomatis menjamin kinerja setara pada skala jaringan yang lebih luas, sebuah peringatan yang relevan bagi rencana perluasan SLFF ke GT Ampera 1 pada penelitian ini.

Kepuasan dan Penerimaan Pengguna

Pola penerimaan pengguna yang meningkat setelah pengalaman langsung selisih dukungan 39,4 poin antara pengguna yang pernah dan belum mencoba SLFF dapat didudukkan dalam dialog dengan tiga arus penelitian penerimaan teknologi pembayaran tol, bukan sekadar disejajarkan dengannya. Chen et al. (2007) membangun model integratif Technology Acceptance Model dan Theory of Planned Behavior untuk memprediksi niat menggunakan ETC secara umum, tanpa menaunkannya pada dimensi kepuasan tertentu; penelitian ini melangkah lebih jauh dengan menunjukkan dimensi mana dari pengalaman pengguna yang paling berperan yaitu penurunan waktu antrian melalui data Customer Satisfaction Level (CSL) granular per dimensi, bukan hanya niat pakai agregat. Xiao et al. (2022) menyimpulkan bahwa keandalan dan kemudahan penggunaan menjadi determinan utama kepuasan ETC di Shanghai dan Beijing; temuan pada JORR-S sebagian sejalan namun juga berbeda penekanan kepuasan tertinggi SLFF (90,8%) memang didorong oleh keunggulan pada dimensi antrian, tetapi preferensi pemilihan pengguna tetap condong pada sistem yang telah dikenal (E-Toll dipilih 44,4% responden, SLFF 18,8%), sehingga pada konteks JORR-S familiaritas tampak sama pentingnya dengan keandalan teknis dalam membentuk perilaku pemilihan aktual, bukan hanya sikap atau kepuasan yang dilaporkan. Hermawan dan Aruan (2023) membandingkan niat adopsi E-Toll dan MLFF di Trans-Sumatra tanpa mengaitkannya dengan struktur biaya kepemilikan; penelitian ini menunjukkan bahwa kesenjangan preferensi-kepuasan yang serupa pada JORR-S berimplikasi langsung pada keputusan investasi, karena migrasi ke SLFF yang berbiaya rendah tidak akan efektif tanpa strategi transisi yang secara eksplisit menangani kecenderungan mempertahankan sistem lama tersebut keterkaitan lintas-dimensi yang belum banyak dieksplisitkan pada literatur penerimaan teknologi tol sebelumnya. Implikasi pola ini bagi strategi implementasi diuraikan lebih lanjut pada subbagian Implikasi Operasional dan Kebijakan.

Efisiensi Biaya dan Total Cost of Ownership

Tingginya TCO Mobile Reader (Rp384,2 juta per unit per tahun), yang 79,6% di antaranya berasal dari komponen sumber daya manusia, memperluas kerangka analisis biaya siklus hidup sistem transportasi cerdas dari Gao et al. (2018), yang secara umum menyimpulkan bahwa biaya personel dan kesiapsiagaan operasional cenderung dominan pada teknologi human-assisted dibandingkan sistem yang murni otomatis, tanpa mengukur proporsinya secara spesifik pada satu jenis intervensi. Penelitian ini memberikan angka empiris atas proporsi tersebut dalam konteks queue-relief di gerbang tol kuantifikasi yang belum tersedia pada kerangka Gao et al. (2018) itu sendiri. Namun demikian, proporsi 79,6% ini diturunkan dari satu pola kepegawaian, yaitu skema penugasan petugas Mobile Reader yang berlaku di ruas JORR-S di bawah PT Hutama Karya (Persero); ruas tol lain dengan rasio petugas-per-gardu, tingkat upah, atau kebijakan lembur yang berbeda berpotensi menghasilkan proporsi biaya SDM yang berbeda pula, sehingga angka 79,6% sebaiknya dibaca sebagai

estimasi kontekstual pada satu operator, bukan konstanta struktural biaya MR secara umum. Roda et al. (2020) menempatkan biaya personel dan pemeliharaan pada aset manufaktur sebagai bagian dari trade-off antara fleksibilitas operasional dan efisiensi biaya jangka panjang, bukan indikator kegagalan aset; penelitian ini menerapkan cara pandang serupa secara komparatif pada tiga teknologi pembayaran tol sekaligus sesuatu yang belum dilakukan pada studi TCO gerbang tol sebelumnya dan menunjukkan bahwa struktur biaya ketiganya berbeda secara kualitatif, bukan hanya berbeda besaran: TCO SLFF (Rp33,7 juta, atau sekitar 8,8% dari TCO MR) didominasi depresiasi, komponen tetap yang lebih dapat diprediksi dan relatif resilien terhadap risiko inflasi upah, sementara TCO MR sebagian besar bersifat variabel dan sensitif terhadap kebijakan pengupahan. Dari sudut pandang ini, TCO MR yang tinggi lebih tepat dibaca sebagai biaya kesiapsiagaan (readiness cost) untuk intervensi situasional dibandingkan sebagai kelemahan teknologi itu sendiri. Pembacaan TCO SLFF sebagai struktur biaya yang lebih rendah dan lebih stabil ini juga konsisten dengan kajian kelayakan penerapan Single Lane Free Flow pada operator tol lain di Indonesia (Ahmad, S., & Wijaya, 2025), yang turut mengidentifikasi penghematan biaya operasional sebagai salah satu justifikasi utama migrasi ke SLFF, meskipun kajian tersebut tidak merinci proporsi biaya SDM seperti yang dilakukan pada penelitian ini.

Dari perspektif keuangan, masa pengembalian investasi yang singkat (sekitar 5,2 bulan untuk GT Ampera 1 dan sekitar 3,5 bulan untuk GT Cilandak Utama 2, dihitung atas basis arus kas dengan CAPEX Mobile Reader yang sudah dibeli diperlakukan sebagai sunk cost) menjadikan konversi SLFF sebagai keputusan investasi dengan profil pengembalian yang menarik, meskipun estimasi ini belum memperhitungkan biaya transisi non-tunai seperti sosialisasi, pelatihan, dan potensi gangguan operasional selama masa peralihan. Penghematan biaya tunai tahunan yang besar, terutama dari penghapusan beban SDM pada Mobile Reader, memberikan ruang fiskal yang dapat dialokasikan kembali untuk perluasan sistem ke gerbang lain dalam jaringan, maupun untuk fungsi operasional bernilai tinggi seperti layanan pelanggan dan pemeliharaan preventif.

Implikasi Operasional dan Kebijakan

Penelitian ini menunjukkan bahwa Single Lane Free Flow (SLFF) memiliki keunggulan dibandingkan Mobile Reader (MR) dalam aspek kecepatan layanan, konsistensi operasional, kepuasan pengguna, serta efisiensi biaya kepemilikan. Temuan ini memperkuat penelitian sebelumnya mengenai penerapan sistem free-flow, namun memberikan kontribusi baru melalui kerangka evaluasi yang mengintegrasikan Total Cost of Ownership (TCO), Customer Satisfaction Level (CSL), dan analisis kelayakan investasi dalam satu model evaluasi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penerapan SLFF perlu disesuaikan dengan karakteristik volume lalu lintas pada setiap gerbang tol, sehingga gerbang dengan volume sedang cukup menggunakan satu lajur SLFF, sedangkan gerbang dengan volume tinggi memerlukan lebih dari satu lajur untuk menjaga keandalan sistem. Meskipun demikian, MR tetap diperlukan sebagai solusi pendukung pada kondisi antrean ekstrem. Keberhasilan implementasi SLFF juga bergantung pada strategi transisi, sosialisasi kepada pengguna, dan penegakan kepatuhan pembayaran karena tingkat penerimaan masyarakat terhadap teknologi baru masih dipengaruhi oleh pengalaman penggunaan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain ukuran sampel SLFF yang masih terbatas, penggunaan asumsi model antrean M/M/c,

perhitungan TCO yang belum memperhitungkan discount factor, serta penggunaan parameter nilai sisa aset yang belum diverifikasi secara empiris. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sampel yang lebih besar, metode analisis yang lebih komprehensif, serta evaluasi ekonomi yang lebih mendalam agar hasil penelitian dapat digeneralisasikan secara lebih luas.

KESIMPULAN

Mobile Reader (MR) belum meningkatkan kecepatan pelayanan per transaksi dibandingkan E-Toll, dengan waktu pelayanan 12,72 detik atau 5,6% lebih lambat. Namun, karena MR digunakan secara situasional setelah antrean terbentuk, efektivitasnya tidak cukup dinilai dari waktu transaksi, tetapi juga dari tambahan kapasitas dan kemampuan memulihkan antrean. Pada kondisi eksisting, GT Ampera 1 dan GT Cilandak Utama 2 masih tidak stabil dengan ρ masing-masing sebesar 1,211 dan 1,303. Sementara itu, SLFF mencatat waktu pelayanan 3,80 detik, konsistensi tertinggi (CV 7,8%), dan kepuasan pengguna tertinggi (CSL 90,8%), dibandingkan MR (80,9%) dan E-Toll (78,3%).

SLFF juga memiliki biaya kepemilikan tahunan terendah, yaitu Rp33,7 juta per unit, dibandingkan E-Toll sebesar Rp80,1 juta dan MR sebesar Rp384,2 juta. Tingginya biaya MR terutama berasal dari komponen SDM (79,6%) dan mencerminkan biaya kesiapsiagaan untuk intervensi situasional. Simulasi penerapan SLFF menunjukkan potensi kondisi operasi stabil ($\rho = 0,691$), penghematan 64,4% di GT Ampera 1 dan 66,7% di GT Cilandak Utama 2, serta periode pengembalian masing-masing sekitar 5,2 dan 3,5 bulan. Meskipun demikian, estimasi di GT Ampera 1 masih menggunakan parameter transfer dari GT Cilandak Utama 2 sehingga perlu diverifikasi melalui uji coba lapangan.

Operator direkomendasikan memprioritaskan uji coba dan perluasan SLFF pada gerbang yang jenuh, disertai sosialisasi kepada pengguna. Jumlah unit dan skema aktivasi MR perlu dioptimalkan berdasarkan frekuensi serta durasi penggunaan aktual, tanpa menghapus perannya sebagai instrumen mitigasi antrean. Penelitian selanjutnya perlu memperbesar sampel observasi SLFF, mengevaluasi MR dengan desain sebelum–selama–sesudah aktivasi, memvalidasi penerapan SLFF di GT Ampera 1, serta menggunakan simulasi kejadian diskret dan pengamatan longitudinal..

REFERENSI

- Ahmad, S., & Wijaya, C. (2025). *Feasibility of electronic toll collection: Non-cash, non-stop, contactless toll transaction system based on Single Lane Free Flow at PT Jasamarga Tollroad Operator*.
- Al-Deek, H. M., Mohamed, A. A., & Malone, L. (2005). A new stochastic discrete-event micro simulation model for evaluating traffic operations at electronic toll collection plazas. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 9(4), 205–219.
- Chen, C. D., Fan, Y. W., & Farn, C. K. (2007). Predicting electronic toll collection service adoption: An integration of the technology acceptance model and the theory of planned behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5), 300–311.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

- Colombo, C. G., Matera, N., Longo, M., & Borghetti, F. (2026). Evolution of the national toll network towards a free-flow model: Mobility, safety and environmental impacts of a real-world case study. *Infrastructures*, 11(2), Article 62.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
- Efrosinin, D., & Stepanova, N. (2021). Estimation of the optimal threshold policy in a queue with heterogeneous servers using a heuristic solution and artificial neural networks. *Mathematics*, 9(11), 1267.
- Etikan, I., Musa, S. A., & Alkassim, R. S. (2016). Comparison of convenience sampling and purposive sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1–4.
- Federal Highway Administration. (2018). Traffic data computation method pocket guide. U.S. Department of Transportation.
- Gao, J., Ozbay, K., Zuo, F., & Kurkcu, A. (2018). A life-cycle cost-analysis approach for emerging intelligent transportation systems with connected and autonomous vehicles. Paper presented at the Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington, DC.
- Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of queueing theory* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Hedges, L. V. (1981). Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107–128.
- Hermawan, I., & Aruan, D. T. H. (2023). Technology acceptance of toll road payment systems: Comparison of E-Toll and MLFF technology on the Trans-Sumatra Toll Road.
- Hussein, A. M. A. (2025). Automatic number plate recognition for seamless toll charging without stopping.
- Kamiliah, D. R., & Wijaya, C. (2023). Policy issues and challenges in the introduction of electronic toll collection in Indonesia: A qualitative system dynamics approach. *Migration Letters*, 20(8), 784–798.
- Klodzinski, J., & Al-Deek, H. M. (2002a). Proposed level-of-service methodology for toll plazas. *Transportation Research Record*, 1802(1), 86–96.
- Klodzinski, J., & Al-Deek, H. M. (2002b). Transferability of a stochastic toll plaza computer model. *Transportation Research Record*, 1811(1).
- Klodzinski, J., & Al-Deek, H. M. (2004). Evaluation of toll plaza performance after addition of express toll lanes at mainline toll plaza. *Transportation Research Record*, 1867(1), 107–114.
- Klodzinski, J., Gordin, E., & Al-Deek, H. M. (2007). Evaluation of impacts of open road tolling on main-line toll plaza. *Transportation Research Record*, 2012(1), 72–83.
- Legros, B., & Jouini, O. (2024). Transient staffing at the beginning of work. *International Journal of Production Research*, 62(17), 6427–6443.
- Lima, J. P., Inácio, P. P. A., & Leal, F. (2019). Service levels of highway toll plazas: The influence of factors on manual customer service. *Production*, 29, e20180032.
- Liu, Y., & Whitt, W. (2014). Many-server heavy-traffic limit for queues with time-varying parameters. *Annals of Applied Probability*, 24(1), 378–421.
- Lueanpech, P., Pleongsrithong, J., Punyim, P., Leangvilai, E., & Ruttanapunyagorn, T. (2019). Evaluation of Single Lane Free Flow (SLFF) for electronic toll collection system.
- Nezamuddin, N., & Al-Deek, H. (2008). Developing microscopic toll plaza and toll road corridor model with PARAMICS. *Transportation Research Record*, 2047(1), 100–110.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., & Berry, L. L. (1988). SERVQUAL: A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. *Journal of Retailing*, 64(1), 12–40.

- Parikesit, D., Amalia, P., & Diyen, V. (2024). Regulatory challenges in modernizing toll road transaction systems in Indonesia. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(8), Article 6341.
- Pompigna, A., & Mauro, R. (2021). A multi-class time-dependent model for the analysis of waiting phenomena at a motorway tollgate. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(2), 237–256.
- Roda, I., Macchi, M., & Albanese, S. (2020). Building a Total Cost of Ownership model to support manufacturing asset lifecycle management. *Production Planning & Control*, 31(1), 19–37.
- Salsabila, N. S., Azizah, F. N., Fitriyani, F., Novriani, S., & Budisiswanto, N. (2024). Analysis of Multi Lane Free Flow implementation at toll gates in Indonesia: Case study of Cililitan Toll Gate 2. *Jurnal Sosial Teknologi*, 4(8), 651–668.
- Shahrier, M., Hasnat, A., Al-Mahmud, J., Huq, A. S., Ahmed, S., & Haque, M. K. (2024). Towards intelligent transportation system: A comprehensive review of electronic toll collection systems. *IET Intelligent Transport Systems*, 18, 965–983.
- Silveira-Santos, T., Portugal, L. da S., & Ribeiro, P. C. M. (2023). Using a discrete-event simulation model for evaluating the operational performance of toll plazas. *Journal of Infrastructure Systems*, 29(1), Article 05022007.
- Sumardi, T. S., Oneyama, H., & Yanagihara, M. (2024). Critical examination of multilane free-flow tolling system implementation in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 479, 07024.
- Taherdoost, H. (2016). Validity and reliability of the research instrument: How to test the validation of a questionnaire/survey in research. *International Journal of Academic Research in Management*, 5(3), 28–36.
- Vijay, S. S. (2018). Level of service & throughput maximization at operational toll plazas. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(11), 805–811.
- Wang, H., Zou, F., Tian, J., Guo, F., & Cai, Q. (2022). Analysis on lane capacity for expressway toll station using toll data. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 9277000.
- Welch, B. L. (1947). The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika*, 34(1–2), 28–35.
- Xiao, G., Lu, Q., Ni, A., Zhang, C., & Zong, F. (2022). Which factors affect user satisfaction with ETC? Evidence from Shanghai and Beijing. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 3102249.
- Zahedieh, F., & Lee, C. (2024). Impacts of a toll information sign and toll lane configuration on queue length and collision risk at a toll plaza with a high percentage of heavy vehicles. *Vehicles*, 6(3), 1249–1267.
- Zhong, Z., & Ren, Z. (2025). Collaborative optimization strategy for urban highways and roads based on electronic toll collection lane regulation. *Scientific Reports*, 15, Article 33286.
- Zhou, T., Sun, Y., Wang, X., Dai, R., Cao, R., & Wu, X. (2023). Proactive integrated traffic control to mitigate congestion at toll plazas. *IET Intelligent Transport Systems*, 17, 1575–1587.