



Analisis Kelayakan Teknis dan Ekonomi Rekayasa Pembangunan Jalan Tol Seksi X Menggunakan Metode Life Cycle Cost

Anugrah Heris Santri^{1*}, Rezi Munizar², Hendret Susanto³

¹⁻³ Universitas Ratu Samba, Indonesia

email: anugrah@gmail.com¹

Article Info :

Received:
21-06-2026
Revised:
23-06-2026
Accepted:
13-07-2026

Abstract

The imbalance between traffic volume growth and road infrastructure capacity has intensified congestion, reduced logistics efficiency, and increased emissions along urban and intercity transport corridors. This study evaluates the technical and engineering-economic feasibility of the proposed 15.5 km Section X Toll Road using the Life Cycle Cost (LCC) approach. An empirical quantitative method was employed by integrating road capacity analysis, geometric design, rigid pavement design, and investment evaluation using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), and Payback Period (PP) indicators. The results indicate that the proposed toll road reduces the degree of saturation of the existing arterial road from 0.85 to 0.42. Economic evaluation produced a positive NPV of IDR 542 billion, an IRR of 12.45%, a BCR of 1.18, and a payback period of 14 years and 3 months. Sensitivity analysis confirms that the project remains financially feasible under a 15% increase in construction costs and a 10% decline in toll revenue. These findings demonstrate that the Section X Toll Road is technically feasible, economically viable, and capable of supporting sustainable infrastructure investment.

Keywords: Engineering Economy, Investment Feasibility, Life Cycle Cost, Toll Road, Transportation Infrastructure.

Akbsrak

Pertumbuhan volume kendaraan yang tidak seimbang dengan perkembangan kapasitas infrastruktur jalan memicu kemacetan, menurunkan efisiensi logistik, dan meningkatkan emisi pada koridor transportasi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi rekayasa pembangunan Jalan Tol Seksi X sepanjang 15,5 km menggunakan pendekatan Life Cycle Cost (LCC). Penelitian menerapkan metode kuantitatif empiris dengan mengintegrasikan analisis kapasitas jalan, perancangan geometrik, desain perkerasan kaku, serta evaluasi investasi melalui indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP). Hasil analisis menunjukkan pembangunan jalan tol mampu menurunkan derajat kejenuhan jalan eksisting dari 0,85 menjadi 0,42. Evaluasi ekonomi menghasilkan NPV positif sebesar Rp542 miliar, IRR 12,45%, BCR 1,18, dan PP selama 14 tahun 3 bulan. Analisis sensitivitas menunjukkan proyek tetap layak meskipun biaya konstruksi meningkat 15% atau pendapatan menurun 10%. Temuan ini menunjukkan pembangunan Jalan Tol Seksi X layak secara teknis, ekonomis, dan berpotensi mendukung investasi infrastruktur berkelanjutan.

Kata Kunci: Ekonomi Rekayasa, Infrastruktur Transportasi, Jalan Tol, Kelayakan Investasi, *Life Cycle Cost*.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan ekonomi suatu wilayah sangat bergantung pada kualitas dan kuantitas infrastruktur transportasi yang tersedia karena konektivitas yang efisien menjadi prasyarat utama bagi peningkatan produktivitas, daya saing kawasan, serta integrasi rantai pasok dalam skala regional maupun global (Badan Pusat Statistik, 2025). Transportasi darat, khususnya jaringan jalan, memegang peranan krusial dalam memfasilitasi pergerakan barang, jasa, dan manusia sehingga peningkatan mobilitas akibat pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi secara langsung meningkatkan tekanan terhadap kapasitas infrastruktur jalan yang telah tersedia (Farina et al., 2020). Ketika pertumbuhan ekonomi memicu peningkatan kepemilikan kendaraan pribadi dan mobilitas logistik, kapasitas jalan eksisting sering kali tidak lagi mampu menampung beban arus lalu lintas sehingga tingkat pelayanan jalan mengalami penurunan yang ditandai oleh meningkatnya derajat kejenuhan dan waktu tempuh

perjalanan (Departemen Pekerjaan Umum, 1997). Akibatnya, kemacetan berkembang menjadi persoalan multidimensional yang tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi akibat meningkatnya biaya operasional kendaraan dan konsumsi bahan bakar, tetapi juga memperbesar biaya eksternal berupa emisi, penurunan produktivitas, serta berkurangnya keandalan sistem distribusi logistik nasional (Yuliatti & Husin, 2024). Salah satu solusi strategis yang banyak diterapkan berbagai negara untuk mengatasi persoalan tersebut adalah pembangunan jalan bebas hambatan atau jalan tol yang dirancang berdasarkan standar geometrik dan struktur perkerasan agar mampu mengakomodasi volume lalu lintas tinggi secara berkelanjutan (Sukirman, 2010). Dalam konteks pembangunan infrastruktur modern, keberhasilan proyek jalan tol tidak lagi diukur hanya dari keberhasilan konstruksi secara fisik, melainkan juga dari kemampuannya menciptakan nilai ekonomi jangka panjang melalui pemanfaatan sumber daya yang efisien, pengendalian biaya sepanjang umur layanan, serta keberlanjutan investasi yang dapat dipertanggungjawabkan kepada seluruh pemangku kepentingan.

Pembangunan jalan tol memerlukan investasi modal yang sangat besar pada tahap awal konstruksi, sementara masa manfaat infrastruktur tersebut berlangsung dalam rentang waktu puluhan tahun sehingga keputusan investasi harus mempertimbangkan konsekuensi ekonomi yang melampaui biaya pembangunan awal (Blank & Tarquin, 2018). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan Life Cycle Cost Analysis (LCCA) mampu menghasilkan evaluasi ekonomi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan berbasis biaya konstruksi semata karena seluruh biaya selama umur layanan proyek diperhitungkan dalam satu kerangka analisis yang konsisten (Dell'Isola, 1997). Kajian mengenai perkerasan Jalan Tol Jagorawi membuktikan bahwa alternatif desain dengan biaya awal yang lebih tinggi belum tentu menghasilkan biaya total terbesar apabila biaya pemeliharaan jangka panjang turut dimasukkan ke dalam perhitungan siklus hidup aset (Oktaviani & Ayu Angreni, 2022). Hasil penelitian mengenai penerapan Performance Based Contract pada jaringan jalan di Indonesia juga mengindikasikan bahwa integrasi biaya konstruksi, operasi, rehabilitasi, dan nilai sisa mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan aset jalan dibandingkan pendekatan konvensional yang berorientasi pada anggaran tahunan (Susanti et al., 2019). Telaah kritis terhadap berbagai kerangka metodologis LCCA memperlihatkan bahwa keakuratan hasil analisis sangat dipengaruhi oleh pemilihan horizon analisis, tingkat diskonto, skenario pemeliharaan, serta asumsi ketidakpastian yang digunakan dalam pemodelan sehingga standar evaluasi ekonomi antarpelitian masih menunjukkan variasi yang cukup besar (Farina et al., 2020). Sintesis berbagai temuan tersebut menunjukkan bahwa analisis ekonomi rekayasa telah berkembang dari sekadar alat penghitungan kelayakan finansial menjadi instrumen strategis dalam mendukung pengambilan keputusan investasi infrastruktur yang mempertimbangkan efisiensi biaya sepanjang umur layanan aset.

Meskipun penelitian mengenai kelayakan ekonomi dan penerapan Life Cycle Cost terus berkembang, sebagian besar studi masih memusatkan perhatian pada evaluasi finansial proyek yang telah direncanakan tanpa mengintegrasikan secara menyeluruh aspek rekayasa geometrik, kapasitas lalu lintas, struktur perkerasan, dan estimasi biaya siklus hidup dalam satu kerangka analisis yang saling berkaitan (Adawiyah et al., 2024). Penelitian kelayakan pembangunan Jalan Tol Solo–Yogyakarta–NYIA Kulon Progo menunjukkan bahwa indikator NPV, IRR, BCR, dan Payback Period mampu menjelaskan tingkat kelayakan investasi, namun hubungan antara keputusan teknis desain dengan konsekuensi ekonomi jangka panjang belum dianalisis secara mendalam sehingga sensitivitas hasil terhadap perubahan parameter rekayasa masih terbatas (Nuzulia & Negara, 2025). Kajian mengenai kelayakan finansial Jalan Tol Malang–Kapanjen juga lebih berorientasi pada proyeksi arus kas dan pengembalian investasi sehingga implikasi pemilihan desain teknis terhadap total biaya selama umur layanan proyek belum menjadi fokus utama penelitian (Zhafir et al., 2024). Penelitian terbaru mengenai investasi Tol Layang Jakarta–Cikampek MBZ memperlihatkan pentingnya penggunaan indikator ekonomi rekayasa secara simultan, namun analisis tersebut tetap bertumpu pada evaluasi finansial tanpa menghubungkan perubahan karakteristik teknis konstruksi terhadap dinamika biaya pemeliharaan jangka panjang (Prayogi & Gunasti, 2026). Kesenjangan serupa juga terlihat pada berbagai penelitian penerapan metode Life Cycle Cost di sektor konstruksi lain, seperti pengendalian biaya jembatan, pembangunan pabrik, maupun evaluasi alternatif lapis pondasi, yang membuktikan efektivitas LCC sebagai alat optimasi biaya tetapi belum menghasilkan model terpadu yang secara simultan menghubungkan keputusan desain teknik dengan indikator kelayakan investasi pada proyek jalan tol (Franata et al., 2025; Febrian & Wibisono, 2025; Prasetyo et al., 2025). Kondisi tersebut menunjukkan masih terbukanya ruang penelitian untuk membangun pendekatan evaluasi yang mampu

mengintegrasikan analisis teknis dan ekonomi rekayasa secara komprehensif sehingga keputusan pembangunan jalan tol tidak hanya layak secara finansial, tetapi juga optimal dari perspektif kinerja infrastruktur sepanjang siklus hidupnya.

Permasalahan tersebut menjadi semakin penting ketika pembangunan jalan tol diarahkan sebagai instrumen strategis untuk meningkatkan konektivitas kawasan industri, pusat pertumbuhan ekonomi, dan simpul logistik nasional yang menuntut keputusan investasi bernilai tinggi dengan tingkat risiko yang juga semakin kompleks. Pemilihan alternatif desain geometrik, jenis struktur perkerasan, kapasitas lajur, serta strategi pemeliharaan yang kurang tepat berpotensi meningkatkan biaya operasi dan rehabilitasi selama masa konsesi sehingga manfaat ekonomi proyek tidak dapat dicapai secara optimal. Perencanaan teknis jalan tol pada dasarnya harus memenuhi standar geometrik jalan, kapasitas lalu lintas, serta desain perkerasan yang mampu mempertahankan tingkat pelayanan jalan dalam jangka panjang sebagaimana diatur dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) dan prinsip perencanaan geometrik jalan nasional. Pemanfaatan indikator derajat kejenuhan (Degree of Saturation) berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) juga menjadi landasan penting untuk memastikan bahwa pembangunan jalan tol benar-benar menjawab kebutuhan peningkatan kapasitas jaringan jalan, bukan sekadar menambah panjang ruas infrastruktur yang tersedia. Pada saat yang sama, pengendalian biaya dan waktu selama tahapan pelaksanaan proyek tetap menjadi faktor yang menentukan keberhasilan investasi karena penyimpangan biaya konstruksi akan memengaruhi seluruh struktur biaya selama umur layanan infrastruktur. Oleh sebab itu, evaluasi kelayakan pembangunan jalan tol memerlukan pendekatan multidisiplin yang menghubungkan aspek teknis, karakteristik lalu lintas, strategi pemeliharaan, dan analisis ekonomi rekayasa dalam satu kerangka pengambilan keputusan yang saling terintegrasi.

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan bahwa indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP) merupakan instrumen utama dalam mengevaluasi kelayakan investasi infrastruktur, hubungan antara keputusan rekayasa teknis dengan perubahan nilai indikator-indikator tersebut masih belum dijelaskan secara komprehensif pada proyek jalan tol. Kerangka teori ekonomi rekayasa menjelaskan bahwa seluruh biaya dan manfaat yang terjadi pada waktu yang berbeda harus dikonversi ke nilai sekarang melalui konsep Time Value of Money, sehingga evaluasi investasi tidak hanya mempertimbangkan besarnya biaya konstruksi awal, tetapi juga biaya operasi, biaya pemeliharaan rutin, rehabilitasi berkala, hingga nilai sisa aset pada akhir umur layanan proyek. Dalam konteks tersebut, Life Cycle Cost (LCC) menjadi pendekatan yang paling representatif karena secara konseptual menghitung total biaya proyek sebagai akumulasi Construction Cost (CC), Operational and Maintenance Cost (OPEX), Periodic Rehabilitation Cost (CAPEXmaint), serta dikurangi Salvage Value (SV) sehingga mampu menggambarkan biaya kepemilikan infrastruktur secara menyeluruh. Di sisi lain, kelayakan teknis pembangunan jalan tol tetap harus didasarkan pada analisis kapasitas lalu lintas menggunakan parameter Degree of Saturation (DS) sesuai Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI), disertai pemenuhan standar geometrik dan struktur perkerasan sebagaimana diatur dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) sehingga alternatif desain yang dipilih benar-benar memenuhi aspek pelayanan maupun keberlanjutan umur rencana. Berdasarkan kerangka tersebut, penelitian ini memosisikan analisis kelayakan bukan hanya sebagai evaluasi finansial proyek, tetapi sebagai integrasi antara analisis teknis jalan, estimasi biaya berbasis volume pekerjaan, dan evaluasi ekonomi rekayasa berbasis Life Cycle Cost, sehingga hubungan sebab–akibat antara keputusan desain dan nilai investasi dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Pendekatan integratif tersebut diharapkan mampu memperkaya pengembangan metodologi evaluasi proyek jalan tol yang selama ini masih cenderung memisahkan analisis teknik sipil dari analisis ekonomi investasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi rekayasa pembangunan Jalan Tol Seksi X menggunakan pendekatan Life Cycle Cost yang mengintegrasikan evaluasi kapasitas lalu lintas, perancangan geometrik, desain perkerasan, estimasi biaya konstruksi, biaya operasi, biaya pemeliharaan, serta indikator kelayakan investasi dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Analisis dilakukan untuk memperoleh alternatif perencanaan yang tidak hanya memenuhi persyaratan teknis pembangunan jalan tol, tetapi juga mampu memberikan efisiensi biaya sepanjang umur layanan infrastruktur dan tingkat pengembalian investasi yang layak. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan integratif yang menghubungkan keputusan rekayasa teknis dengan evaluasi ekonomi berbasis siklus hidup sehingga hubungan antara karakteristik

desain dan performa ekonomi proyek dapat dijelaskan secara lebih komprehensif. Dari sisi metodologis, penelitian ini menawarkan model analisis yang mengombinasikan evaluasi kapasitas jalan, perencanaan teknis, estimasi biaya berbasis volume pekerjaan, serta perhitungan Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP) dalam satu alur analisis yang sistematis. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan studi ekonomi rekayasa infrastruktur transportasi sekaligus memberikan dasar pertimbangan yang lebih objektif bagi pemerintah, badan usaha jalan tol, dan investor dalam merumuskan kebijakan pembangunan infrastruktur yang efisien, berkelanjutan, dan berorientasi pada nilai jangka panjang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris dengan pendekatan kuantitatif yang mengintegrasikan analisis teknis jalan dan ekonomi rekayasa untuk mengevaluasi kelayakan pembangunan Jalan Tol Seksi X menggunakan metode Life Cycle Cost (LCC). Data primer diperoleh melalui survei traffic counting selama 7×24 jam, sedangkan data sekunder berupa peta topografi, harga satuan pekerjaan, dan data pendukung dikumpulkan dari instansi terkait. Analisis teknis dilakukan dengan menghitung Derajat Kejenuhan (DS) berdasarkan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI 1997) menggunakan Persamaan (1), kemudian dilanjutkan dengan perancangan geometrik, penentuan struktur rigid pavement sesuai Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ 2017), serta penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) (Departemen Pekerjaan Umum, 1997; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Selanjutnya dikembangkan model arus kas selama masa konsesi 30 tahun yang mencakup biaya konstruksi, biaya operasi, biaya pemeliharaan, rehabilitasi berkala, dan nilai sisa aset untuk menghitung Life Cycle Cost, NPV, IRR, BCR, dan Payback Period menggunakan Persamaan (2)–(6) (Blank & Tarquin, 2018; Park, 2019). Seluruh tahapan disusun secara terintegrasi agar hubungan antara keputusan teknis dan kelayakan ekonomi dapat dievaluasi secara komprehensif.

Validasi penelitian dilakukan melalui pengujian konsistensi hasil perhitungan teknis dan ekonomi serta analisis sensitivitas terhadap perubahan biaya konstruksi, volume lalu lintas, dan tingkat diskonto untuk mengukur ketahanan model. Evaluasi teknis menggunakan nilai DS, sedangkan evaluasi ekonomi didasarkan pada LCC, NPV, IRR, BCR, dan Payback Period sebagai indikator utama kelayakan investasi. Proyek dinyatakan layak apabila memenuhi kriteria $DS < 0,85$, $NPV > 0$, $IRR > MARR$, $BCR > 1$, dan Payback Period berada di bawah masa konsesi. Integrasi evaluasi teknis, ekonomi, dan analisis sensitivitas menghasilkan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan penilaian investasi konvensional yang hanya berorientasi pada biaya awal. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi yang lebih andal bagi pengambilan keputusan pembangunan jalan tol yang efisien dan berkelanjutan.

Derajat Kejenuhan (Degree of Saturation)

$$DS = \frac{V}{C}$$

Keterangan:

DS = Derajat Kejenuhan;

V = Volume lalu lintas (kendaraan/jam);

C = Kapasitas jalan (kendaraan/jam).

Life Cycle Cost (LCC)

$$LCC = CC + OPEX + CAPEX_{maint} - SV$$

Keterangan:

CC = Construction Cost;

$OPEX$ = Operational and Maintenance Cost;

$CAPEX_{maint}$ = Biaya rehabilitasi/pemeliharaan berkala;

SV = Salvage Value.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kelayakan Teknis Jalan Tol Seksi X

Hasil survei traffic counting yang dilaksanakan selama 7×24 jam menunjukkan bahwa volume Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) pada ruas arteri eksisting mencapai 32.500 kendaraan per hari pada tahun dasar pengamatan. Komposisi lalu lintas didominasi oleh kendaraan golongan I dan kendaraan angkutan barang, yang mengindikasikan bahwa koridor tersebut berfungsi sebagai jalur distribusi utama antara kawasan industri dan pusat logistik regional. Tingginya aktivitas kendaraan berat berimplikasi terhadap meningkatnya beban lalu lintas ekuivalen yang harus ditanggung oleh struktur perkerasan sehingga kebutuhan peningkatan kapasitas jalan tidak hanya dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah kendaraan, tetapi juga karakteristik beban sumbu kendaraan. Kondisi tersebut sejalan dengan data pertumbuhan transportasi dan aktivitas ekonomi wilayah yang menunjukkan kecenderungan peningkatan mobilitas setiap tahun sebagai konsekuensi dari perkembangan sektor industri dan perdagangan (Badan Pusat Statistik, 2025). Dari sudut pandang perencanaan transportasi, karakteristik lalu lintas seperti ini menunjukkan bahwa pembangunan jalan tol tidak hanya berfungsi sebagai alternatif perjalanan, tetapi juga sebagai upaya mempertahankan efisiensi jaringan transportasi pada koridor dengan intensitas logistik yang terus meningkat.

Analisis kapasitas jalan dilakukan menggunakan pendekatan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI 1997) dengan menghitung Derajat Kejenuhan (DS) sebagai rasio antara volume lalu lintas terhadap kapasitas jalan. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai DS sebesar 0,86, yang menunjukkan bahwa ruas jalan eksisting telah melampaui batas pelayanan yang direkomendasikan sehingga tingkat kemacetan mulai memengaruhi kecepatan perjalanan dan stabilitas arus lalu lintas. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kapasitas jalan yang tersedia tidak lagi mampu mengakomodasi pertumbuhan permintaan perjalanan secara optimal sehingga peningkatan kapasitas menjadi kebutuhan yang bersifat struktural, bukan hanya operasional (Departemen Pekerjaan Umum, 1997). Temuan ini konsisten dengan konsep dasar analisis kapasitas jalan yang menyatakan bahwa peningkatan nilai DS berbanding lurus dengan penurunan kualitas pelayanan jalan dan meningkatnya tundaan kendaraan. Dari perspektif rekayasa transportasi, kondisi tersebut memberikan justifikasi teknis yang kuat bahwa pembangunan jalan tol lebih relevan dibandingkan pelebaran jalan arteri eksisting karena keterbatasan ruang, keselamatan lalu lintas, dan efektivitas distribusi arus kendaraan.

Proyeksi pertumbuhan lalu lintas selama masa konsesi dilakukan menggunakan pendekatan tren linier dengan asumsi laju pertumbuhan kendaraan sebesar 4,8% per tahun. Hasil simulasi menunjukkan bahwa volume lalu lintas diperkirakan meningkat hingga sekitar 132.000 kendaraan per hari pada akhir tahun ke-30 sehingga kapasitas jalan tol perlu dirancang untuk mengakomodasi kebutuhan jangka panjang, bukan hanya kondisi lalu lintas saat ini. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa permintaan perjalanan berkembang lebih cepat dibandingkan kemampuan jalan eksisting dalam menyediakan kapasitas pelayanan, sehingga strategi pembangunan bertahap menjadi lebih rasional dibandingkan pembangunan kapasitas maksimum sejak awal. Pendekatan proyeksi lalu lintas jangka panjang seperti ini merupakan bagian penting dalam perencanaan jalan tol karena menentukan dimensi geometrik, kebutuhan investasi, dan strategi pengembangan kapasitas selama umur layanan infrastruktur (Sukirman, 2010). Hasil tersebut juga memperlihatkan bahwa ketepatan estimasi pertumbuhan lalu lintas akan berpengaruh langsung terhadap efisiensi investasi karena kesalahan proyeksi berpotensi menyebabkan overdesign maupun underdesign yang sama-sama meningkatkan biaya siklus hidup proyek.

Sebagai respons terhadap hasil analisis kapasitas dan proyeksi lalu lintas, konfigurasi jalan tol direncanakan menggunakan 2×2 lajur pada tahap awal pembangunan dan dikembangkan menjadi 2×3 lajur pada tahun ke-15 ketika volume kendaraan mendekati batas kapasitas operasional. Strategi pembangunan bertahap tersebut memungkinkan investasi awal tetap terkendali tanpa mengurangi fleksibilitas pengembangan kapasitas pada masa mendatang. Perancangan geometrik juga mempertimbangkan kecepatan rencana, radius tikungan horizontal, kelandaian memanjang, dan aspek keselamatan berkendara agar memenuhi standar teknis nasional (Sukirman, 1999). Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa keputusan mengenai jumlah lajur tidak hanya ditentukan oleh kondisi lalu lintas eksisting, tetapi juga mempertimbangkan dinamika pertumbuhan kendaraan selama masa konsesi sehingga investasi menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kebutuhan transportasi. Dari perspektif

ekonomi rekayasa, strategi peningkatan kapasitas secara bertahap juga berpotensi menurunkan biaya investasi awal tanpa mengurangi kualitas pelayanan jalan pada tahap operasional.

Pemilihan struktur perkerasan menggunakan rigid pavement dengan tebal pelat beton 29 cm di atas lapis Lean Concrete (LC) setebal 10 cm didasarkan pada karakteristik lalu lintas berat yang diproyeksikan terus meningkat selama masa layanan jalan tol. Struktur tersebut dipilih karena memiliki umur rencana yang lebih panjang, ketahanan terhadap beban berulang yang lebih tinggi, serta frekuensi rehabilitasi yang relatif lebih rendah dibandingkan alternatif perkerasan lentur pada koridor dengan dominasi kendaraan berat (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Penelitian mengenai evaluasi alternatif perkerasan berbasis Life Cycle Cost juga menunjukkan bahwa biaya konstruksi awal yang lebih tinggi pada perkerasan kaku dapat dikompensasi oleh penurunan biaya pemeliharaan selama umur layanan sehingga menghasilkan efisiensi ekonomi jangka panjang (Oktaviani & Ayu Angreni, 2022). Karakteristik tersebut menjadikan pemilihan rigid pavement tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi ketika dianalisis berdasarkan biaya siklus hidup aset. Hubungan antara keputusan teknis dan implikasi biaya jangka panjang menjadi aspek penting yang akan dianalisis lebih lanjut pada evaluasi Life Cycle Cost.

Temuan analisis teknis menunjukkan bahwa kebutuhan pembangunan Jalan Tol Seksi X didasarkan pada indikator kapasitas jalan, proyeksi pertumbuhan lalu lintas, dan pemilihan struktur perkerasan yang saling berkaitan dalam mendukung kinerja infrastruktur selama masa konsesi. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa desain teknis yang dihasilkan tidak hanya memenuhi standar geometrik dan struktur perkerasan, tetapi juga disusun untuk meminimalkan risiko peningkatan biaya pemeliharaan pada masa operasional. Pendekatan seperti ini sejalan dengan perkembangan praktik manajemen aset infrastruktur yang menempatkan keputusan rekayasa sebagai bagian dari strategi optimasi biaya sepanjang siklus hidup jalan (Walls & Smith, 1998; Farina et al., 2020). Temuan ini juga mendukung konsep bahwa kualitas keputusan pada tahap perencanaan memiliki pengaruh yang jauh lebih besar terhadap keberhasilan proyek dibandingkan pengendalian biaya yang dilakukan setelah konstruksi berlangsung. Analisis teknis tersebut menjadi dasar bagi evaluasi ekonomi rekayasa karena seluruh parameter desain akan menentukan besarnya biaya investasi, biaya operasi, serta biaya pemeliharaan yang dihitung menggunakan pendekatan Life Cycle Cost pada tahap berikutnya.

Analisis Life Cycle Cost (LCC) Pembangunan Jalan Tol

Hasil estimasi biaya menunjukkan bahwa pembangunan Jalan Tol Seksi X sepanjang 15,5 km memerlukan Capital Expenditure (CAPEX) sebesar Rp2,45 triliun yang dialokasikan pada tahun ke-0 hingga tahun ke-1 selama masa konstruksi. Nilai tersebut diperoleh melalui perhitungan volume pekerjaan berdasarkan hasil perancangan geometrik, struktur perkerasan, pekerjaan drainase, struktur pelengkap jalan, serta fasilitas operasional yang disesuaikan dengan harga satuan pekerjaan konstruksi terbaru. Besarnya investasi awal mencerminkan bahwa keputusan teknis pada tahap desain memiliki konsekuensi langsung terhadap kebutuhan pendanaan proyek sehingga optimasi desain menjadi faktor yang sangat menentukan efisiensi investasi. Prinsip Engineering Economy menjelaskan bahwa biaya konstruksi awal tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar pengambilan keputusan karena manfaat ekonomi suatu proyek harus dianalisis sepanjang umur layanannya melalui pendekatan nilai waktu uang (Time Value of Money) (Blank & Tarquin, 2018; Park, 2019). Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi investasi dilakukan secara lebih objektif karena seluruh komponen biaya dan manfaat dikonversi ke satuan nilai ekonomi yang setara.

Selama masa operasional, komponen biaya tidak berhenti pada tahap konstruksi, tetapi berkembang menjadi biaya operasi, pemeliharaan rutin, rehabilitasi berkala, serta nilai sisa aset pada akhir masa konsesi. Biaya operasional (OPEX) pada tahun pertama diperkirakan mencapai Rp24 miliar dan mengalami peningkatan secara bertahap mengikuti pertumbuhan volume lalu lintas, kebutuhan tenaga operasional, konsumsi energi, serta biaya pengelolaan sistem transaksi tol. Sementara itu, pekerjaan rehabilitasi mayor berupa structural overlay dijadwalkan pada tahun ke-10 dan ke-20 dengan estimasi biaya masing-masing sebesar Rp180 miliar agar kondisi pelayanan jalan tetap memenuhi standar operasional. Karakteristik biaya tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar pengeluaran proyek tersebar selama umur layanan infrastruktur sehingga pendekatan berbasis biaya awal tidak mampu menggambarkan kebutuhan pendanaan secara menyeluruh (Dell'Isola, 1997). Konsep Life Cycle Cost memberikan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif karena seluruh biaya yang timbul

sejak tahap konstruksi hingga akhir masa layanan dihitung sebagai satu kesatuan biaya kepemilikan aset (Susanti et al., 2019).

Perhitungan arus kas selama masa konsesi memperlihatkan bahwa peningkatan pendapatan tol berjalan seiring dengan pertumbuhan volume lalu lintas, meskipun pada beberapa periode terjadi penurunan kas bersih akibat pelaksanaan rehabilitasi berkala. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa fluktuasi arus kas merupakan karakteristik yang wajar pada proyek jalan tol karena adanya kombinasi antara investasi pemeliharaan dan peningkatan pendapatan operasional. Gambaran tersebut dapat diamati pada Tabel 1, yang menunjukkan perkembangan hubungan antara biaya keluar, pendapatan masuk, dan kas bersih pada beberapa tahun representatif selama masa konsesi.

Tabel 1. Ringkasan Proyeksi Aliran Kas Proyek (Tahun Terpilih)

Tahun Ke-	Deskripsi Proyek	Biaya Keluar (Rp Miliar)	Pendapatan Masuk (Rp Miliar)	Kas Bersih (Rp Miliar)
0-1	Masa Konstruksi	2.450,0	0,0	-2.450,0
2	Awal Operasional	24,0	285,0	+261,0
10	Perawatan Berkala	215,0	410,0	+195,0
30	Akhir Konsesi + Nilai Sisa	45,0	1.300,0	+1.255,0

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa pengeluaran terbesar terjadi pada tahap konstruksi, sedangkan arus kas positif mulai terbentuk sejak awal masa operasional dan terus meningkat hingga akhir periode konsesi. Kenaikan pendapatan pada tahun-tahun akhir menunjukkan bahwa pertumbuhan volume lalu lintas mampu mengimbangi peningkatan biaya operasi dan pemeliharaan sehingga menghasilkan akumulasi kas bersih yang semakin besar. Pola tersebut memperlihatkan bahwa manfaat ekonomi pembangunan jalan tol lebih banyak diperoleh pada fase operasional jangka panjang dibandingkan pada tahap awal investasi.

Distribusi biaya dan manfaat sebagaimana terlihat pada Tabel 1 mengindikasikan bahwa evaluasi investasi tidak dapat dipisahkan dari strategi pemeliharaan infrastruktur yang diterapkan selama umur layanan jalan. Penjadwalan rehabilitasi berkala memang meningkatkan pengeluaran pada tahun tertentu, namun tindakan tersebut mampu mempertahankan kualitas pelayanan jalan sekaligus mengurangi risiko kerusakan struktural yang memerlukan biaya perbaikan lebih besar pada masa berikutnya. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Farina et al. (2020) yang menyatakan bahwa strategi pemeliharaan merupakan salah satu variabel paling berpengaruh dalam analisis Life Cycle Cost karena menentukan besarnya total biaya kepemilikan aset selama umur rencana. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Franata et al. (2025) pada studi pengendalian biaya konstruksi jembatan, yang menunjukkan bahwa perencanaan biaya berbasis siklus hidup menghasilkan pengalokasian anggaran yang lebih efisien dibandingkan pendekatan yang hanya berorientasi pada biaya pembangunan awal. Hubungan antara jadwal pemeliharaan dan pola arus kas pada penelitian ini memperlihatkan bahwa pengeluaran tambahan pada periode tertentu justru berfungsi menjaga keberlanjutan manfaat ekonomi proyek.

Karakteristik biaya yang diperoleh pada penelitian ini memperlihatkan bahwa efisiensi investasi tidak hanya ditentukan oleh besarnya CAPEX, tetapi juga oleh kemampuan desain teknis dalam menekan biaya operasi dan rehabilitasi sepanjang umur layanan. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian Yuliatti dan Husin (2024) yang menegaskan bahwa penerapan Life Cycle Cost Analysis pada pembangunan jalan tol memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih adaptif karena mempertimbangkan interaksi antara aspek teknis, operasional, dan ekonomi secara simultan. Kesimpulan serupa juga dikemukakan oleh Febrian dan Wibisono (2025) serta Prasetyo et al. (2025) yang menunjukkan bahwa pendekatan berbasis siklus hidup mampu menghasilkan alternatif investasi dengan biaya total yang lebih efisien dibandingkan evaluasi berbasis biaya awal semata. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kualitas keputusan pada tahap perencanaan memiliki pengaruh langsung terhadap total biaya kepemilikan infrastruktur selama masa konsesi. Hasil analisis Life Cycle Cost ini menjadi landasan utama dalam mengevaluasi kelayakan ekonomi investasi melalui indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP) yang dibahas pada bagian berikutnya.

Analisis Kelayakan Ekonomi Rekayasa

Evaluasi kelayakan ekonomi dilakukan menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP) berdasarkan model arus kas selama masa konsesi 30 tahun dengan tingkat diskonto sebesar 10%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa proyek menghasilkan NPV sebesar Rp542 miliar, yang mengindikasikan bahwa nilai sekarang dari seluruh manfaat ekonomi lebih besar dibandingkan total biaya yang dikeluarkan selama umur analisis. Nilai tersebut menunjukkan bahwa investasi masih mampu menciptakan surplus ekonomi setelah seluruh biaya konstruksi, operasi, pemeliharaan, dan rehabilitasi didiskontokan ke tahun dasar analisis. Dalam teori Engineering Economy, nilai NPV positif menunjukkan bahwa proyek memberikan nilai tambah terhadap investasi sehingga layak untuk direalisasikan apabila dibandingkan dengan alternatif investasi lain yang memiliki tingkat pengembalian minimum yang sama (Blank & Tarquin, 2018). Hasil ini memperlihatkan bahwa integrasi analisis teknis dan Life Cycle Cost mampu menghasilkan struktur biaya yang tetap memberikan keuntungan ekonomi dalam jangka panjang.

Indikator kelayakan lainnya memperlihatkan kecenderungan yang konsisten dengan hasil perhitungan NPV. Nilai Internal Rate of Return (IRR) sebesar 12,45% berada di atas tingkat diskonto sebesar 10%, sedangkan Benefit–Cost Ratio (BCR) mencapai 1,18, yang menunjukkan bahwa setiap satu rupiah biaya yang diinvestasikan mampu menghasilkan manfaat ekonomi sebesar 1,18 rupiah selama umur layanan proyek. Sementara itu, Payback Period (PP) diperoleh pada tahun ke-14 bulan ke-3, sehingga pengembalian investasi terjadi jauh sebelum masa konsesi berakhir. Ringkasan hasil evaluasi ekonomi rekayasa disajikan pada Tabel 2 sebagai dasar interpretasi kelayakan investasi secara menyeluruh.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Indikator Kelayakan Investasi

Parameter	Hasil	Kriteria Kelayakan	Status
NPV	Rp542 miliar	$NPV > 0$	Layak
IRR	12,45%	$IRR > 10\%$	Layak
BCR	1,18	$BCR > 1$	Layak
Payback Period	14 tahun 3 bulan	< 30 tahun	Layak

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh indikator berada pada kategori layak sehingga investasi pembangunan Jalan Tol Seksi X memiliki prospek finansial yang baik berdasarkan parameter ekonomi rekayasa. Kesesuaian hasil antarindikator memperlihatkan bahwa struktur arus kas proyek cukup stabil untuk menghasilkan tingkat pengembalian investasi yang berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan. Konsistensi tersebut juga mengurangi potensi terjadinya kontradiksi antarparameter yang sering ditemukan pada proyek dengan struktur biaya yang kurang seimbang.

Nilai NPV, IRR, dan BCR yang diperoleh menunjukkan bahwa keputusan teknis yang diambil pada tahap perencanaan memberikan pengaruh langsung terhadap kinerja ekonomi proyek. Pemilihan konfigurasi lajur secara bertahap dan penggunaan rigid pavement menghasilkan kebutuhan biaya pemeliharaan yang relatif lebih rendah dibandingkan apabila digunakan alternatif desain dengan frekuensi rehabilitasi lebih tinggi. Hubungan tersebut memperlihatkan bahwa efisiensi ekonomi bukan hanya ditentukan oleh besarnya pendapatan tarif tol, tetapi juga oleh kemampuan desain teknis dalam mengendalikan biaya selama umur layanan aset. Temuan ini sejalan dengan penelitian Nuzulia dan Negara (2025) yang menyatakan bahwa indikator NPV, IRR, BCR, dan PP menjadi instrumen utama dalam mengevaluasi kelayakan investasi jalan tol, meskipun kualitas hasilnya sangat dipengaruhi oleh asumsi teknis yang digunakan dalam penyusunan model biaya. Perspektif serupa juga dikemukakan oleh Adawiyah et al. (2024) yang menunjukkan bahwa perubahan parameter konstruksi memiliki dampak langsung terhadap perubahan nilai indikator kelayakan finansial.

Hasil penelitian ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan Life Cycle Cost mampu meningkatkan kualitas evaluasi investasi dibandingkan analisis yang hanya mempertimbangkan biaya konstruksi awal. Perhitungan yang memasukkan biaya operasi, pemeliharaan rutin, rehabilitasi berkala, serta nilai sisa aset menghasilkan estimasi keuntungan yang lebih realistis karena mencerminkan kondisi ekonomi proyek selama seluruh umur layanan. Pendekatan tersebut sesuai dengan konsep Life Cycle Costing yang menekankan pentingnya mempertimbangkan seluruh biaya kepemilikan aset dalam proses pengambilan keputusan investasi (Dell'Isola, 1997). Temuan ini juga mendukung hasil penelitian

Walls dan Smith (1998) yang menyatakan bahwa evaluasi ekonomi berbasis siklus hidup menghasilkan keputusan desain perkerasan yang lebih efisien dibandingkan pendekatan yang hanya berorientasi pada biaya awal. Kesamaan kecenderungan hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan Life Cycle Cost pada pembangunan Jalan Tol Seksi X memiliki dasar teoritis dan empiris yang kuat dalam mendukung efisiensi investasi infrastruktur transportasi.

Interpretasi terhadap seluruh indikator ekonomi menunjukkan bahwa proyek tidak hanya memenuhi persyaratan kelayakan finansial, tetapi juga memiliki kemampuan menghasilkan manfaat ekonomi yang berkelanjutan selama masa konsesi. Hubungan antara hasil analisis teknis, distribusi biaya siklus hidup, dan indikator investasi memperlihatkan bahwa keberhasilan proyek dipengaruhi oleh konsistensi antara keputusan desain dengan strategi pengelolaan aset yang diterapkan sejak tahap perencanaan. Karakteristik tersebut sejalan dengan penelitian Zhafir et al. (2024) dan Prayogi dan Gunasti (2026) yang menunjukkan bahwa kombinasi indikator NPV, IRR, BCR, dan Payback Period memberikan tingkat keandalan yang lebih tinggi dalam menilai kelayakan investasi dibandingkan penggunaan satu indikator secara terpisah. Temuan penelitian ini memperluas hasil studi terdahulu karena menghubungkan indikator ekonomi rekayasa dengan parameter teknis jalan tol melalui pendekatan Life Cycle Cost, sehingga hubungan antara desain infrastruktur dan kinerja investasi dapat dijelaskan secara lebih komprehensif. Hasil tersebut menjadi dasar untuk mengevaluasi ketahanan investasi terhadap perubahan kondisi ekonomi melalui analisis sensitivitas yang dibahas pada subbagian berikutnya.

Analisis Sensitivitas dan Implikasi Rekayasa

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan finansial proyek terhadap perubahan parameter utama yang berpotensi terjadi selama masa konsesi, yaitu peningkatan biaya konstruksi dan penurunan pendapatan operasional akibat perubahan volume lalu lintas. Pendekatan ini penting karena proyeksi investasi infrastruktur selalu mengandung ketidakpastian yang berasal dari fluktuasi harga material, perubahan kondisi ekonomi makro, maupun dinamika permintaan transportasi. Pengujian sensitivitas memungkinkan tingkat risiko proyek dievaluasi secara kuantitatif sehingga keputusan investasi tidak hanya didasarkan pada kondisi dasar (*base case*), tetapi juga mempertimbangkan kemungkinan perubahan pada kondisi aktual. Dalam praktik Engineering Economy, pengujian berbagai skenario merupakan bagian penting dari proses pengambilan keputusan karena mampu menggambarkan batas ketahanan suatu investasi terhadap perubahan variabel ekonomi (Park, 2019). Pendekatan serupa juga banyak diterapkan dalam evaluasi investasi infrastruktur transportasi untuk mengurangi ketidakpastian pada tahap perencanaan jangka panjang (Blank & Tarquin, 2018).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada Skenario 1, ketika biaya konstruksi meningkat sebesar 15%, nilai NPV menurun dari Rp542 miliar menjadi Rp185 miliar, sedangkan IRR turun menjadi 10,65%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan biaya investasi awal memberikan pengaruh langsung terhadap besarnya keuntungan ekonomi yang diperoleh selama masa konsesi. Meskipun demikian, nilai IRR masih berada di atas tingkat diskonto sebesar 10%, sehingga proyek tetap memenuhi kriteria kelayakan investasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur arus kas proyek masih mampu mengompensasi kenaikan biaya konstruksi melalui pendapatan operasional yang diperoleh selama masa layanan jalan tol. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa proyek memiliki tingkat ketahanan yang cukup baik terhadap risiko eskalasi biaya konstruksi.

Skenario kedua mensimulasikan penurunan pendapatan tol sebesar 10% sebagai konsekuensi dari berkurangnya volume kendaraan yang menggunakan jalan tol, misalnya akibat keberadaan jalur alternatif atau perubahan pola perjalanan masyarakat. Pada kondisi tersebut, nilai NPV menurun menjadi Rp120 miliar, sedangkan IRR turun menjadi 10,32%, namun kedua indikator masih berada pada kategori layak. Ringkasan perubahan indikator kelayakan pada masing-masing skenario ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Sensitivitas Investasi Jalan Tol Seksi X

Skenario	NPV (Rp Miliar)	IRR (%)	Status Kelayakan
Kondisi Dasar	542	12,45	Layak
Biaya Konstruksi Naik 15%	185	10,65	Layak

Pendapatan Tol Turun 10%	120	10,32	Layak
--------------------------	-----	-------	-------

Data pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa seluruh skenario masih menghasilkan NPV positif dan IRR di atas tingkat diskonto, meskipun margin keuntungan mengalami penurunan yang cukup signifikan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa risiko terbesar proyek lebih dipengaruhi oleh perubahan pendapatan operasional dibandingkan perubahan biaya konstruksi, karena penurunan volume lalu lintas akan memengaruhi arus kas selama hampir seluruh masa konsesi. Hasil ini mengindikasikan bahwa akurasi proyeksi permintaan lalu lintas memiliki peran yang sangat menentukan dalam menjaga keberlanjutan investasi jalan tol.

Temuan analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa pendekatan Life Cycle Cost memberikan kemampuan evaluasi yang lebih baik dibandingkan analisis finansial konvensional karena mampu menunjukkan dampak perubahan parameter terhadap biaya kepemilikan aset selama umur layanan. Pendekatan tersebut memungkinkan hubungan antara strategi pemeliharaan, distribusi biaya, dan kinerja investasi dianalisis secara simultan sehingga keputusan rekayasa dapat disesuaikan dengan tingkat risiko yang dihadapi proyek. Hasil penelitian ini sejalan dengan kajian Farina et al. (2020) yang menegaskan bahwa analisis sensitivitas merupakan komponen penting dalam implementasi Life Cycle Cost Analysis karena ketidakpastian biaya dan umur layanan menjadi faktor dominan dalam evaluasi infrastruktur jalan. Kecenderungan serupa juga dilaporkan oleh Yuliatti dan Husin (2024) yang menunjukkan bahwa integrasi Life Cycle Cost dengan pemodelan sistem dinamis mampu meningkatkan ketepatan prediksi perubahan biaya selama masa operasional jalan tol. Kesamaan hasil tersebut memperkuat bahwa evaluasi investasi tidak cukup dilakukan menggunakan satu kondisi asumsi, melainkan perlu mempertimbangkan berbagai kemungkinan perubahan yang dapat memengaruhi keberlanjutan proyek.

Dari perspektif rekayasa infrastruktur, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan investasi tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya modal awal, tetapi juga oleh kualitas keputusan teknis yang menentukan distribusi biaya selama umur layanan aset. Pemilihan konfigurasi lajur bertahap, penggunaan rigid pavement, serta penjadwalan rehabilitasi berkala terbukti mampu mempertahankan indikator kelayakan investasi meskipun proyek mengalami perubahan kondisi ekonomi pada skenario pengujian. Temuan tersebut memiliki implikasi praktis bagi pemerintah dan badan usaha jalan tol dalam menyusun strategi investasi yang lebih adaptif terhadap ketidakpastian ekonomi maupun perubahan permintaan transportasi. Karakteristik ini mendukung hasil penelitian Munizar (2024) mengenai pentingnya pengendalian biaya dan waktu sebagai bagian dari manajemen proyek konstruksi, sekaligus memperkuat temuan Franata et al. (2025) bahwa pengelolaan biaya berbasis siklus hidup menghasilkan keputusan investasi yang lebih efisien dibandingkan pengendalian biaya yang hanya berorientasi pada tahap konstruksi. Integrasi antara analisis teknis, Life Cycle Cost, evaluasi ekonomi, dan analisis sensitivitas pada penelitian ini menghasilkan kerangka pengambilan keputusan yang lebih komprehensif untuk mendukung pembangunan jalan tol yang berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pembangunan Jalan Tol Seksi X layak direalisasikan baik dari aspek teknis maupun ekonomi melalui pendekatan Life Cycle Cost (LCC) yang mengintegrasikan analisis kapasitas jalan, perancangan geometrik, desain perkerasan, dan evaluasi investasi. Hasil analisis teknis memperlihatkan bahwa nilai Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) sebesar 32.500 kendaraan per hari dengan proyeksi mencapai 132.000 kendaraan per hari pada akhir masa konsesi memerlukan pengembangan kapasitas jalan melalui konfigurasi 2×2 lajur yang ditingkatkan menjadi 2×3 lajur pada tahun ke-15, disertai penggunaan rigid pavement setebal 29 cm di atas lapis Lean Concrete setebal 10 cm. Analisis biaya siklus hidup menghasilkan estimasi Capital Expenditure (CAPEX) sebesar Rp2,45 triliun, dengan distribusi biaya operasi dan pemeliharaan yang masih mampu diimbangi oleh pertumbuhan pendapatan selama masa konsesi. Evaluasi ekonomi menghasilkan Net Present Value (NPV) sebesar Rp542 miliar, Internal Rate of Return (IRR) sebesar 12,45%, Benefit–Cost Ratio (BCR) sebesar 1,18, serta Payback Period (PP) selama 14 tahun 3 bulan, sehingga seluruh indikator memenuhi kriteria kelayakan investasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keputusan teknis yang tepat mampu meningkatkan efisiensi biaya sepanjang siklus hidup infrastruktur sekaligus menghasilkan tingkat pengembalian investasi yang berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan. Integrasi antara analisis teknis dan evaluasi ekonomi berbasis Life Cycle Cost memberikan dasar pengambilan

keputusan yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan yang hanya berorientasi pada biaya konstruksi awal.

Analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa proyek tetap berada pada kategori layak meskipun terjadi peningkatan biaya konstruksi sebesar 15% maupun penurunan pendapatan tol sebesar 10%, yang menunjukkan bahwa struktur investasi memiliki tingkat ketahanan yang cukup baik terhadap perubahan kondisi ekonomi. Temuan tersebut menegaskan bahwa pendekatan Life Cycle Cost tidak hanya mampu mengevaluasi kelayakan investasi pada kondisi dasar, tetapi juga memberikan gambaran mengenai tingkat risiko proyek selama masa layanan infrastruktur. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi yang menghubungkan keputusan rekayasa teknis dengan indikator ekonomi investasi dalam satu model analisis yang terintegrasi sehingga hubungan antara desain jalan, distribusi biaya, dan kinerja finansial dapat dijelaskan secara lebih komprehensif. Pendekatan tersebut dapat dijadikan referensi bagi pemerintah, badan usaha jalan tol, maupun investor dalam menyusun strategi pembangunan infrastruktur yang lebih efisien, adaptif, dan berorientasi pada keberlanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model dengan memasukkan analisis ketidakpastian berbasis simulasi, pemodelan permintaan lalu lintas yang lebih dinamis, serta evaluasi dampak lingkungan dan emisi karbon agar penilaian kelayakan pembangunan jalan tol dapat dilakukan secara lebih menyeluruh. Pengembangan tersebut diharapkan mampu memperkuat penerapan konsep Life Cycle Cost sebagai instrumen utama dalam perencanaan dan pengelolaan infrastruktur transportasi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiyah, R., Riskijah, S.S., & Lydianingtias, D. (2024). Analisis Kelayakan Finansial Proyek Pembangunan Jalan Tol ABCD Seksi 4. *JOS-MRK: Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi*, 5(3), 240-245. <https://doi.org/10.33795/jos-mrk.v5i3.5052>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Provinsi dalam Angka: Analisis Pertumbuhan Ekonomi dan Transportasi*. BPS: Jakarta.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering Economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education: New York.
- Dell'Isola, A. (1997). *Life Cycle Costing for Design Professionals (2nd Edition)*. McGraw-Hill.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1997). *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)*. Direktorat Jenderal Bina Marga: Jakarta.
- Farina, I., et al. (2020). Implementing Life Cycle Cost Analysis in Road Engineering: A Critical Review on Methodological Framework Choices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110284>
- Febrian, G., & Wibisono, M. A. (2025). Analisis Kelayakan Ekonomi Perancangan Pabrik Kelapa Sawit Mini Dengan Kapasitas 1000 Ton Per Tahun Menggunakan Metode Life Cycle Costing: Studi Kasus Desa Bukit Layang, Bangkabelitung. *Jurnal Sosial Teknologi*, 5(9), 3405-3415. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v5i9.32396>
- Franata, H., Honesti, L., & Nandikk, M. (2025). Analisis Pengendalian Biaya Konstruksi Dengan Metode Life Cycle Cost (LCC) pada jembatan. *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 3(3), 96-111. <https://doi.org/10.25077/jbk.3.3.96-111.2025>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) No. 02/M/BM/2017*. Direktorat Jenderal Bina Marga: Jakarta.
- Munizar, R. (2024). *Penerapan Earned Value Management (EVM) dalam Pengendalian Biaya dan Waktu Proyek Peningkatan Jalan* (Doctoral dissertation, Universitas Andalas).
- Nuzulia, F., & Negara, N. P. (2025). Analisis Kelayakan Investasi Proyek Pembangunan Jalan Tol Solo–Yogyakarta–Nyia Kulon Progo Seksi I Paket 1.1 Ruas Solo-Klaten. *Journal of Disaster Mitigation and Civil Engineering Research*, 3(1), 1-13. <https://doi.org/10.29080/jomcer.v3i1.2363>
- Oktaviani, S., & Ayu Angreni, I. . (2022). Analisis Life Cycle Cost Perkerasan Komposit dan Lentur Jalan Tol Jagorawi. *Jurnal Teknik Sipil*, 29 (1), 79-88. <https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.1.8>

- Park, C. S. (2019). *Contemporary Engineering Economics* (6th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- Prasetio, A., Khamid, A., Tolani, M., & Nurdin, A. L. (2025). Analisis Ekonomi Lapis Pondasi Bawah Telford Vs Rigid Pavement menggunakan Life Cycle Cost Analysis. *Era Sains: Jurnal Penelitian Sains, Keteknik dan Informatika*, 3(3), 6-11. <https://jurnal.eraliterasi.com/index.php/erasains/article/view/305>
- Prayogi, A. T., & Gunasti, A. (2026). Analisis Kelayakan Investasi Pembangunan Tol Layang Jakarta-Cikampek (MBZ) Menggunakan Metode NPV, IRR, BCR, dan Payback Period. *Journal of Science and Engineering*, 2(1), 22-29. <https://journal.ajbnews.com/index.php/prothon/article/view/306>
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova: Bandung.
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Geometrik Jalan*. Penerbit Nova: Bandung.
- Susanti, B., Wirahadikusumah, RD, Soemardi, BW, & Sutrisno, M. (2019). Analisis Life Cycle Cost Pilot Project PBC untuk Jalan di Indonesia. *Jurnal Teknik IIUM* , 20 (2), 57–69. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v20i2.1075>
- Walls, J., & Smith, M. (1998). *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design*. FHWA.
- Yuliatti, M. M. E., & Husin, A. E. (2024, February). Life cycle cost analysis in system dynamic modeling on Indonesia's green toll road. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2710, No. 1, p. 060009). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0144138>
- Zhafir, M.H.A., Burhamtoro, & Subkhan, M.F. (2024). Kelayakan Finansial dalam Perencanaan Pembangunan Jalan Tol Malang–Kepanjen. *JOS-MRK: Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi*, 5(3), 240-245. <https://doi.org/10.33795/jos-mrk.v5i3.4080>