



Analisis Ekonomi Rekayasa dan Keandalan Struktur Perkerasan Kaku pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X

Imawan Sumanto^{1*}, Rezi Munizar²

¹⁻² Universitas Ratu Samban Bengkulu Utara, Indonesia

email: imawansumanto@gmail.com¹

Article Info :

Received:
08-07-2026
Revised:
19-07-2026
Accepted:
27-07-2026

Abstract

The construction of the Trans-Sumatra Toll Road requires a pavement design strategy capable of ensuring both structural reliability and economic efficiency throughout the infrastructure's service life. This study aims to analyze the structural performance of rigid pavement and its economic feasibility through a Life Cycle Cost Analysis (LCCA) approach for the Trans-Sumatra Toll Road Project, Section X-Y. The research methodology employs an empirical study based on engineering analysis and technical-economic simulation, utilizing traffic data, subgrade characteristics, material parameters, and life cycle cost modeling. The results show that the optimal design consists of a concrete slab with a strength of f'_c 45 MPa and a thickness of 30 cm, a 10-cm layer of lean concrete, and a 15-cm layer of Class A aggregate to withstand a cumulative load of 1.2×10^8 ESAL over 40 years. The economic analysis yielded a positive NPV of Rp4.235 billion, an IRR of 13.42%, and a BCR of 1.28. Sensitivity testing showed that the investment remains feasible despite changes in construction costs and decreases in traffic volume. This study contributes to the development of road infrastructure evaluation based on the integration of structural performance and life-cycle economics.

Keywords: Rigid Pavement, Life Cycle Cost Analysis, Engineering Economics, Structural Reliability, Trans-Sumatra Toll Road.

Abstrak

Pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera membutuhkan strategi desain perkerasan yang mampu menjamin keandalan struktural sekaligus efisiensi ekonomi sepanjang umur pelayanan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja struktur perkerasan kaku dan kelayakan ekonominya melalui pendekatan Life Cycle Cost Analysis (LCCA) pada Proyek Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y. Metode penelitian menggunakan studi empiris berbasis analisis rekayasa dan simulasi teknis-ekonomi dengan memanfaatkan data lalu lintas, karakteristik tanah dasar, parameter material, serta pemodelan biaya siklus hidup. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain optimal terdiri atas pelat beton mutu f'_c 45 MPa dengan ketebalan 30 cm, Lean Concrete 10 cm, dan agregat kelas A 15 cm untuk menghadapi beban kumulatif sebesar $1,2 \times 10^8$ ESAL selama 40 tahun. Analisis ekonomi menghasilkan NPV positif sebesar Rp4,235 miliar, IRR 13,42%, dan BCR 1,28. Pengujian sensitivitas menunjukkan investasi tetap layak terhadap perubahan biaya konstruksi dan penurunan lalu lintas. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan evaluasi infrastruktur jalan berbasis integrasi kinerja struktural dan ekonomi siklus hidup.

Kata kunci: Perkerasan Kaku, Life Cycle Cost Analysis, Ekonomi Rekayasa, Keandalan Struktur, Jalan Tol Trans-Sumatera.



©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 infrastruktur transportasi jalan pada tingkat global menunjukkan adanya pergeseran paradigma dari pendekatan pembangunan berbasis kapasitas struktural menuju pendekatan pengelolaan aset yang mempertimbangkan kinerja jangka panjang, efisiensi ekonomi, serta keberlanjutan siklus hidup infrastruktur. Peningkatan mobilitas logistik, pertumbuhan kawasan industri, dan ekspansi jaringan jalan bebas hambatan telah menyebabkan struktur perkerasan menghadapi tuntutan beban lalu lintas yang semakin kompleks, khususnya akibat peningkatan volume kendaraan berat dan fenomena kelebihan muatan yang mempercepat degradasi struktur jalan. Pemilihan tipe perkerasan tidak lagi dapat didasarkan hanya pada pertimbangan biaya konstruksi awal, tetapi harus mempertimbangkan hubungan antara kapasitas struktural, pola kerusakan, kebutuhan pemeliharaan, serta konsekuensi ekonomi selama masa pelayanan infrastruktur. Pendekatan Life Cycle Cost Analysis

(LCCA) berkembang sebagai salah satu instrumen penting dalam pengambilan keputusan teknik karena mampu mengintegrasikan biaya awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, hingga nilai sisa aset dalam satu kerangka evaluasi ekonomi yang mempertimbangkan nilai waktu uang (Blank & Tarquin, 2018). Dalam praktik pembangunan jalan nasional di Indonesia, prinsip tersebut semakin relevan seiring meningkatnya investasi pemerintah pada proyek strategis nasional, terutama Jalan Tol Trans-Sumatera yang dirancang sebagai koridor utama penghubung pusat-pusat ekonomi regional dan jalur distribusi nasional. Standar perencanaan perkerasan yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat melalui Manual Desain Perkerasan Jalan menempatkan aspek umur rencana, beban lalu lintas kumulatif, kondisi tanah dasar, serta karakteristik material sebagai parameter fundamental dalam memastikan keandalan struktur perkerasan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa perkerasan kaku (*rigid pavement*) memiliki keunggulan mekanis dibandingkan perkerasan lentur ketika diterapkan pada jalan dengan intensitas lalu lintas berat dan kebutuhan umur pelayanan yang panjang. Karakteristik modulus elastisitas beton yang tinggi memungkinkan distribusi tegangan secara lebih luas melalui mekanisme aksi balok, sehingga deformasi permanen akibat beban kendaraan berat dapat diminimalkan. Penelitian Ardiansyah dan Sudibyo (2020) menunjukkan bahwa perencanaan ketebalan perkerasan kaku pada proyek jalan tol membutuhkan analisis beban lalu lintas, karakteristik tanah dasar, serta parameter material secara simultan agar diperoleh struktur yang memenuhi tingkat pelayanan yang dipersyaratkan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa desain perkerasan tidak hanya merupakan persoalan penentuan dimensi geometrik lapisan, tetapi juga berkaitan dengan kemampuan struktur dalam mempertahankan kinerja selama periode operasional. Studi mengenai pelaksanaan konstruksi rigid pavement pada beberapa proyek jalan tol di Indonesia juga memperlihatkan bahwa keberhasilan sistem perkerasan kaku sangat dipengaruhi oleh konsistensi pengendalian mutu beton, metode pengecoran, ketepatan sambungan, serta pengawasan pelaksanaan di lapangan (Subagyo & Nurokhman, 2021; Hakiki & Pandjaitan, 2024). Penelitian Purba dan Bago (2025) serta Yudhistira et al. (2025) memperkuat perspektif tersebut dengan menunjukkan bahwa aspek teknologi pelaksanaan, seperti penggunaan slipform paver dan optimalisasi produktivitas konstruksi, menjadi faktor penting dalam menjamin kualitas struktur sekaligus mengendalikan biaya pembangunan jalan tol.

Literatur sebelumnya juga memperlihatkan bahwa dimensi ekonomi dalam pemilihan tipe perkerasan masih menjadi isu yang membutuhkan kajian lebih mendalam. Sebagian penelitian lebih banyak berfokus pada aspek teknis berupa desain tebal perkerasan, metode pelaksanaan, dan pengendalian mutu konstruksi, sementara evaluasi komprehensif mengenai hubungan antara keandalan struktur dan konsekuensi ekonomi sepanjang umur layanan masih relatif terbatas. Studi Farid (2013) telah memberikan gambaran mengenai perbandingan biaya konstruksi jalan beton dan jalan aspal berdasarkan pendekatan umur rencana, namun pendekatan tersebut masih memiliki keterbatasan karena belum sepenuhnya mengintegrasikan parameter risiko, perubahan kondisi ekonomi, serta sensitivitas terhadap variasi biaya masa depan. Kondisi serupa terlihat dalam beberapa penelitian konstruksi jalan tol yang lebih menitikberatkan pada aspek teknis implementasi dibandingkan evaluasi investasi berbasis siklus hidup (Soekarno & Hari Murti, 2022). Perkembangan biaya konstruksi yang dipengaruhi oleh fluktuasi harga material, inflasi sektor konstruksi, serta dinamika ekonomi nasional semakin memperkuat kebutuhan terhadap model evaluasi yang mampu menjembatani aspek rekayasa struktur dan aspek finansial secara simultan. Data perkembangan indeks harga konsumen dan inflasi sektor konstruksi menunjukkan bahwa perubahan biaya material dan jasa konstruksi memiliki pengaruh signifikan terhadap estimasi biaya proyek infrastruktur jangka panjang, sehingga analisis ekonomi yang hanya menggunakan nilai awal konstruksi berpotensi menghasilkan keputusan investasi yang kurang representatif (Badan Pusat Statistik, 2025).

Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan adanya keterbatasan konseptual dan empiris dalam pendekatan evaluasi perkerasan jalan di Indonesia, khususnya pada proyek jalan tol dengan karakteristik beban lalu lintas tinggi seperti Jalan Tol Trans-Sumatera. Sebagian besar kajian terdahulu masih memisahkan analisis teknis dan analisis ekonomi sebagai dua domain yang berdiri sendiri, sehingga belum banyak menjelaskan bagaimana tingkat keandalan struktural suatu desain perkerasan berhubungan langsung dengan efisiensi biaya selama umur pelayanan. Pendekatan yang hanya menilai kemampuan struktur berdasarkan parameter teknis berpotensi mengabaikan konsekuensi ekonomi akibat pemeliharaan berulang, gangguan operasional, maupun biaya pengguna jalan yang muncul ketika

terjadi penurunan kinerja perkerasan. Sebaliknya, evaluasi ekonomi tanpa mempertimbangkan karakteristik mekanistik struktur dapat menghasilkan keputusan investasi yang tidak optimal karena biaya rendah pada tahap awal belum tentu memberikan efisiensi sepanjang siklus hidup aset. Standar teknis nasional sebenarnya telah memberikan kerangka desain melalui Manual Desain Perkerasan Jalan dan Spesifikasi Umum Bina Marga, namun implementasi analisis yang menghubungkan desain struktur, biaya siklus hidup, dan kelayakan investasi masih membutuhkan pengembangan kajian yang lebih integratif (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

Permasalahan tersebut memiliki urgensi ilmiah dan praktis yang tinggi mengingat Jalan Tol Trans-Sumatera merupakan salah satu infrastruktur strategis yang memiliki fungsi ekonomi jangka panjang dalam mendukung konektivitas nasional. Keputusan pemilihan jenis perkerasan pada proyek dengan investasi besar tidak hanya menentukan kualitas pelayanan jalan, tetapi juga memengaruhi efisiensi penggunaan anggaran publik, keberlanjutan biaya operasional badan usaha jalan tol, serta tingkat keandalan jaringan transportasi nasional. Kondisi lalu lintas berat, variasi karakteristik tanah dasar, serta potensi perubahan ekonomi selama masa operasi menjadikan evaluasi berbasis umur layanan sebagai kebutuhan yang tidak dapat diabaikan. Penelitian mengenai metode pelaksanaan rigid pavement pada berbagai proyek jalan tol menunjukkan bahwa peningkatan kualitas konstruksi telah menjadi perhatian utama, tetapi integrasi antara kualitas struktur yang dihasilkan dengan implikasi ekonominya masih belum banyak dikembangkan dalam satu model analisis yang komprehensif (Purba & Bago, 2025; Wulandari & Wacono, 2025). Posisi penelitian ini ditempatkan dalam ruang kajian tersebut dengan menghadirkan pendekatan integratif yang menggabungkan analisis keandalan struktur perkerasan kaku berdasarkan parameter desain teknis dengan evaluasi ekonomi rekayasa berbasis Life Cycle Cost Analysis.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara performa struktural perkerasan kaku dan kelayakan ekonomi pada proyek pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y melalui pendekatan yang mengintegrasikan desain teknis, estimasi biaya siklus hidup, dan evaluasi kelayakan investasi. Kajian ini diarahkan untuk menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana keputusan desain perkerasan dapat memberikan nilai optimal tidak hanya dari sisi kekuatan struktur, tetapi juga dari perspektif efisiensi biaya jangka panjang. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka analisis yang mempertemukan konsep rekayasa perkerasan dan ekonomi investasi dalam evaluasi infrastruktur jalan, sedangkan kontribusi metodologisnya diwujudkan melalui penerapan kombinasi perhitungan desain berdasarkan standar nasional, analisis *Life Cycle Cost*, serta pengujian sensitivitas terhadap perubahan variabel ekonomi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam proses pengambilan keputusan desain dan manajemen aset jalan tol yang lebih rasional, adaptif, serta berorientasi pada keberlanjutan infrastruktur transportasi di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis analisis rekayasa dan simulasi teknis-ekonomi, karena menggunakan data aktual proyek, parameter desain struktur, serta pemodelan perhitungan untuk mengevaluasi kinerja dan kelayakan investasi perkerasan kaku pada pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y. Metodologi penelitian dikembangkan melalui integrasi dua pendekatan utama, yaitu pendekatan rekayasa struktur perkerasan dan pendekatan ekonomi rekayasa berbasis siklus hidup aset. Tahap awal penelitian dilakukan melalui pengumpulan dan pengolahan data teknis yang meliputi volume lalu lintas harian rata-rata (LHR), distribusi kendaraan berat, faktor kerusakan kendaraan (Vehicle Damage Factor/VDF), karakteristik tanah dasar berdasarkan nilai California Bearing Ratio (CBR), mutu material beton, serta parameter lingkungan dan operasional jalan. Data tersebut digunakan dalam simulasi desain struktur perkerasan kaku berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP 2017) untuk menentukan konfigurasi lapisan perkerasan optimal melalui perhitungan beban gandar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL) selama umur rencana 40 tahun. Pengembangan model analisis dilakukan dengan menyusun skenario biaya siklus hidup yang mencakup biaya investasi awal (*capital expenditure*), biaya pemeliharaan rutin, biaya pemeliharaan berkala, serta nilai sisa struktur pada akhir periode analisis. Integrasi antara hasil desain teknis dan pemodelan ekonomi tersebut menjadi pendekatan inovatif penelitian ini karena tidak hanya mengevaluasi kapasitas struktural perkerasan, tetapi juga mengukur konsekuensi finansial dari setiap keputusan desain sepanjang masa pelayanan infrastruktur.

Validasi metodologis dilakukan melalui evaluasi kesesuaian hasil desain terhadap standar teknis nasional, khususnya ketentuan Manual Desain Perkerasan Jalan dan Spesifikasi Umum Bina Marga, serta melalui pengujian kelayakan ekonomi menggunakan indikator kuantitatif berupa Net Present Value (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR). Keandalan struktur dievaluasi berdasarkan kemampuan konfigurasi perkerasan dalam memenuhi kebutuhan beban lalu lintas kumulatif, umur rencana, serta karakteristik dukungan tanah dasar, sedangkan performa ekonomi divalidasi melalui analisis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan penerapan tingkat diskonto untuk mengkonversi seluruh komponen biaya masa depan ke nilai sekarang. Ketahanan hasil penelitian diuji menggunakan analisis sensitivitas terhadap perubahan kondisi eksternal, meliputi skenario peningkatan biaya konstruksi dan penurunan volume lalu lintas, guna mengetahui stabilitas keputusan investasi terhadap ketidakpastian ekonomi. Kombinasi evaluasi teknis, analisis finansial, dan pengujian sensitivitas tersebut memberikan kerangka validasi yang komprehensif untuk memastikan bahwa rekomendasi desain perkerasan kaku tidak hanya memenuhi aspek kekuatan struktur, tetapi juga menghasilkan alternatif investasi infrastruktur yang efisien, berkelanjutan, dan memiliki tingkat keandalan tinggi dalam perspektif manajemen aset jalan tol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kinerja Struktural dan Desain Perkerasan Kaku Berdasarkan Beban Lalu Lintas dan Karakteristik Material

Hasil analisis empiris terhadap desain struktur perkerasan kaku pada proyek pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y menunjukkan bahwa konfigurasi struktur sangat dipengaruhi oleh karakteristik beban lalu lintas kumulatif, kapasitas dukung tanah dasar, serta mutu material beton yang digunakan. Pengolahan data lalu lintas menghasilkan nilai Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL) sebesar $1,2 \times 10^8$ ESAL selama periode umur rencana 40 tahun, yang menunjukkan tingkat pembebanan tinggi dan membutuhkan struktur dengan kapasitas resistensi terhadap kerusakan berulang. Parameter tersebut menjadi dasar utama dalam menentukan kebutuhan tebal pelat beton melalui pendekatan desain berbasis kinerja sebagaimana diarahkan dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Karakteristik pembebanan tersebut memperlihatkan bahwa pemilihan perkerasan kaku memiliki relevansi teknis karena mekanisme distribusi tegangan melalui aksi balok mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada lapisan tanah dasar dibandingkan sistem perkerasan lentur.

Simulasi desain menggunakan parameter material dan kondisi lapangan menghasilkan struktur perkerasan yang terdiri atas pelat beton semen mutu $f'c$ 45 MPa dengan ketebalan nominal 30 cm, lapisan Lean Concrete setebal 10 cm, serta lapisan agregat kelas A sebesar 15 cm. Konfigurasi tersebut diperoleh melalui evaluasi hubungan antara kebutuhan kapasitas struktural, faktor distribusi beban kendaraan, dan kemampuan material dalam mempertahankan kekuatan selama umur pelayanan. Studi Ardiansyah dan Sudibyo (2020) menunjukkan bahwa desain perkerasan kaku pada jalan tol membutuhkan pendekatan analitis yang mempertimbangkan interaksi antara beban kendaraan, karakteristik beton, dan kondisi fondasi agar tidak terjadi kegagalan prematur. Hasil penelitian tersebut memperkuat temuan bahwa ketebalan pelat bukan hanya merupakan parameter geometrik, tetapi menjadi representasi kemampuan struktur dalam mengendalikan tegangan lentur akibat repetisi beban lalu lintas.

Evaluasi karakteristik tanah dasar menunjukkan bahwa nilai CBR efektif setelah dilakukan perbaikan mencapai 12%, sehingga memberikan dukungan struktural yang memadai terhadap pelat beton selama pelayanan. Peningkatan kualitas tanah dasar menjadi faktor penting karena ketidakseragaman dukungan fondasi dapat memicu fenomena pumping, retak sudut, dan penurunan diferensial pada struktur perkerasan kaku. Pendekatan desain berdasarkan MDP 2017 menempatkan parameter daya dukung tanah dasar sebagai salah satu variabel utama dalam menentukan tingkat keandalan struktur perkerasan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi lapisan bawah tidak hanya berfungsi sebagai elemen pendukung konstruksi, tetapi juga sebagai mekanisme pengendalian risiko kerusakan struktural jangka panjang.

Tabel 1. menyajikan parameter utama hasil analisis desain struktur perkerasan kaku yang digunakan dalam simulasi penelitian ini. Data tersebut memperlihatkan hubungan antara karakteristik teknis, nilai desain, dan fungsi masing-masing elemen struktur terhadap kemampuan pelayanan jalan

tol. Variabel seperti mutu beton, ketebalan pelat, dan nilai CBR efektif menjadi indikator utama dalam menentukan tingkat keandalan struktur yang dihasilkan. Penggunaan parameter desain tersebut selaras dengan spesifikasi teknis konstruksi jalan nasional yang mengatur persyaratan mutu material dan metode pelaksanaan pekerjaan perkerasan beton semen (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

Tabel 1. Parameter Hasil Desain Struktur Perkerasan Kaku Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y

Parameter Desain	Nilai Hasil Analisis Fungsi Teknis	
Umur rencana	40 tahun	Periode evaluasi kinerja struktur
Beban lalu lintas kumulatif	$1,2 \times 10^8$ ESAL	Dasar penentuan kapasitas struktur
CBR tanah dasar efektif	12%	Parameter dukungan fondasi
Mutu beton pelat	f'c 45 MPa	Kapasitas kekuatan material
Tebal pelat beton	30 cm	Elemen utama penahan beban
Lean Concrete	10 cm	Stabilitas lapisan fondasi
Agregat Kelas A	15 cm	Drainase dan distribusi dukungan

Interpretasi terhadap data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa desain struktur memiliki konfigurasi yang sesuai untuk menghadapi karakteristik lalu lintas berat pada koridor Jalan Tol Trans-Sumatera. Ketebalan pelat beton sebesar 30 cm memberikan keseimbangan antara kebutuhan kekuatan lentur dan efisiensi penggunaan material konstruksi. Penelitian Setiawan dan Supratman (2025) menunjukkan bahwa beton dengan mutu f'c 45 MPa memiliki kemampuan mekanis yang sesuai untuk aplikasi rigid pavement karena mampu memberikan kombinasi kekuatan tekan dan lentur yang diperlukan pada struktur jalan dengan beban tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemilihan mutu beton menjadi aspek strategis dalam menjaga stabilitas struktur sekaligus mengurangi kebutuhan pemeliharaan selama masa operasional.

Analisis lebih lanjut terhadap mekanisme kerusakan menunjukkan bahwa struktur perkerasan kaku yang dirancang memiliki kemampuan lebih baik dalam menghadapi pengaruh kendaraan berat dibandingkan struktur dengan fleksibilitas tinggi. Pelat beton bekerja mendistribusikan beban roda secara menyebar sehingga tegangan yang diterima tanah dasar menjadi lebih rendah dan lebih seragam. Konsep tersebut sesuai dengan teori analisis perkerasan yang menjelaskan bahwa rigid pavement memiliki karakteristik distribusi tegangan berbasis kekakuan pelat, bukan semata-mata berdasarkan jumlah lapisan struktural (Huang, 2004). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pendekatan desain berbasis mekanisme keruntuhan memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap tingkat keandalan struktur dibandingkan pendekatan yang hanya mempertimbangkan biaya awal konstruksi.

Keandalan desain juga dipengaruhi oleh kualitas pelaksanaan konstruksi karena variasi mutu lapangan dapat menyebabkan perbedaan antara kapasitas desain dan kinerja aktual struktur. Evaluasi beberapa proyek jalan tol menunjukkan bahwa pengendalian sambungan, proses curing beton, konsistensi pengecoran, dan akurasi penggunaan peralatan menjadi faktor penting dalam mencapai mutu rigid pavement sesuai spesifikasi. Hakiki dan Pandjaitan (2024) menjelaskan bahwa inspeksi pekerjaan perkerasan kaku pada proyek Jalan Tol Trans-Sumatera Kapalbetung menunjukkan perlunya pengawasan ketat terhadap aspek pelaksanaan untuk memastikan hasil konstruksi memenuhi standar teknis. Temuan tersebut memberikan implikasi bahwa desain struktural harus selalu dikombinasikan dengan strategi pengendalian mutu agar prediksi umur pelayanan dapat tercapai.

Aspek produktivitas konstruksi juga menjadi bagian penting dalam mempertahankan keandalan struktur yang telah dirancang secara teoritis. Penggunaan teknologi modern seperti slipform paver memberikan pengaruh terhadap konsistensi dimensi pelat, kecepatan pekerjaan, dan keseragaman kualitas permukaan beton. Penelitian Yudhistira et al. (2025) menunjukkan bahwa produktivitas alat slipform paver pada proyek rigid pavement jalan tol memiliki hubungan erat dengan efisiensi waktu konstruksi dan stabilitas kualitas hasil pekerjaan. Variabel tersebut menjadi bagian dari evaluasi empiris karena keberhasilan struktur tidak hanya ditentukan oleh desain akhir, tetapi juga oleh kemampuan sistem konstruksi menghasilkan elemen perkerasan sesuai parameter perencanaan.

Hasil evaluasi teknis juga menunjukkan bahwa penggunaan metode desain berbasis MDP 2017 memberikan tingkat kesesuaian yang baik terhadap karakteristik proyek jalan tol dengan lalu lintas berat. Perbandingan metode desain yang dilakukan pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perbedaan pendekatan analitis dapat menghasilkan variasi ketebalan struktur sehingga pemilihan metode menjadi faktor penting dalam optimasi desain. Wibawa et al. (2025) mengidentifikasi adanya variasi hasil perhitungan struktur perkerasan kaku antara metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan pedoman terbaru, sehingga diperlukan pemilihan metode yang sesuai dengan kondisi lokal dan karakteristik pembebanan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan MDP 2017 mampu memberikan konfigurasi yang rasional karena mempertimbangkan kondisi lalu lintas dan karakteristik material yang relevan dengan infrastruktur jalan Indonesia.

Keberhasilan desain perkerasan kaku juga memiliki implikasi terhadap aspek keberlanjutan karena umur pelayanan yang panjang berpotensi mengurangi frekuensi intervensi pemeliharaan dan konsumsi sumber daya selama siklus hidup aset. Analisis terhadap penggunaan energi dan emisi konstruksi menunjukkan bahwa setiap alternatif material memiliki konsekuensi lingkungan yang perlu dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan teknik. Lendra et al. (2022) menjelaskan bahwa perbedaan karakteristik perkerasan lentur dan kaku menghasilkan variasi konsumsi energi serta emisi gas rumah kaca selama tahapan konstruksi dan operasional. Perspektif tersebut memperluas interpretasi hasil penelitian bahwa keandalan struktural harus dipahami tidak hanya dari aspek kekuatan mekanis, tetapi juga dari kemampuan infrastruktur memberikan manfaat jangka panjang secara teknis dan lingkungan.

Hasil analisis keseluruhan pada aspek desain struktural menunjukkan bahwa konfigurasi perkerasan kaku Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y memiliki tingkat kelayakan teknis yang memadai berdasarkan parameter beban lalu lintas, kualitas material, dan kondisi fondasi. Struktur dengan pelat beton 30 cm dan mutu f'_c 45 MPa mampu memenuhi kebutuhan pelayanan selama umur rencana 40 tahun berdasarkan pendekatan simulasi desain. Temuan tersebut konsisten dengan penelitian mengenai evaluasi desain rigid pavement yang menempatkan kombinasi ESAL, mutu beton, dan kondisi tanah dasar sebagai faktor utama penentu keberhasilan struktur (Apituley et al., 2026). Hasil ini menjadi dasar analisis lanjutan mengenai hubungan antara performa teknis struktur dan konsekuensi ekonomi melalui pendekatan Life Cycle Cost Analysis pada tahap berikutnya.

Analisis Life Cycle Cost dan Kelayakan Ekonomi Perkerasan Kaku Berdasarkan Siklus Hidup Infrastruktur

Analisis ekonomi rekayasa pada penelitian ini dilakukan melalui pendekatan Life Cycle Cost Analysis (LCCA) untuk mengevaluasi konsekuensi finansial dari penerapan struktur perkerasan kaku selama umur pelayanan 40 tahun. Hasil pengolahan data biaya menunjukkan bahwa investasi awal pembangunan rigid pavement memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan alternatif perkerasan dengan biaya konstruksi awal yang lebih rendah, namun karakteristik pemeliharaan yang lebih minimal memberikan pengaruh terhadap total biaya kepemilikan aset. Pendekatan LCCA digunakan karena mampu menggambarkan hubungan antara pengeluaran awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan nilai ekonomi akhir aset secara lebih komprehensif dibandingkan metode evaluasi berbasis biaya awal saja (Walls & Smith, 1998). Analisis ini menjadi bagian penting dalam penelitian karena keputusan desain infrastruktur jalan tol membutuhkan perspektif ekonomi jangka panjang yang mempertimbangkan nilai waktu uang.

Hasil perhitungan biaya konstruksi menunjukkan bahwa kebutuhan investasi awal perkerasan kaku pada ruas jalan yang dianalisis mencapai Rp14.500.000.000 per kilometer untuk struktur lengkap yang mencakup pekerjaan persiapan, lapisan fondasi, pelat beton, penulangan, dan elemen pendukung lainnya. Nilai tersebut menunjukkan konsekuensi finansial awal yang relatif besar akibat penggunaan material beton mutu tinggi dan kebutuhan teknologi pelaksanaan khusus. Farid (2013) menjelaskan bahwa struktur jalan beton cenderung membutuhkan biaya awal lebih besar dibandingkan jalan aspal, tetapi memiliki potensi efisiensi apabila dianalisis berdasarkan keseluruhan umur rencana. Interpretasi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi ekonomi terhadap perkerasan tidak dapat berhenti pada tahap konstruksi, karena karakteristik biaya pemeliharaan menjadi faktor yang menentukan efisiensi aktual aset.

Perhitungan komponen biaya siklus hidup dilakukan dengan mempertimbangkan tingkat diskonto sebesar 10% per tahun untuk mengkonversi seluruh pengeluaran masa depan menjadi nilai

sekarang. Parameter diskonto tersebut digunakan untuk menggambarkan nilai ekonomi aktual dari biaya pemeliharaan yang terjadi pada tahun-tahun berikutnya selama periode operasi. Metode present value dalam ekonomi rekayasa memungkinkan perbandingan yang lebih objektif antara alternatif desain dengan pola distribusi biaya yang berbeda sepanjang masa pelayanan (Blank & Tarquin, 2018). Pendekatan tersebut memberikan gambaran bahwa struktur dengan investasi awal tinggi dapat menghasilkan keuntungan ekonomi apabila memiliki frekuensi rehabilitasi yang lebih rendah.

Tabel 2 memperlihatkan distribusi biaya nominal perkerasan kaku berdasarkan periode pengeluaran selama umur rencana 40 tahun. Data tersebut menunjukkan bahwa komponen biaya terbesar terjadi pada tahap konstruksi awal, sedangkan biaya operasional tahunan memiliki nilai relatif kecil karena karakteristik rigid pavement yang membutuhkan intervensi pemeliharaan lebih rendah. Pemisahan antara biaya awal dan biaya masa depan diperlukan untuk mengetahui pola konsumsi sumber daya selama siklus hidup struktur. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip manajemen aset jalan yang menilai kinerja infrastruktur berdasarkan total biaya kepemilikan, bukan hanya berdasarkan investasi awal (Shahin, 2005).

Tabel 2. Komponen Biaya Siklus Hidup Perkerasan Kaku Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y

Tahun Pelaksanaan	Komponen Biaya	Nilai (Rupiah)	Nominal	Keterangan
0	Konstruksi awal rigid pavement	14.500.000.000		Investasi awal struktur
1–40	Pemeliharaan rutin tahunan	75.000.000/tahun		Sealant, drainase, marka
10	Pemeliharaan berkala tahap I	450.000.000		Patching dan perbaikan minor
20	Pemeliharaan berkala tahap II	850.000.000		Grinding permukaan
30	Pemeliharaan berkala tahap III	1.800.000.000		Overlay tipis
40	Salvage value	-2.500.000.000		Nilai sisa aset

Berdasarkan data pada Tabel 2, struktur biaya menunjukkan pola distribusi yang mendukung karakteristik ekonomi perkerasan kaku sebagai aset jangka panjang. Biaya pemeliharaan rutin sebesar Rp75.000.000 per tahun memiliki kontribusi relatif kecil dibandingkan investasi awal karena kerusakan struktural utama dapat dikendalikan melalui desain kapasitas yang memadai. Penelitian Azhar et al. (2024) menunjukkan bahwa evaluasi ekonomi antara perkerasan lentur dan kaku melalui metode MDP 2017 memperlihatkan adanya perbedaan pola pengeluaran selama umur layanan, dimana rigid pavement cenderung memberikan keuntungan pada fase operasional. Kondisi tersebut memperkuat hasil penelitian bahwa biaya awal yang tinggi dapat dikompensasi melalui pengurangan kebutuhan rehabilitasi jangka panjang.

Analisis nilai sekarang menunjukkan bahwa total biaya siklus hidup mengalami perubahan signifikan setelah penerapan faktor diskonto terhadap biaya masa depan. Pemeliharaan pada tahun ke-10, tahun ke-20, dan tahun ke-30 memiliki nilai ekonomi lebih rendah dibandingkan nilai nominalnya karena adanya pengaruh depresiasi nilai uang terhadap waktu. Konsep tersebut menjadi dasar utama dalam analisis investasi teknik karena keputusan pembangunan harus mempertimbangkan nilai aktual dari setiap pengeluaran yang terjadi sepanjang periode pelayanan (Blank & Tarquin, 2018). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pendekatan LCCA memberikan informasi yang lebih realistis mengenai efisiensi struktur dibandingkan analisis biaya konvensional.

Perhitungan indikator kelayakan investasi menunjukkan bahwa nilai Net Present Value (NPV) proyek mencapai +Rp4.235.000.000, sehingga investasi perkerasan kaku berada dalam kategori menguntungkan secara ekonomi. Nilai Internal Rate of Return (IRR) yang diperoleh sebesar 13,42% juga menunjukkan tingkat pengembalian yang lebih tinggi dibandingkan Minimum Attractive Rate of Return (MARR) sebesar 10%. Rasio Benefit-Cost Ratio (BCR) sebesar 1,28 memperlihatkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup

proyek. Parameter tersebut merupakan indikator utama dalam pengambilan keputusan investasi infrastruktur karena mampu mengukur tingkat efisiensi penggunaan sumber daya finansial (Walls & Smith, 1998).

Hasil analisis ekonomi tersebut memperlihatkan bahwa perkerasan kaku memiliki keunggulan strategis pada proyek jalan tol yang memiliki karakteristik lalu lintas tinggi dan umur pelayanan panjang. Keuntungan ekonomi tidak berasal dari rendahnya biaya awal, tetapi dari kemampuan struktur mempertahankan kinerja sehingga frekuensi perbaikan besar dapat ditekan. Studi Farid (2013) menemukan bahwa evaluasi umur rencana memberikan perspektif berbeda dibandingkan perbandingan biaya konstruksi langsung karena biaya pemeliharaan dan rehabilitasi memiliki pengaruh besar terhadap total investasi. Temuan penelitian ini memperluas pemahaman bahwa keputusan pemilihan tipe perkerasan harus mempertimbangkan keseimbangan antara performa teknis dan efisiensi ekonomi.

Validasi terhadap aspek biaya juga mempertimbangkan faktor eksternal berupa perubahan harga material konstruksi dan kondisi ekonomi nasional. Data inflasi sektor konstruksi menunjukkan bahwa perubahan harga bahan bangunan dapat memengaruhi estimasi biaya proyek infrastruktur, terutama pada proyek dengan periode pembangunan dan operasi yang panjang (Badan Pusat Statistik, 2025). Pengujian sensitivitas dilakukan untuk mengetahui ketahanan keputusan investasi terhadap kondisi ekonomi yang tidak pasti. Pendekatan tersebut memberikan gambaran bahwa model ekonomi yang digunakan tidak hanya menggambarkan kondisi ideal, tetapi juga mampu mengakomodasi variasi risiko finansial.

Hasil simulasi sensitivitas terhadap kenaikan biaya konstruksi sebesar 15% menunjukkan bahwa nilai NPV tetap positif sebesar Rp2.060.000.000 dengan IRR sebesar 11,15%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proyek masih memiliki tingkat kelayakan meskipun terjadi peningkatan biaya material dan pelaksanaan konstruksi. Analisis terhadap penurunan pendapatan akibat penurunan volume lalu lintas sebesar 20% juga menghasilkan NPV positif sebesar Rp1.120.000.000 dengan IRR sebesar 10,45%, yang menunjukkan tingkat ketahanan investasi terhadap perubahan permintaan pengguna jalan. Pendekatan pengujian risiko semacam ini penting diterapkan pada proyek infrastruktur karena faktor eksternal ekonomi dapat memengaruhi tingkat pengembalian investasi selama periode operasional.

Integrasi hasil analisis teknis dan ekonomi menunjukkan bahwa perkerasan kaku pada Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y memiliki karakteristik investasi yang stabil berdasarkan indikator kelayakan finansial dan kemampuan mempertahankan fungsi pelayanan. Struktur beton mutu tinggi memberikan keuntungan teknis melalui peningkatan kapasitas beban, sedangkan pendekatan LCCA menunjukkan bahwa keuntungan tersebut menghasilkan efisiensi biaya dalam jangka panjang. Temuan ini sejalan dengan kajian manajemen perkerasan yang menempatkan evaluasi siklus hidup sebagai instrumen penting dalam optimalisasi keputusan pemeliharaan dan investasi aset transportasi (Shahin, 2005). Hasil penelitian ini menjadi dasar bahwa strategi pembangunan jalan tol modern perlu mengintegrasikan aspek desain struktural, analisis ekonomi, dan pengelolaan risiko secara simultan.

Analisis Sensitivitas, Keandalan Investasi, dan Implikasi Strategis Pengelolaan Infrastruktur Perkerasan Kaku

Evaluasi akhir penelitian dilakukan melalui analisis sensitivitas untuk mengukur tingkat ketahanan keputusan investasi perkerasan kaku terhadap perubahan variabel ekonomi dan operasional yang berpotensi terjadi selama masa pelayanan jalan tol. Pendekatan ini diperlukan karena proyek infrastruktur transportasi memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi akibat dinamika harga material, perubahan pola mobilitas, serta fluktuasi pertumbuhan ekonomi regional. Analisis sensitivitas memberikan gambaran mengenai sejauh mana perubahan parameter utama dapat memengaruhi indikator kelayakan investasi seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Benefit-Cost Ratio (BCR). Kerangka evaluasi tersebut sejalan dengan konsep ekonomi rekayasa yang menempatkan risiko dan variabilitas parameter sebagai komponen penting dalam pengambilan keputusan investasi teknik (Blank & Tarquin, 2018).

Skenario pertama dalam pengujian sensitivitas dilakukan melalui simulasi peningkatan biaya konstruksi awal sebesar 15% yang merepresentasikan kemungkinan kenaikan harga material utama seperti semen, baja tulangan, dan agregat akibat tekanan inflasi sektor konstruksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai investasi masih menghasilkan NPV positif sebesar Rp2.060.000.000 dengan nilai IRR sebesar 11,15%, meskipun terjadi penurunan tingkat keuntungan dibandingkan kondisi dasar.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur investasi memiliki margin keamanan ekonomi yang cukup karena peningkatan biaya awal tidak secara langsung menghilangkan kelayakan proyek. Fenomena tersebut memperlihatkan pentingnya penggunaan analisis berbasis siklus hidup dibandingkan evaluasi berdasarkan biaya awal karena keputusan investasi dipengaruhi oleh distribusi biaya dan manfaat selama periode pelayanan (Walls & Smith, 1998).

Skenario kedua dilakukan dengan mensimulasikan penurunan pendapatan akibat penurunan volume lalu lintas sebesar 20% dari proyeksi awal, yang menggambarkan kemungkinan perubahan pola perjalanan, perlambatan pertumbuhan ekonomi, atau pergeseran moda transportasi. Hasil analisis menunjukkan nilai NPV tetap berada pada angka positif sebesar Rp1.120.000.000 dengan IRR mencapai 10,45%, sehingga proyek masih berada di atas tingkat pengembalian minimum yang ditetapkan. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa struktur pembiayaan dan desain teknis yang digunakan memiliki tingkat ketahanan terhadap perubahan kondisi eksternal. Pendekatan evaluasi risiko melalui variasi parameter ekonomi menjadi metode penting dalam studi infrastruktur karena karakteristik proyek jalan tol memiliki periode operasi yang panjang dan rentan terhadap perubahan lingkungan ekonomi (Badan Pusat Statistik, 2025).

Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil analisis ekonomi antara kondisi dasar dan dua skenario sensitivitas yang digunakan dalam penelitian. Data tersebut memperlihatkan perubahan nilai indikator investasi akibat perubahan variabel eksternal tanpa mengubah konfigurasi teknis struktur perkerasan yang telah dirancang. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi tingkat stabilitas keputusan investasi serta kemampuan struktur dalam mempertahankan kelayakan ekonomi. Pendekatan analisis semacam ini memperkuat metode penelitian karena tidak hanya mengandalkan hasil perhitungan pada kondisi normal, tetapi juga menguji respons model terhadap kemungkinan gangguan eksternal.

Tabel 3. Hasil Analisis Sensitivitas Kelayakan Investasi Perkerasan Kaku Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y

Skenario Analisis Perubahan Parameter		NPV	IRR	Status Kelayakan
Kondisi Dasar	Parameter normal	Rp4.235.000.000	13,42%	Layak
Skenario A	Biaya konstruksi meningkat 15%	Rp2.060.000.000	11,15%	Layak
Skenario B	Pendapatan tol turun 20%	Rp1.120.000.000	10,45%	Layak

Interpretasi terhadap Tabel 3 menunjukkan bahwa perubahan kondisi eksternal memang memberikan pengaruh terhadap penurunan performa ekonomi, tetapi tidak menyebabkan kegagalan investasi secara finansial. Penurunan nilai NPV pada kedua skenario memperlihatkan sensitivitas proyek terhadap faktor biaya dan pendapatan, namun nilai yang tetap positif menunjukkan adanya cadangan keuntungan yang memadai. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa struktur perkerasan kaku memiliki hubungan yang kuat antara keandalan teknis dan stabilitas ekonomi karena pengurangan kebutuhan pemeliharaan mampu menjaga efisiensi biaya sepanjang umur layanan. Hasil ini mendukung penelitian Azhar et al. (2024) yang menunjukkan bahwa evaluasi ekonomi antara perkerasan kaku dan lentur perlu memperhitungkan variasi kondisi operasional agar keputusan desain lebih representatif terhadap kondisi nyata.

Keandalan struktur dalam perspektif manajemen aset tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menahan beban lalu lintas, tetapi juga oleh kemampuan mempertahankan tingkat pelayanan dengan kebutuhan intervensi yang terkendali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi pelat beton 30 cm dengan mutu $f'c$ 45 MPa memberikan kapasitas struktural yang mendukung strategi pemeliharaan jangka panjang pada jalan tol dengan volume kendaraan berat tinggi. Struktur tersebut memiliki karakteristik kekakuan tinggi yang mampu mengurangi risiko deformasi permanen dan kerusakan akibat repetisi beban. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian Setiawan dan Supratman (2025) yang menunjukkan bahwa kualitas beton dengan mutu tinggi memiliki kontribusi signifikan terhadap kemampuan rigid pavement dalam memenuhi tuntutan pelayanan jalan.

Aspek pelaksanaan konstruksi menjadi faktor pendukung dalam memastikan bahwa hasil desain teoritis dapat tercapai pada kondisi aktual lapangan. Variasi mutu pekerjaan, ketidaktepatan sambungan,

atau ketidaksesuaian metode pengecoran dapat menyebabkan penurunan kinerja struktur meskipun desain awal telah memenuhi persyaratan teknis. Penelitian Subagyo dan Nurokhman (2021) menunjukkan bahwa pengendalian pekerjaan rigid pavement pada proyek jalan tol membutuhkan mekanisme pengawasan mutu yang konsisten untuk menjaga kesesuaian antara perencanaan dan hasil konstruksi. Perspektif tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan investasi perkerasan kaku merupakan hasil interaksi antara kualitas desain, efektivitas konstruksi, dan strategi pemeliharaan.

Penerapan teknologi konstruksi modern juga memiliki peran terhadap efisiensi pelaksanaan dan pengendalian kualitas struktur perkerasan kaku. Penggunaan alat mekanis seperti slipform paver mampu meningkatkan konsistensi geometrik, mempercepat proses pengecoran, dan mengurangi variasi mutu permukaan beton yang dapat memengaruhi kinerja jangka panjang. Penelitian Purba dan Bago (2025) menjelaskan bahwa metode pelaksanaan rigid pavement pada proyek jalan tol memerlukan perencanaan teknologi konstruksi yang tepat agar target mutu dan produktivitas dapat tercapai secara simultan. Temuan Yudhistira et al. (2025) juga memperlihatkan bahwa produktivitas peralatan memiliki hubungan terhadap efisiensi konstruksi dan stabilitas hasil pekerjaan, sehingga aspek teknologi menjadi bagian penting dalam strategi peningkatan keandalan infrastruktur.

Hasil penelitian juga memiliki implikasi terhadap pendekatan keberlanjutan dalam pembangunan jalan tol karena keputusan desain memengaruhi konsumsi sumber daya dan kebutuhan rehabilitasi sepanjang siklus hidup. Struktur dengan umur pelayanan panjang berpotensi mengurangi frekuensi pekerjaan perbaikan sehingga dapat menekan gangguan lalu lintas dan penggunaan material tambahan. Kajian Lendra et al. (2022) menunjukkan bahwa evaluasi lingkungan pada pekerjaan konstruksi jalan perlu mempertimbangkan perbedaan karakteristik antara perkerasan lentur dan kaku karena keduanya memiliki konsekuensi energi dan emisi yang berbeda. Perspektif tersebut memperluas pemaknaan keandalan struktur dari aspek teknis menuju konsep keberlanjutan infrastruktur secara menyeluruh.

Perbandingan hasil penelitian dengan studi terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan integratif antara desain teknis dan analisis ekonomi memberikan pemahaman yang lebih lengkap dibandingkan evaluasi yang hanya berorientasi pada salah satu aspek. Penelitian sebelumnya mengenai perencanaan tebal perkerasan kaku lebih banyak menekankan aspek kapasitas struktural, sedangkan kajian ekonomi sering kali membatasi analisis pada perbandingan biaya awal atau umur rencana tertentu. Integrasi LCCA, indikator investasi, dan analisis sensitivitas pada penelitian ini memperluas pendekatan tersebut dengan memasukkan dimensi risiko dan ketidakpastian selama masa operasi. Pendekatan tersebut mendukung hasil penelitian Anggie (2021) yang menunjukkan bahwa pemilihan metode desain perkerasan perlu mempertimbangkan kesesuaian parameter teknis dan kondisi proyek agar diperoleh hasil perencanaan yang optimal.

Hasil akhir penelitian menunjukkan bahwa perkerasan kaku pada Proyek Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y memiliki tingkat keandalan struktural dan ketahanan ekonomi yang baik berdasarkan evaluasi teknis maupun finansial. Nilai kelayakan investasi tetap berada pada kategori positif ketika diuji terhadap perubahan biaya konstruksi dan penurunan volume lalu lintas, sehingga model keputusan yang dikembangkan memiliki stabilitas terhadap risiko eksternal. Integrasi antara analisis struktur, LCCA, dan pengujian sensitivitas menghasilkan pendekatan evaluasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan aset jalan tol jangka panjang. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka analisis yang menghubungkan performa teknis perkerasan kaku dengan nilai ekonomi investasi sehingga mendukung pembangunan infrastruktur transportasi yang lebih efisien, dan adaptif.

KESIMPULAN

Penelitian mengenai analisis ekonomi rekayasa dan keandalan struktur perkerasan kaku pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Trans-Sumatera Ruas X-Y menunjukkan bahwa integrasi antara evaluasi teknis struktur dan analisis biaya siklus hidup mampu memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dalam pengelolaan infrastruktur jalan tol. Hasil perancangan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP 2017) menghasilkan konfigurasi struktur berupa pelat beton semen dengan tebal 30 cm, mutu beton f'_c 45 MPa, lapisan Lean Concrete 10 cm, serta lapisan agregat kelas A 15 cm yang mampu memenuhi kebutuhan beban lalu lintas kumulatif sebesar $1,2 \times 10^8$ ESAL selama umur rencana 40 tahun. Evaluasi ekonomi melalui pendekatan Life Cycle Cost Analysis menunjukkan bahwa meskipun perkerasan kaku membutuhkan investasi awal sebesar Rp14,5 miliar per kilometer, struktur tersebut memberikan efisiensi jangka panjang berdasarkan indikator

kelayakan investasi dengan nilai NPV positif sebesar Rp4,235 miliar, IRR sebesar 13,42%, dan BCR sebesar 1,28. Pengujian sensitivitas terhadap peningkatan biaya konstruksi sebesar 15% serta penurunan volume lalu lintas sebesar 20% menunjukkan bahwa proyek tetap berada dalam kategori layak secara ekonomi, yang mengindikasikan tingkat ketahanan investasi terhadap ketidakpastian eksternal. Hasil penelitian menegaskan bahwa penerapan perkerasan kaku pada jalan tol dengan karakteristik beban berat merupakan alternatif strategis yang mampu mengoptimalkan keseimbangan antara keandalan struktural, efisiensi biaya siklus hidup, dan keberlanjutan pengelolaan aset infrastruktur transportasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggie, A. (2021). Kajian Tebal Lapis Perkerasan Kaku Pada Pelebaran Jalan Tol Jakarta–Cikampek Berdasarkan Metode Aashto 1993 Dan Mdpj 2017. *Prosiding FTSP Series*, 152-159.
- Apituley, J. H. F., Wijaya, M. T., & Suryan, V. (2026). Desain Perbaikan Perkerasan Kaku Akses Jalan PPKP dengan Metode AASHTO dan ESAL. *Journal of Research and Inovation in Civil Engineering as Applied Science (RIGID)*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.58466/rigid.v5i1.1948>.
- Ardiansyah, R., & Sudibyo, T. (2020). Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku Lajur Pengganti pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Elevated. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 17-30. <https://doi.org/10.29244/jsil.5.1.17-30>.
- Azhar, M. R., Shima, R. D., & Elkhassnet, E. (2024). Kajian Komparatif Ekonomi Perkerasan Lentur dan Kaku dengan Metode MDPJ 2017, Studi Kasus: Rekonstruksi Jalan Jampang Tengah-Kiara Dua. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 10(3), 180. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v10i3.180>.
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Indeks Harga Konsumen dan Laju Inflasi Sektor Konstruksi Indonesia*. Jakarta: BPS.
- Batubara, P. J., Kuncoro, H. B. B., & Ulkhaq, R. I. (2024). Evaluasi Metode Pelaksanaan Rekonstruksi Perkerasan Jalan Tol Jakarta–Tangerang Tahun 2024 Pada Sta 0+ 000 Sampai Sta 26+ 400. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil* (Vol. 6, No. 2, pp. 806-818).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Faishol, A., Wijayanti, L., & Mulyadi, M. (2024). Inovasi struktural: Pemanfaatan geofom expanded polystyrene (EPS) dalam pembangunan infrastruktur modern. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(1), 46-61. <https://doi.org/10.56444/jts.v17i1.1595>.
- Farid, A. (2013). Analisis Perbedaan Biaya Konstruksi Jalan Beton Dan Jalan Aspal Dengan Metode Bina Marga Dan Aashto 1993 Selama Umur Rencana 20 Tahun (Studi Kasus Pada Proyek Jalan Tol Mojokerto Kertosono) Sta. 0+ 000-Sta 5+ 000. *Extrapolasi*, 6(01). <https://doi.org/10.30996/exp.v6i01.829>.
- Hakiki, R., & Pandjaitan, M. L. W. (2024). Inspeksi Pelaksanaan Pekerjaan Perkerasan Kaku pada Proyek Jalan Tol Trans Sumatera Kapalbetung. *Jurnal KaLIBRASI: Karya Lintas Ilmu Bidang Rekayasa Arsitektur, Sipil, Industri*, 7(2), 104-113. <https://doi.org/10.37721/kalibrasi.v7i2.1536>.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Manual Desain Perkerasan Jalan (Nomor 02/M/BM/2017)*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Lendra, L., Gawei, A. B. P., & Sintani, L. (2022). Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Pekerjaan Konstruksi Jalan Dengan Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(3), 201-211. <https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i2.165-176>.
- Purba, G. C., & Bago, I. T. (2025). Metode Pelaksanaan Perkerasan Kaku Pada Proyek Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Selatan Paket 2a. *Jurnal Teknik Silitek*, 5(03), 1660-1676. <https://doi.org/10.51135/13yrdq54>.
- Setiawan, R., & Supratman, O. (2025). Analisis Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) dengan Mutu Beton Fs' 45 terhadap Kuat Tekan dan Lentur: Studi Kasus: Rekonstruksi Ruas Jalan Baros-Petir. *Journal of Research and Inovation in Civil Engineering as Applied Science (RIGID)*, 4(1), 18-26. <https://doi.org/10.58466/rigid.v4i1.1726>.
- Sodek, A., & Ayunaning, K. (2026). Modifikasi Perkerasan Jalan Menggunakan Pedoman PKJI, PCI, RCI, DAN SDI (Studi Kasus Jln. Morowudi Kabupaten Gresik). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 1(1), 10-20. <https://doi.org/10.30587/jtsl.v1i1>.
- Soekarno, I., & Hari Murti, R. (2022). Prodising Seminar Nasional Metode Dan Teknologi Bidang Konstruksi Politeknik Pekerjaan Umum Tahun 2021" Metode dan Teknologi Dalam Rangka

- Percepatan Konstruksi". In *Seminar Nasional Metode Dan Teknologi Bidang Konstruksi Politeknik Pekerjaan Umum Tahun 2021* (pp. 1-109).
- Subagyo, S., & Nurokhman, N. (2021). Pengendalian Pekerjaan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Interchange Bandara Adi Soemarmo Solo. *CivETech: Civil Engineering and Technology Journal*, 3(2), 66-81. <https://doi.org/10.47200/civetech.v3i2.1059>.
- Sundari, T., Yulianto, T., & Nugroho, M. W. (2025). Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Menggunakan Metode Bina Marga 2003 Jalan Sumbermiri-Gudo Jombang. *Jurnal Sipil Terapan*, 3(1), 12-24. <https://doi.org/10.58169/jusit.v3i1.755>.
- Wibawa, I. P. C., Ariawan, I. M. A., & Winaya, P. K. (2025). Analisis Perbandingan Tebal Struktur Perkerasan Jalan Kaku Menggunakan Metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024. *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*, 4(2), 118-132. <https://doi.org/10.38043/reinforcement.v4i2.7155>.
- Wulandari, A. N., & Wacono, S. (2025). Pengendalian Mutu Beton Pada Pekerjaan Rigid Pavement Proyek Peningkatan Jalan. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil* (Vol. 7, No. 1, pp. 92-101).
- Yowei, J., & Item, R. (2025). Peningkatan Jalan Lingkungan Menggunakan Perkerasan Kaku Pada Proyek Pembangunan Rumah Dinas Denkav 3/Sc Mile 32 Di Timika. *Jurnal Sosial dan Teknologi Terapan AMATA*, 4(02), 29-32. <https://doi.org/10.55334/>.
- Yudhistira, A. K., Pratama, S. A. M., & Fauzan, S. A. (2025). Analisis Produktivitas Slipform Paver Wirtgen Sp 500 Pada Trial Rigid Pavement Proyek Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3b Sta 45+ 645 Sd 45+ 800. *Jurnal Teknik Silitek*, 5(03), 1640-1651. <https://doi.org/10.51135/smc36250>.