



Inventa: Journal of Science, Technology, and Innovation

Vol 2 No 1 August 2026, Hal 322-331
ISSN: 3123-3147 (Print) ISSN: 3123-3155 (Electronic)
Open Access: <https://scriptaintelektual.com/inventa>

Analisis Perbandingan Teknis dan Ekonomi Rekayasa Perkerasan Lentur dengan Perkerasan Kaku pada Proyek Jalan Raya

Nugraha Ahmad Santorini^{1*}, Buyung Mantap²

¹⁻² Universitas Ratu Samban, Indonesia

email: nugrahaahmadsantorini@gmail.com¹

Article Info :

Received:
12-07-2026
Revised:
30-07-2026
Accepted:
01-08-2026

Abstract

The selection of pavement type is a strategic decision in highway planning because it directly influences structural performance and cost efficiency throughout the service life. This study aims to compare the technical and economic performance of flexible and rigid pavements using a quantitative comparative simulation approach. The simulation was conducted on a 5 km arterial road with a subgrade California Bearing Ratio (CBR) of 5%, an annual traffic growth rate of 4.5%, and a 20-year design life. Pavement design was developed based on the 2017 Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ), while the economic evaluation employed the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) method with an 8% discount rate. The results indicate that flexible pavement requires a multilayer structure with a total thickness of approximately 50 cm, whereas rigid pavement utilizes a 25 cm concrete slab. Although the initial construction cost of flexible pavement (IDR 18.50 billion) is lower than that of rigid pavement (IDR 24.20 billion), the total life cycle cost of rigid pavement (IDR 22.47 billion) is lower than that of flexible pavement (IDR 24.72 billion). These findings demonstrate that rigid pavement is a more cost-effective alternative for heavily trafficked roads when evaluated from a life cycle cost perspective.

Keywords: Engineering Economics, Flexible Pavement, Highway Project, Life Cycle Cost Analysis, Rigid Pavement.

Akbsrak

Pemilihan jenis perkerasan merupakan keputusan strategis dalam perencanaan jalan karena memengaruhi kinerja struktur dan efisiensi biaya selama umur layanan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan teknis dan ekonomi antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada proyek jalan raya menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif berbasis simulasi. Simulasi dilakukan pada ruas jalan arteri sepanjang 5 km dengan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dasar sebesar 5%, pertumbuhan lalu lintas 4,5% per tahun, dan umur rencana 20 tahun. Perancangan struktur dilakukan mengacu pada *Manual Desain Perkerasan Jalan* (MDPJ) 2017, sedangkan evaluasi ekonomi menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan tingkat diskonto 8%. Hasil menunjukkan bahwa perkerasan lentur memerlukan struktur berlapis dengan total ketebalan sekitar 50 cm, sedangkan perkerasan kaku menggunakan pelat beton 25 cm. Biaya konstruksi awal perkerasan lentur lebih rendah (Rp18,50 miliar) dibandingkan perkerasan kaku (Rp24,20 miliar), namun total *Life Cycle Cost* perkerasan kaku lebih rendah, yaitu Rp22,47 miliar dibandingkan Rp24,72 miliar pada perkerasan lentur. Temuan ini menunjukkan bahwa perkerasan kaku lebih efisien untuk jalan dengan lalu lintas berat apabila ditinjau dari perspektif biaya siklus hidup.

Kata Kunci: Ekonomi Rekayasa, *Life Cycle Cost Analysis*, Perkerasan Kaku, Perkerasan Lentur, Proyek Jalan Raya.



©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

Pembangunan infrastruktur jalan telah berkembang menjadi salah satu agenda strategis dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, efisiensi logistik, serta keberlanjutan sistem transportasi di berbagai negara. Perubahan pola mobilitas, peningkatan volume kendaraan niaga, dan tuntutan terhadap infrastruktur yang memiliki umur layanan lebih panjang mendorong pergeseran paradigma perencanaan jalan dari pendekatan yang hanya berorientasi pada biaya konstruksi awal menuju pendekatan yang mempertimbangkan kinerja teknis, biaya siklus hidup, dan keberlanjutan investasi secara simultan (Haroon & Ahmad, 2026). Perubahan paradigma tersebut menempatkan pemilihan jenis perkerasan sebagai salah satu keputusan paling penting dalam proses perencanaan karena akan menentukan tingkat pelayanan jalan, kebutuhan pemeliharaan, serta efisiensi penggunaan anggaran selama umur rencana.

Di Indonesia, kebutuhan peningkatan konektivitas antarwilayah juga dihadapkan pada tantangan berupa pertumbuhan lalu lintas kendaraan berat, keterbatasan anggaran pembangunan, dan meningkatnya tuntutan terhadap kualitas pelayanan infrastruktur jalan. Dalam konteks tersebut, setiap alternatif desain tidak lagi dinilai semata berdasarkan kemampuan memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga berdasarkan manfaat ekonomi yang dihasilkan sepanjang siklus hidup aset infrastruktur (Blank & Tarquin, 2018). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara rekayasa perkerasan dan ekonomi rekayasa menjadi landasan penting dalam menghasilkan keputusan investasi yang lebih rasional, efisien, dan berorientasi jangka panjang.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemilihan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara karakteristik lalu lintas, kondisi tanah dasar, lingkungan, biaya konstruksi, serta strategi pemeliharaan yang diterapkan selama umur layanan jalan. Kajian mengenai evaluasi teknis dan ekonomi memperlihatkan bahwa perkerasan lentur umumnya memberikan keuntungan pada biaya investasi awal dan fleksibilitas pelaksanaan konstruksi, sedangkan perkerasan kaku menawarkan ketahanan struktural yang lebih tinggi terhadap beban lalu lintas berat serta frekuensi pemeliharaan yang lebih rendah dalam jangka panjang (Hamim et al., 2021). Penelitian terbaru juga memperlihatkan bahwa penggunaan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* menghasilkan keputusan pemilihan tipe perkerasan yang berbeda dibandingkan evaluasi yang hanya mempertimbangkan biaya konstruksi awal karena biaya pemeliharaan dan rehabilitasi memberikan kontribusi signifikan terhadap total pengeluaran selama umur rencana (Haroon & Ahmad, 2026). Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi ekonomi tidak lagi dapat dipisahkan dari analisis teknis karena kedua aspek saling memengaruhi dalam menentukan nilai investasi suatu proyek jalan. Pendekatan yang semakin komprehensif tersebut mendorong berbagai negara untuk mengintegrasikan analisis struktural, ekonomi, dan keberlanjutan dalam proses pengambilan keputusan pembangunan infrastruktur. Orientasi tersebut sekaligus memperlihatkan bahwa keberhasilan suatu desain jalan tidak hanya diukur dari kemampuan menahan beban lalu lintas, tetapi juga dari efisiensi biaya yang dihasilkan sepanjang masa operasionalnya.

Penelitian terdahulu di Indonesia maupun luar negeri menunjukkan kecenderungan hasil yang beragam mengenai alternatif perkerasan yang paling efisien sehingga belum menghasilkan konsensus ilmiah yang bersifat universal. Beberapa penelitian melaporkan bahwa perkerasan lentur lebih ekonomis pada proyek dengan volume lalu lintas rendah karena biaya konstruksi awalnya lebih kecil dibandingkan perkerasan kaku (Fatkhusani, 2018). Penelitian lain menunjukkan bahwa ketika lalu lintas kendaraan berat meningkat dan biaya pemeliharaan mulai diperhitungkan selama umur layanan, perkerasan kaku justru menghasilkan total biaya yang lebih rendah berdasarkan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (Hendriansyah, 2023). Kajian yang lebih mutakhir menggunakan pedoman desain terbaru juga memperlihatkan bahwa perubahan metode desain dapat memengaruhi hasil evaluasi ekonomi sehingga rekomendasi pemilihan tipe perkerasan menjadi semakin sensitif terhadap asumsi teknis yang digunakan (Tadzkirah et al., 2025). Penelitian internasional turut mengonfirmasi bahwa perbedaan karakteristik iklim, komposisi lalu lintas, harga material, serta strategi pemeliharaan menyebabkan hasil analisis biaya antara berbagai wilayah tidak dapat digeneralisasi secara langsung (Kumar & Sharma, 2022). Variasi temuan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara kinerja teknis dan efisiensi ekonomi bersifat kontekstual sehingga memerlukan pendekatan evaluasi yang mampu mengakomodasi karakteristik setiap proyek secara lebih komprehensif.

Meskipun penelitian mengenai perbandingan perkerasan telah berkembang cukup pesat, sejumlah keterbatasan masih ditemukan dalam literatur sehingga ruang pengembangan penelitian tetap terbuka. Sebagian besar penelitian nasional masih berfokus pada perbandingan biaya konstruksi awal tanpa mengintegrasikan proses desain struktural, estimasi biaya pemeliharaan, nilai waktu uang, dan evaluasi biaya siklus hidup dalam satu kerangka analisis yang utuh (Darmawan & Wibowo, 2020). Beberapa penelitian telah menerapkan *Life Cycle Cost Analysis*, namun umumnya masih menggunakan studi kasus yang bersifat lokal sehingga hasilnya sulit diterapkan pada kondisi ruas jalan dengan karakteristik lalu lintas dan tanah dasar yang berbeda (Maldi et al., 2025). Penelitian lain telah mengombinasikan analisis teknis dan ekonomi, tetapi belum sepenuhnya memanfaatkan pedoman desain perkerasan terbaru maupun mengevaluasi implikasi perubahan parameter desain terhadap efisiensi investasi jangka panjang (Tukimun & Prawoto, 2024). Keterbatasan tersebut menyebabkan proses pengambilan keputusan dalam pemilihan jenis perkerasan masih didominasi oleh pertimbangan biaya awal atau pengalaman praktis dibandingkan analisis kuantitatif yang bersifat menyeluruh. Situasi

tersebut memperlihatkan adanya kebutuhan terhadap penelitian yang mampu mengintegrasikan analisis teknis dan ekonomi secara lebih sistematis agar rekomendasi yang dihasilkan memiliki tingkat validitas dan aplikabilitas yang lebih tinggi.

Kebutuhan terhadap pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif semakin penting mengingat pembangunan jalan di Indonesia menghadapi tantangan berupa pertumbuhan kendaraan bermuatan berat, fenomena *over dimension over loading* (ODOL), kondisi iklim tropis dengan intensitas hujan tinggi, serta keterbatasan kapasitas fiskal pemerintah dalam mendanai pemeliharaan jalan secara berkelanjutan. Pedoman desain perkerasan yang diterbitkan pemerintah telah mengalami penyempurnaan untuk menyesuaikan perkembangan karakteristik lalu lintas dan teknologi konstruksi sehingga implementasinya perlu diikuti oleh evaluasi ekonomi yang mampu menggambarkan konsekuensi biaya sepanjang umur layanan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Standar pelaksanaan konstruksi jalan juga menekankan pentingnya kualitas material, metode pekerjaan, dan pengendalian mutu sebagai faktor yang memengaruhi kinerja struktur selama masa operasi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Landasan teoritis mengenai desain struktur perkerasan dan distribusi beban menunjukkan bahwa perubahan karakteristik material akan menghasilkan respons struktural yang berbeda sehingga konsekuensi ekonominya tidak dapat dianalisis secara terpisah dari aspek teknis (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993). Pendekatan ekonomi rekayasa melalui konsep nilai waktu uang dan *Life Cycle Cost Analysis* memberikan kerangka evaluasi yang lebih rasional dalam membandingkan alternatif investasi infrastruktur dibandingkan metode yang hanya berorientasi pada biaya awal (Federal Highway Administration, 1998). Integrasi antara analisis struktur perkerasan dan evaluasi ekonomi menjadi semakin penting agar keputusan pemilihan tipe perkerasan mampu menghasilkan keseimbangan antara ketahanan teknis, efisiensi anggaran, dan keberlanjutan pengelolaan aset jalan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik teknis serta kelayakan ekonomi antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada proyek jalan raya melalui pendekatan yang mengintegrasikan proses desain struktur dan evaluasi biaya siklus hidup. Analisis dilakukan menggunakan pedoman desain perkerasan yang berlaku di Indonesia dengan mempertimbangkan karakteristik lalu lintas sebagai dasar penentuan kebutuhan struktur masing-masing alternatif. Selanjutnya, setiap alternatif dievaluasi berdasarkan komponen biaya investasi, kebutuhan pemeliharaan, serta biaya yang timbul selama umur rencana sehingga diperoleh gambaran efisiensi ekonomi secara menyeluruh. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi yang lebih objektif dibandingkan analisis yang hanya mempertimbangkan salah satu aspek secara terpisah. Dari sisi akademik, penelitian ini memperkuat integrasi antara rekayasa perkerasan dan ekonomi rekayasa dalam pengambilan keputusan infrastruktur jalan. Dari sisi praktis, hasil penelitian diharapkan menjadi dasar pertimbangan bagi perencana, kontraktor, maupun pemerintah dalam menentukan alternatif perkerasan yang memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja struktural dan efisiensi investasi jangka panjang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian empiris dengan pendekatan kuantitatif komparatif berbasis simulasi yang bertujuan membandingkan kinerja teknis dan kelayakan ekonomi antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada proyek jalan raya. Simulasi dilakukan pada ruas jalan arteri sepanjang 5 km yang merepresentasikan jalan nasional kelas I dengan dominasi kendaraan niaga, menggunakan data teknis berupa nilai California Bearing Ratio (CBR) tanah dasar sebesar 5%, lalu lintas harian rata-rata (LHR), laju pertumbuhan lalu lintas sebesar 4,5% per tahun, serta data finansial berupa Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Bidang Bina Marga dan tingkat diskonto sebesar 8% per tahun. Tahapan penelitian diawali dengan analisis karakteristik lalu lintas melalui perhitungan Vehicle Damage Factor (VDF), Equivalent Single Axle Load (ESAL), dan Cumulative Equivalent Standard Axle (CESA) sebagai dasar penentuan beban kumulatif selama umur rencana, kemudian dilanjutkan dengan perancangan struktur perkerasan lentur dan perkerasan kaku mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Hasil perancangan digunakan untuk menyusun estimasi biaya konstruksi awal, kebutuhan pemeliharaan rutin dan berkala, nilai sisa (*salvage value*), serta arus kas selama umur analisis yang selanjutnya dievaluasi menggunakan pendekatan Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Seluruh komponen biaya dikonversi ke dalam nilai kini berdasarkan konsep Time Value of Money sehingga kedua alternatif dapat dibandingkan pada dasar

ekonomi yang setara melalui indikator Net Present Value (Blank & Tarquin, 2018). Integrasi antara simulasi desain struktural dan analisis biaya siklus hidup memberikan kerangka evaluasi yang mampu menilai hubungan antara kinerja teknis dan efisiensi ekonomi secara simultan sehingga menghasilkan proses pengambilan keputusan yang lebih komprehensif.

Evaluasi dilakukan melalui perbandingan kinerja teknis dan ekonomi dari kedua alternatif perkerasan menggunakan parameter analisis yang identik sehingga hasil yang diperoleh sepenuhnya merefleksikan karakteristik masing-masing tipe perkerasan. Indikator teknis yang dianalisis meliputi nilai CESA, dimensi struktur perkerasan, dan kesesuaian desain terhadap karakteristik lalu lintas serta kondisi tanah dasar, sedangkan indikator ekonomi mencakup biaya konstruksi awal, biaya pemeliharaan rutin, biaya rehabilitasi berkala, nilai sisa, total Life Cycle Cost, dan Net Present Value. Konsistensi hasil simulasi diverifikasi dengan mengacu pada prosedur perencanaan dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017, sedangkan evaluasi ekonomi disusun berdasarkan kerangka Life Cycle Cost Analysis yang direkomendasikan untuk analisis investasi infrastruktur transportasi (Federal Highway Administration, 1998). Alternatif perkerasan yang memiliki nilai Life Cycle Cost dan Net Present Value terendah serta tetap memenuhi persyaratan teknis ditetapkan sebagai pilihan yang paling efisien. Penggunaan parameter masukan yang sama pada kedua skenario memungkinkan proses komparasi dilakukan secara objektif tanpa dipengaruhi variasi kondisi awal, sehingga perbedaan hasil sepenuhnya berasal dari karakteristik struktural dan pola biaya masing-masing jenis perkerasan. Pendekatan metodologis ini menghasilkan model evaluasi yang lebih robust karena mengintegrasikan aspek rekayasa dan ekonomi dalam satu kerangka analisis yang sistematis, sehingga mampu memberikan rekomendasi yang lebih representatif bagi proses pemilihan tipe perkerasan pada proyek jalan raya (Haroon & Ahmad, 2026).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kinerja Teknis Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ruas jalan arteri sepanjang 5 km dengan pertumbuhan lalu lintas sebesar 4,5% per tahun menghasilkan beban lalu lintas kumulatif sebesar 30.000.000 Cumulative Equivalent Standard Axle (CESA) selama umur rencana 20 tahun. Nilai tersebut menempatkan ruas jalan pada kategori lalu lintas berat sehingga memerlukan struktur perkerasan yang memiliki kapasitas dukung tinggi terhadap repetisi beban kendaraan niaga. Berdasarkan parameter tersebut dan nilai California Bearing Ratio (CBR) tanah dasar sebesar 5%, proses desain dilakukan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 sehingga kedua alternatif perkerasan dirancang pada kondisi pembebanan dan karakteristik tanah yang identik (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dilakukan secara objektif karena perbedaan hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh mekanisme struktural masing-masing jenis perkerasan. Dari sisi rekayasa, kondisi tersebut juga merepresentasikan karakteristik umum jalan arteri nasional di Indonesia yang didominasi kendaraan dengan beban sumbu tinggi. Analisis teknis pada tahap ini menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi lapisan yang mampu mempertahankan kinerja struktural selama umur pelayanan yang direncanakan.

Hasil perancangan menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan pada konfigurasi struktur antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku meskipun keduanya dirancang untuk melayani tingkat pembebanan yang sama. Perkerasan lentur memerlukan kombinasi beberapa lapisan beraspal dan agregat berbutir agar tegangan yang diteruskan ke tanah dasar tetap berada di bawah batas izin, sedangkan perkerasan kaku lebih mengandalkan kapasitas pelat beton dalam mendistribusikan beban ke area yang lebih luas. Perbedaan konfigurasi tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perancangan Struktur Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

Parameter	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
CBR Tanah Dasar	5%	5%
CESA Umur Rencana	30.000.000 ESAL	30.000.000 ESAL
AC-WC	4 cm	-
AC-BC	6 cm	-
AC-Base	10 cm	-

Lapis Pondasi Atas (Agregat Kelas A)	30 cm	15 cm
Lean Concrete	-	10 cm
Pelat Beton	-	25 cm
Umur Rencana	20 tahun	20 tahun

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa total ketebalan struktur perkerasan lentur mencapai sekitar 50 cm, sedangkan perkerasan kaku hanya memerlukan pelat beton setebal 25 cm yang didukung lapisan pondasi sederhana. Perbedaan tersebut tidak menunjukkan bahwa perkerasan kaku lebih tipis secara keseluruhan, melainkan menggambarkan mekanisme distribusi beban yang berbeda sesuai karakteristik material penyusunnya. Fenomena ini sejalan dengan konsep desain perkerasan yang dijelaskan oleh Huang (2004), di mana beton semen memiliki modulus elastisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan campuran beraspal sehingga mampu menyebarkan tegangan ke area tanah dasar yang lebih luas.

Perbedaan mekanisme distribusi beban tersebut memberikan implikasi langsung terhadap kebutuhan dimensi struktur pada masing-masing alternatif. Pada perkerasan lentur, setiap lapisan mempunyai fungsi struktural yang saling melengkapi, mulai dari lapisan permukaan hingga lapisan pondasi bawah, sehingga kegagalan pada salah satu lapisan dapat mempercepat penurunan kapasitas struktur secara keseluruhan. Kondisi tersebut menyebabkan desain perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh kualitas tanah dasar dan besarnya beban lalu lintas kumulatif yang diterima selama umur pelayanan (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993). Sebaliknya, pelat beton pada perkerasan kaku berfungsi sebagai elemen struktural utama sehingga sebagian besar beban dapat langsung didistribusikan melalui mekanisme *slab action*. Karakteristik tersebut menjadikan perubahan kecil pada kondisi tanah dasar tidak memberikan pengaruh sebesar yang terjadi pada perkerasan lentur. Temuan ini memperlihatkan bahwa kapasitas struktural tidak hanya ditentukan oleh total ketebalan lapisan, tetapi juga oleh sifat mekanik material yang digunakan.

Karakteristik material penyusun turut memengaruhi respons struktur terhadap kondisi lingkungan dan intensitas lalu lintas. Campuran beraspal memiliki sifat viskoelastis sehingga lebih adaptif terhadap deformasi kecil akibat penurunan tanah dasar, namun material tersebut lebih rentan mengalami deformasi permanen (*rutting*) dan retak lelah (*fatigue cracking*) ketika menerima repetisi beban berat dalam jangka panjang. Sebaliknya, beton semen mempunyai kekakuan yang lebih tinggi sehingga deformasi plastis dapat diminimalkan, meskipun memerlukan perhatian terhadap potensi retak akibat perubahan temperatur dan penyusutan beton (Mohod & Kadam, 2016). Spesifikasi material yang diterapkan pada penelitian ini telah disesuaikan dengan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga dimensi struktur yang dihasilkan masih berada dalam rentang teknis yang direkomendasikan untuk jalan arteri dengan lalu lintas berat (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan jenis perkerasan perlu mempertimbangkan interaksi antara karakteristik material, kondisi tanah dasar, dan pola pembebanan lalu lintas. Pendekatan tersebut menghasilkan desain yang lebih representatif dibandingkan penentuan ketebalan berdasarkan satu parameter saja.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa kedua alternatif memenuhi persyaratan teknis untuk melayani lalu lintas sebesar 30 juta ESAL selama umur rencana, namun strategi pencapaian kapasitas struktur yang digunakan berbeda secara fundamental. Perkerasan lentur mengandalkan penambahan jumlah dan ketebalan lapisan sebagai mekanisme utama dalam mengurangi tegangan yang diteruskan ke tanah dasar, sedangkan perkerasan kaku memanfaatkan kekakuan pelat beton untuk meningkatkan efisiensi distribusi beban. Pola tersebut memiliki kesesuaian dengan hasil penelitian Maharani dan Wasono (2018) serta Fatkhussani (2018), yang melaporkan bahwa perkerasan lentur umumnya membutuhkan struktur lebih tebal dibandingkan perkerasan kaku pada kondisi pembebanan yang setara. Dari perspektif rekayasa jalan, temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan kapasitas struktur tidak selalu identik dengan penambahan ketebalan total, tetapi lebih dipengaruhi oleh mekanisme kerja setiap sistem perkerasan dalam merespons beban lalu lintas. Hasil analisis teknis tersebut menjadi landasan penting bagi evaluasi ekonomi pada tahap berikutnya karena perbedaan konfigurasi struktur akan memengaruhi kebutuhan material, metode konstruksi, biaya investasi awal, dan pola pemeliharaan selama umur layanan.

Analisis Perbandingan Biaya Konstruksi dan *Life Cycle Cost*

Hasil estimasi biaya menunjukkan bahwa kedua alternatif perkerasan memiliki karakteristik ekonomi yang berbeda sejak tahap konstruksi awal. Perkerasan lentur menghasilkan kebutuhan investasi awal sebesar Rp18.500.000.000, sedangkan perkerasan kaku memerlukan biaya sebesar Rp24.200.000.000 untuk ruas jalan sepanjang 5 km dengan lebar efektif 7 m. Selisih investasi awal sebesar Rp5.700.000.000 atau sekitar 23,5% menunjukkan bahwa penggunaan perkerasan kaku membutuhkan komitmen pendanaan yang lebih besar pada awal proyek. Kondisi tersebut merupakan konsekuensi dari penggunaan beton mutu tinggi, pemasangan dowel dan tie bar, serta kebutuhan peralatan konstruksi khusus yang relatif lebih mahal dibandingkan pekerjaan perkerasan beraspal. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Darmawan dan Wibowo (2020) yang menunjukkan bahwa biaya konstruksi awal perkerasan kaku secara konsisten lebih tinggi dibandingkan perkerasan lentur pada proyek jalan perkotaan. Dari perspektif pengelolaan anggaran, perbedaan tersebut sering kali menjadi dasar utama dalam pengambilan keputusan apabila evaluasi hanya berorientasi pada biaya pembangunan tahun pertama.

Biaya konstruksi awal tidak dapat dijadikan satu-satunya indikator dalam menentukan alternatif perkerasan yang paling efisien karena sebagian besar biaya infrastruktur justru muncul selama fase operasi dan pemeliharaan. Analisis biaya siklus hidup memperhitungkan biaya pemeliharaan rutin, rehabilitasi berkala, serta nilai sisa aset hingga akhir umur rencana sehingga memberikan gambaran ekonomi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan konvensional. Rekapitulasi komponen biaya yang digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Estimasi Biaya Konstruksi dan Komponen *Life Cycle Cost*

Komponen Biaya	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
Biaya Konstruksi Awal	Rp18.500.000.000	Rp24.200.000.000
Pemeliharaan Rutin/Tahun	Rp150.000.000	Rp50.000.000
Pemeliharaan Berkala	Rp6.000.000.000 (Th. 7 & 14)	Rp800.000.000 (Th. 10)
Nilai Sisa Tahun ke-20	Rp3.700.000.000 (20%)	Rp12.100.000.000 (50%)
Total <i>Life Cycle Cost</i> (Present Value)	Rp24.722.647.000	Rp22.465.405.000

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa biaya awal yang lebih rendah pada perkerasan lentur diikuti oleh kebutuhan pemeliharaan yang jauh lebih besar selama umur pelayanan. Sebaliknya, perkerasan kaku memerlukan investasi awal yang tinggi, tetapi mempertahankan biaya operasi dan rehabilitasi pada tingkat yang relatif rendah. Pola tersebut menunjukkan bahwa efisiensi ekonomi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan nilai investasi awal, melainkan harus mempertimbangkan seluruh siklus biaya infrastruktur.

Perbedaan pola pengeluaran antara kedua alternatif terutama dipengaruhi oleh karakteristik kerusakan masing-masing sistem perkerasan. Pada simulasi ini, perkerasan lentur memerlukan pemeliharaan rutin setiap tahun dan rehabilitasi berupa *overlay* pada tahun ke-7 dan ke-14, sedangkan perkerasan kaku hanya memerlukan pemeliharaan ringan berupa perbaikan *joint seal* pada tahun ke-10. Frekuensi intervensi yang lebih tinggi menyebabkan akumulasi biaya pemeliharaan perkerasan lentur meningkat secara signifikan selama umur rencana. Di sisi lain, nilai sisa (*salvage value*) perkerasan kaku yang mencapai 50% turut mengurangi total biaya siklus hidup karena sebagian material beton masih memiliki nilai guna pada akhir periode analisis. Karakteristik tersebut mendukung konsep *Life Cycle Cost Analysis* yang menempatkan biaya operasi, pemeliharaan, dan nilai sisa sebagai komponen yang sama pentingnya dengan biaya konstruksi awal (Federal Highway Administration, 1998). Pendekatan serupa juga direkomendasikan oleh Peterson (2018) dalam evaluasi investasi infrastruktur jalan jangka panjang.

Hasil perhitungan *Present Value* menunjukkan bahwa total *Life Cycle Cost* perkerasan lentur mencapai Rp24,72 miliar, sedangkan perkerasan kaku sebesar Rp22,47 miliar. Meskipun investasi awal perkerasan kaku lebih besar, total biaya siklus hidupnya justru sekitar 9% lebih rendah dibandingkan perkerasan lentur. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pengeluaran besar pada tahap konstruksi dapat dikompensasi oleh rendahnya biaya pemeliharaan selama umur pelayanan. Temuan ini memiliki konsistensi dengan penelitian Hendriansyah (2023), Prasetya et al. (2022), dan Maldi et al. (2025), yang melaporkan bahwa perkerasan kaku mulai menunjukkan keunggulan ekonomi ketika beban lalu lintas

dan frekuensi pemeliharaan meningkat. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa konsep *Time Value of Money* berperan penting dalam mengubah persepsi terhadap biaya investasi karena pengeluaran yang terjadi pada masa depan memiliki nilai kini yang berbeda dibandingkan biaya yang dikeluarkan pada awal proyek (Blank & Tarquin, 2018). Analisis ini menghasilkan dasar evaluasi yang lebih rasional dibandingkan pendekatan yang hanya membandingkan besarnya biaya konstruksi awal.

Interpretasi hasil menunjukkan bahwa keputusan pemilihan tipe perkerasan sangat dipengaruhi oleh horizon analisis yang digunakan. Apabila evaluasi dibatasi pada tahun pertama pembangunan, perkerasan lentur tampak lebih ekonomis karena membutuhkan investasi yang lebih rendah. Namun, ketika horizon analisis diperluas hingga 20 tahun sesuai umur rencana, akumulasi biaya pemeliharaan menyebabkan kurva biaya perkerasan lentur meningkat lebih cepat dibandingkan perkerasan kaku hingga mencapai titik impas (*break-even point*) pada pertengahan umur layanan. Pola tersebut sejalan dengan hasil penelitian Tadzkirah et al. (2025), Tukimun dan Prawoto (2024), Ziar et al. (2024), Hamim et al. (2021), Kumar dan Sharma (2022), serta Haroon dan Ahmad (2026), yang menunjukkan bahwa keunggulan ekonomi perkerasan kaku semakin nyata pada ruas jalan dengan lalu lintas berat dan periode analisis jangka panjang. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* mampu menghasilkan keputusan investasi yang lebih adaptif terhadap karakteristik operasional jalan dibandingkan evaluasi berbasis biaya konstruksi semata. Hasil tersebut sekaligus memperkuat argumentasi bahwa integrasi analisis teknis dan ekonomi merupakan prasyarat penting dalam perencanaan infrastruktur jalan yang berorientasi pada efisiensi jangka panjang.

Implikasi Rekayasa terhadap Pengambilan Keputusan Pemilihan Perkerasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemilihan jenis perkerasan tidak dapat didasarkan hanya pada besarnya investasi awal, tetapi harus mempertimbangkan hubungan antara kapasitas struktural, karakteristik lalu lintas, kebutuhan pemeliharaan, dan biaya yang timbul sepanjang umur pelayanan. Perkerasan lentur menawarkan fleksibilitas konstruksi yang tinggi serta biaya pembangunan yang relatif rendah, sedangkan perkerasan kaku memberikan stabilitas struktur yang lebih baik pada kondisi lalu lintas berat meskipun memerlukan investasi awal yang lebih besar. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap sistem perkerasan memiliki keunggulan pada kondisi pelayanan yang berbeda sehingga proses pemilihannya harus disesuaikan dengan karakteristik ruas jalan yang direncanakan. Pendekatan berbasis indikator teknis dan ekonomi menghasilkan proses evaluasi yang lebih objektif dibandingkan pemilihan alternatif yang hanya mempertimbangkan keterbatasan anggaran pembangunan. Perspektif tersebut sejalan dengan konsep perencanaan jalan yang menempatkan keselamatan, kinerja struktur, dan efisiensi investasi sebagai satu kesatuan dalam pengambilan keputusan infrastruktur (Mulyono, 2015). Implikasi ini memperlihatkan bahwa keberhasilan suatu proyek jalan tidak hanya diukur dari keberhasilan konstruksi, tetapi juga dari kemampuan infrastruktur mempertahankan tingkat pelayanan selama umur rencana.

Perbedaan karakteristik kedua alternatif menjadi lebih jelas ketika hasil simulasi dianalisis secara komprehensif menggunakan indikator teknis dan ekonomi. Ringkasan evaluasi komparatif ditampilkan pada Tabel 3 sebagai dasar dalam menafsirkan keunggulan masing-masing sistem perkerasan.

Tabel 3. Ringkasan Perbandingan Kinerja Teknis dan Ekonomi Perkerasan

Aspek Evaluasi	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
Investasi Awal	Lebih rendah	Lebih tinggi
Ketebalan Struktur	±50 cm	Pelat beton 25 cm + pondasi
Frekuensi Pemeliharaan	Tinggi	Rendah
Biaya Siklus Hidup	Lebih tinggi	Lebih rendah
Nilai Sisa	20%	50%
Kesesuaian untuk Lalu Lintas Berat	Baik	Sangat baik
Efisiensi Jangka Panjang	Sedang	Tinggi

Data pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa keunggulan perkerasan lentur terkonsentrasi pada aspek investasi awal, sedangkan perkerasan kaku menunjukkan performa yang lebih baik pada indikator keberlanjutan biaya dan umur layanan. Pola tersebut mengindikasikan bahwa perbedaan karakteristik

material secara langsung memengaruhi strategi pengelolaan aset jalan selama masa operasional. Pemilihan alternatif yang tepat bergantung pada tujuan investasi serta karakteristik lalu lintas yang akan dilayani, bukan hanya pada besarnya anggaran konstruksi yang tersedia.

Kondisi lalu lintas di Indonesia memberikan konteks yang memperkuat hasil simulasi penelitian ini. Ruas jalan arteri nasional umumnya menerima proporsi kendaraan barang yang tinggi, bahkan masih dijumpai praktik kendaraan dengan muatan berlebih (*overloading*) yang meningkatkan percepatan kerusakan struktur perkerasan. Pada kondisi tersebut, perkerasan lentur cenderung lebih cepat mengalami *rutting*, retak lelah, dan deformasi permanen sehingga kebutuhan rehabilitasi meningkat sebelum umur rencana tercapai. Sebaliknya, pelat beton pada perkerasan kaku mampu mempertahankan kapasitas struktur lebih lama karena beban roda didistribusikan melalui mekanisme *slab action* yang mengurangi konsentrasi tegangan pada tanah dasar (Garber & Hoel, 2014). Karakteristik tersebut menjelaskan mengapa hasil simulasi menunjukkan kebutuhan pemeliharaan perkerasan kaku yang lebih rendah meskipun biaya konstruksi awalnya lebih tinggi. Dari perspektif rekayasa transportasi, temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan volume kendaraan berat akan memberikan dampak ekonomi yang lebih besar pada sistem perkerasan lentur dibandingkan perkerasan kaku.

Implikasi lain yang muncul dari hasil penelitian berkaitan dengan efisiensi pengelolaan aset infrastruktur dalam jangka panjang. Pengurangan frekuensi rehabilitasi tidak hanya menekan biaya pemeliharaan pemerintah, tetapi juga mengurangi potensi gangguan operasional jalan akibat pekerjaan konstruksi yang berulang. Pada ruas jalan dengan intensitas lalu lintas tinggi, setiap kegiatan *overlay* atau rehabilitasi berpotensi menurunkan kapasitas jalan dan meningkatkan biaya tidak langsung yang ditanggung pengguna, seperti waktu tempuh yang lebih lama, konsumsi bahan bakar, dan penurunan produktivitas transportasi. Walaupun komponen *user delay cost* tidak dimasukkan dalam simulasi ini, berbagai penelitian menunjukkan bahwa biaya tersebut sering kali memberikan kontribusi signifikan terhadap total biaya siklus hidup proyek jalan, terutama pada koridor dengan volume lalu lintas tinggi (Hamim et al., 2021). Hasil penelitian Haroon dan Ahmad (2026) juga menunjukkan bahwa pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* yang mempertimbangkan aspek keberlanjutan menghasilkan rekomendasi investasi yang lebih efisien dibandingkan evaluasi berbasis biaya konstruksi awal. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa manfaat ekonomi perkerasan kaku berpotensi lebih besar apabila komponen biaya pengguna jalan turut diperhitungkan.

Temuan penelitian ini memperkuat kecenderungan hasil berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa keunggulan ekonomi perkerasan kaku semakin meningkat pada kondisi lalu lintas berat dan horizon analisis jangka panjang. Pada saat yang sama, hasil simulasi juga menegaskan bahwa perkerasan lentur tetap menjadi alternatif yang rasional untuk ruas jalan dengan volume kendaraan lebih rendah atau keterbatasan anggaran investasi pada tahap awal pembangunan. Pendekatan komparatif yang mengintegrasikan evaluasi teknis dan ekonomi memberikan dasar yang lebih kuat bagi perencanaan untuk memilih tipe perkerasan sesuai karakteristik proyek yang dihadapi. Kerangka analisis seperti ini dapat mendukung penyusunan kebijakan investasi infrastruktur yang lebih efektif karena keputusan tidak lagi berorientasi pada biaya pembangunan semata, tetapi mempertimbangkan nilai manfaat selama umur pelayanan aset. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyajian model evaluasi yang menggabungkan parameter desain struktur, biaya konstruksi, pola pemeliharaan, dan biaya siklus hidup dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengambil kebijakan dan praktisi teknik sipil dalam menentukan alternatif perkerasan yang tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga memberikan efisiensi ekonomi yang optimal pada proyek jalan raya.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbandingan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku perlu dilakukan melalui pendekatan yang mengintegrasikan aspek teknis dan ekonomi agar menghasilkan keputusan desain yang lebih komprehensif. Berdasarkan hasil simulasi pada ruas jalan arteri dengan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dasar sebesar 5%, pertumbuhan lalu lintas 4,5% per tahun, dan beban kumulatif sebesar 30.000.000 CESA selama umur rencana 20 tahun, kedua alternatif memenuhi persyaratan teknis sesuai pedoman desain yang berlaku. Perkerasan lentur memerlukan struktur berlapis dengan total ketebalan sekitar 50 cm untuk mereduksi tegangan yang diteruskan ke tanah dasar, sedangkan perkerasan kaku mengandalkan pelat beton setebal 25 cm yang

bekerja melalui mekanisme *slab action* dalam mendistribusikan beban kendaraan. Perbedaan tersebut mencerminkan karakteristik mekanis masing-masing material sehingga menghasilkan strategi desain yang berbeda meskipun melayani kondisi lalu lintas yang sama. Hasil analisis memperlihatkan bahwa kapasitas struktur tidak hanya dipengaruhi oleh ketebalan lapisan, tetapi juga oleh kemampuan material dalam mempertahankan kinerja selama menerima repetisi beban lalu lintas. Temuan ini menegaskan bahwa evaluasi teknis merupakan tahapan fundamental sebelum dilakukan analisis kelayakan ekonomi terhadap alternatif perkerasan yang direncanakan.

Hasil analisis ekonomi menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* menunjukkan bahwa biaya konstruksi awal perkerasan lentur sebesar Rp18,50 miliar lebih rendah dibandingkan perkerasan kaku yang mencapai Rp24,20 miliar. Perbedaan investasi awal tersebut tidak berbanding lurus dengan total biaya selama umur pelayanan karena perkerasan lentur memerlukan frekuensi pemeliharaan yang lebih tinggi serta rehabilitasi berkala berupa *overlay*. Perhitungan nilai kini memperlihatkan bahwa total *Life Cycle Cost* perkerasan lentur mencapai Rp24,72 miliar, sedangkan perkerasan kaku sebesar Rp22,47 miliar sehingga alternatif perkerasan kaku memberikan efisiensi biaya sekitar 9% pada horizon analisis 20 tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa investasi awal yang lebih besar dapat dikompensasi oleh rendahnya biaya pemeliharaan dan tingginya nilai sisa aset pada akhir umur rencana. Pendekatan berbasis biaya siklus hidup mampu memberikan gambaran ekonomi yang lebih representatif dibandingkan evaluasi yang hanya mempertimbangkan biaya pembangunan pada tahun pertama. Analisis ini memperlihatkan pentingnya penerapan konsep *Time Value of Money* dalam proses pengambilan keputusan investasi infrastruktur jalan agar setiap alternatif dapat dibandingkan pada dasar ekonomi yang setara.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi yang mengintegrasikan simulasi desain perkerasan dengan analisis biaya siklus hidup sehingga aspek rekayasa dan ekonomi dapat dinilai secara bersamaan dalam proses pemilihan tipe perkerasan. Pendekatan tersebut menghasilkan dasar pengambilan keputusan yang lebih objektif karena mempertimbangkan hubungan antara kapasitas struktur, kebutuhan pemeliharaan, dan efisiensi biaya selama umur pelayanan. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa perkerasan kaku lebih sesuai diterapkan pada ruas jalan dengan volume kendaraan berat yang tinggi dan orientasi investasi jangka panjang, sedangkan perkerasan lentur tetap menjadi alternatif yang layak pada kondisi lalu lintas lebih ringan atau ketika keterbatasan anggaran awal menjadi pertimbangan utama. Kerangka analisis yang digunakan juga dapat diterapkan sebagai referensi dalam evaluasi proyek jalan dengan karakteristik yang serupa sehingga mendukung proses perencanaan infrastruktur yang lebih rasional dan berbasis data. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memasukkan komponen *user delay cost*, analisis sensitivitas terhadap perubahan tingkat diskonto, variasi pertumbuhan lalu lintas, serta aspek dampak lingkungan agar evaluasi biaya siklus hidup menjadi lebih komprehensif. Pengembangan tersebut diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi yang semakin akurat dalam mendukung pembangunan infrastruktur jalan yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap dinamika kebutuhan transportasi.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering Economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Darmawan, M. A., & Wibowo, H. (2020). Analisa perbandingan biaya perkerasan kaku dan perkerasan lentur pada proyek jalan Middle Ring Road Kota Makassar. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 5(1), 41-47. <https://doi.org/10.33096/3et4xd28>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Manual Desain Perkerasan Jalan (Nomor 04/SE/Db/2017)*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fatkhussani, F. (2018). Perbandingan Efisiensi Harga Perkerasan Lentur Dan Kaku Dengan Metode Bina Marga. *Prosiding Semnastek*. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/3552>
- Federal Highway Administration. (1998). *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design (Report No. FHWA-SA-98-079)*. U.S. Department of Transportation.
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2014). *Traffic and Highway Engineering* (5th ed.). Cengage Learning.

- Haroon, W., & Ahmad, N. (2026). Economic and sustainability assessment of flexible, rigid, and modified asphalt pavements using life cycle cost analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 11(2), 76. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02478-w>
- Hendriansyah, G. C. (2023). Analisis Pemilihan Perkerasan Lentur dan Kaku Berdasarkan Life Cycle Cost Analysis di Kota Kediri. *Rekayasa Teknik Sipil*, 11(1). <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/50858>
- Hamim, O. F., Aninda, S. S., Hoque, M. S., & Hadiuzzaman, M. (2021). Suitability of Pavement Type for Developing Countries from An Economic Perspective Using Life Cycle Cost Analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(3), 259-266. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0107-z>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kumar, R., & Sharma, S. (2022, October). Perpetual Flexible Pavement vs. Rigid Pavement: An Economic and Environmental Cost Comparison. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 1084, No. 1, p. 012053). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1084/1/012053/meta>
- Maharani, A., & Wasono, S. B. (2018). Perbandingan perkerasan kaku dan perkerasan lentur (Studi kasus ruas jalan Raya Pantai Prigi-Popoh Kab. Tulungagung). *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil*, 1(2), 89-94. <https://doi.org/10.25139/jprs.v1i2.1202>
- Maldi, A., Indera, E., Yuristiary, Y., Palit, A. R. R., & Subkhan, S. (2025). Analisis Perbandingan Biaya Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku pada Ruas Jalan Sebele-Sei Asam Kabupaten Karimun. *Zona Sipil: Program Studi Teknik Sipil Universitas Batam*, 15(1). <https://ejurnal.univbatam.ac.id/index.php/Sipil/article/view/1765>
- Mohod, M. V., & Kadam, K. N. (2016). A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84-88. <https://doi.org/10.9790/1684-1303078488>
- Mulyono, A. T. (2015). *Audit Keselamatan Infrastruktur Jalan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Peterson, D. E. (2018). *Life-Cycle Cost Analysis of Pavements (NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 122)*. Transportation Research Board.
- Prasetya, E. J., Marleno, R., & Tjendani, H. T. (2022). Analisis biaya investasi perkerasan lentur dan perkerasan kaku (Studi kasus pada ruas Jalan Akses Rusun PPI_TPI Romokalisari Surabaya). *Jurnal Spesialis Teknik Sipil (JSPTS)*, 3(1), 12-23. <https://doi.org/10.30996/jspts.v3i1.7092>
- Tadzkirah, A. P., Rokhmawati, A., & Ingsih, I. S. (2025). Analisis Perbandingan Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku Berdasarkan Life Cycle Cost Analysis pada Ruas Jalan Sp. Banggo–Kempo Kabupaten Dompu Dengan Metode MDPJ 2024. *Jurnal Rekayasa Sipil (e-journal)*, 15(2), 346-355. <https://jim.unisma.ac.id/index.php/ft/article/view/29004>
- Tukimun, V. O., & Prawoto, A. (2024). Model Perbandingan Teknis dan Biaya Perkerasan Lentur dan Kaku pada Proyek Jalan di Kabupaten Kutai Timur. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(1), 3463-3474. <https://doi.org/10.31004/jptam.v8i1.12926>
- Ziar, A., Ulfat, S., Serat, Z., & Armal, M. A. (2024). Cost-effectiveness analysis of design methods for rigid and flexible pavement: A case study of urban road. *Archives of advanced engineering science*, 2(3), 134-141. <https://doi.org/10.47852/bonviewAAES32021264>