

Model Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) untuk Prioritas Preservasi Jalan Perkotaan

Endah Atika^{1*)}, Agus Erwansyah²⁾, Galang Fajar Pratama³⁾, Mega Wiji Pramana⁴⁾,

Askabul Muiza⁵⁾, Endah Praptiwi⁶⁾

^{1,2,3,4,5,6)} Program Studi Manajemen Konstruksi, Politeknik Madyathika Purbalingga

^{1*)} endah.atika77@gmail.com

²⁾ aguserwansyah86@gmail.com

³⁾ galangtus4@gmail.com

⁴⁾ megaaaja0012@gmail.com

⁵⁾ askabulmuiza@gmail.com

⁶⁾ praptiwiendah8@gmail.com

*Corresponding Author

Abstrak

Kerusakan jalan perkotaan tidak hanya menurunkan tingkat pelayanan, tetapi juga meningkatkan biaya operasional kendaraan, risiko keterlambatan distribusi, dan kebutuhan anggaran pemeliharaan yang semakin besar. Penelitian ini bertujuan menyusun model prioritas preservasi jalan berbasis integrasi mutu, risiko pelaksanaan, dan implikasi ekonomi pada ruas Jalan Letjen MT Haryono, Purbalingga. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan data observasi lapangan, dokumentasi kondisi perkerasan, wawancara pelaksana pekerjaan, serta kajian literatur terkini untuk menyusun parameter penilaian. Analisis dilakukan melalui identifikasi jenis kerusakan, penyebab, metode penanganan, pengendalian mutu dan pembobotan parameter penyusun IKMB. Hasil menunjukkan bahwa kerusakan dominan berupa retak ringan, ketidakrataan permukaan, ketidakekatan lapis permukaan dan kerusakan berat yang memerlukan rekonstruksi. Faktor penyebab utama meliputi beban kendaraan berlebih, tingginya volume lalu lintas, bertambahnya umur perkerasan, genangan akibat system drainase yang kurang memadai, serta ketidaksesuaian mutu campuran agregat. Perhitungan IKMB menghasilkan nilai pemeliharaan local retak ringan sebesar 63, Leveling dan overlay pada ketidakrataan sebesar 69, rekonstruksi titik kerusakan berat sebesar 85 dan perbaikan drainase pendukung sebesar 66. Kebaruan penelitian ini adalah usulan Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) sebagai alat bantu manajemen konstruksi untuk mengurutkan prioritas penanganan berdasarkan tingkat kerusakan, risiko lalu lintas, risiko mutu, dan kelayakan biaya. Model ini mengarahkan pemeliharaan dari pola reaktif menuju preservasi preventif yang lebih ekonomis.

Kata kunci : preservasi jalan, manajemen konstruksi, biaya siklus hidup, pengendalian mutu, ekonomi infrastruktur.

Abstract

Urban road deterioration not only reduces serviceability but also increases vehicle operating costs, distribution delays, and maintenance budget requirements. This study aims to develop a road preservation prioritization model based on the integration of quality, implementation risk, and economic implications for Letjen MT Haryono Road in Purbalingga, Indonesia. A case study approach was employed using field observations, pavement condition documentation, interviews with construction practitioners, and a review of recent literature to establish the assessment parameters. The analysis involved identifying pavement distress types, their causes, appropriate treatment methods, quality control measures, and weighting the parameters used to formulate the Quality–Cost Control Index (QCCI). The results indicate that the predominant pavement distresses include minor cracking, surface unevenness, surface layer debonding, and severe damage requiring reconstruction. The primary contributing factors are overloaded vehicles, high traffic volumes, pavement aging, water ponding caused by inadequate drainage systems, and non-compliance with aggregate mix quality. The QCCI analysis produced index values of 63 for localized maintenance of minor cracking, 69 for leveling and overlay treatments addressing surface unevenness, 85 for spot reconstruction of severely damaged pavement sections, and 66 for supporting drainage improvements. The novelty of this study lies in the proposed Quality–Cost Control Index (QCCI), which serves as a construction management decision-support tool for prioritizing road preservation based on pavement condition, traffic risk, quality risk, and cost feasibility. The

proposed model supports a transition from reactive maintenance toward more cost-effective preventive preservation strategies.

Keywords: *road preservation, construction management, life-cycle cost, quality control, infrastructure economy.*

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan aset infrastruktur publik yang menentukan kelancaran mobilitas masyarakat, distribusi barang, efisiensi logistik, dan pertumbuhan ekonomi wilayah. Pada level kabupaten/kota, kerusakan jalan sering terlihat sebagai masalah teknis perkerasan, padahal dampaknya meluas pada biaya sosial ekonomi, biaya operasional kendaraan, keterlambatan perjalanan, risiko keselamatan, serta peningkatan kebutuhan anggaran ketika penanganan terlambat. Oleh karena itu, pemeliharaan jalan perlu dipahami sebagai persoalan manajemen konstruksi dan ekonomi infrastruktur, bukan hanya kegiatan perbaikan fisik.

Dalam manajemen aset jalan, keputusan waktu penanganan memiliki pengaruh besar terhadap total biaya siklus hidup. Kajian terkini menunjukkan bahwa keterlambatan pemeliharaan preventif dapat meningkatkan biaya lembaga jalan dan biaya pengguna karena perkerasan mengalami penurunan kinerja secara bertahap tetapi biaya perbaikannya meningkat secara tidak linear (Babashamsi et al., 2022) (Guan et al., 2023) (Suwanto et al., 2024a). Pendekatan life-cycle cost analysis (LCCA) juga menegaskan bahwa pilihan material, waktu intervensi, durasi pekerjaan, dan gangguan lalu lintas harus dipertimbangkan bersama agar keputusan preservasi tidak hanya murah pada awal pekerjaan, tetapi ekonomis sepanjang umur layanan (A. Hasan et al., 2022) (U. Hasan et al., 2022) (Liu et al., 2023).

Ruas Jalan Letjen MT Haryono merupakan salah satu jalan kolektor perkotaan di Kabupaten Purbalingga yang menghubungkan kawasan perdagangan, permukiman, fasilitas pendidikan, dan pusat pelayanan publik sehingga memiliki intensitas lalu lintas yang relatif tinggi. Berdasarkan hasil survei lapangan tahun 2026, kerusakan perkerasan ditemukan pada beberapa segmen dengan dominasi retak memanjang dan melintang, ketidakrataan permukaan, pelepasan lapis permukaan, serta kerusakan lokal yang memerlukan rekonstruksi. Selama jam sibuk, ruas ini dilalui kendaraan penumpang, angkutan barang ringan hingga truk dengan muatan tinggi sehingga mempercepat penurunan kondisi perkerasan. Selain itu, beberapa titik mengalami genangan akibat kapasitas drainase samping yang belum optimal sehingga mempercepat kerusakan struktur perkerasan. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan preservasi terus meningkat, sementara alokasi anggaran pemeliharaan harus dibagi untuk banyak ruas jalan kabupaten sehingga diperlukan metode penentuan prioritas yang lebih objektif.

Permasalahan utama pada pekerjaan pemeliharaan jalan di tingkat daerah sering bukan hanya terbatasnya dana, tetapi juga bagaimana dana tersebut diprioritaskan, bagaimana mutu material dikendalikan, bagaimana pekerjaan lapangan disesuaikan dengan kondisi aktual, dan bagaimana risiko rework ditekan. Beberapa penelitian menekankan pentingnya optimasi pemilihan proyek pemeliharaan, prediksi penurunan kondisi perkerasan, serta pengambilan keputusan berbasis kinerja agar alokasi anggaran dapat memberikan manfaat ekonomi yang lebih tinggi (Beg, 2022) (Salman & Gursay, 2022) (Alonso-Solorzano et al., 2023) (Pourgholamali et al., 2023).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan metode penentuan prioritas pemeliharaan jalan melalui pendekatan Pavement Condition Index (PCI), Life-Cycle Cost Analysis (LCCA), Multi-Criteria Decision Making (MCDM), maupun optimasi anggaran. Namun, sebagian besar metode tersebut berorientasi pada kondisi perkerasan atau efisiensi biaya secara terpisah dan memerlukan data yang relatif lengkap serta analisis yang cukup kompleks. Pada praktik pengelolaan jalan di tingkat pemerintah daerah, keputusan awal preservasi sering kali harus dilakukan berdasarkan data lapangan yang terbatas sehingga diperlukan suatu indikator yang sederhana, mudah diterapkan, namun tetap mampu mengintegrasikan kondisi kerusakan, risiko mutu pekerjaan, risiko lalu lintas, risiko drainase, dan kelayakan biaya. Hingga saat ini belum ditemukan model indeks praktis yang menggabungkan seluruh aspek tersebut sebagai dasar penentuan prioritas preservasi jalan daerah.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun Model Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) sebagai alat bantu penentuan prioritas preservasi jalan yang mengintegrasikan aspek mutu pekerjaan, risiko pelaksanaan, dan efisiensi ekonomi pada ruas Jalan Letjen MT Haryono Kabupaten Purbalingga. Kebaruan penelitian terletak pada perumusan Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) yang memadukan skor tingkat kerusakan, paparan lalu lintas, risiko kendaraan overload, risiko drainase, risiko pengendalian mutu, dan kelayakan biaya sebagai alat bantu awal bagi pengelola jalan daerah. Dengan

pendekatan ini, artikel tidak berhenti pada deskripsi kerusakan, tetapi mengarahkan hasil observasi menjadi kerangka manajemen konstruksi yang dapat digunakan untuk menentukan prioritas program pemeliharaan secara lebih rasional dan ekonomis.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Manajemen Konstruksi pada Preservasi Jalan

Perspektif manajemen konstruksi, preservasi mencakup penentuan prioritas ruas, pemilihan metode penanganan, pengadaan penyedia jasa, pengendalian jadwal, pengendalian mutu, pengendalian biaya, serta koordinasi antara pemilik pekerjaan, konsultan perencana, konsultan pengawas, dan kontraktor. Efektivitas preservasi sangat dipengaruhi oleh kemampuan pengelola untuk mengubah data kerusakan menjadi keputusan program yang terukur.

Berbagai metode telah digunakan untuk menentukan prioritas preservasi jalan. Pendekatan yang paling banyak diterapkan adalah Pavement Management System (PMS), Pavement Condition Index (PCI), Life-Cycle Cost Analysis (LCCA), Markov deterioration model, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), serta optimasi berbasis algoritma. Masing-masing metode memiliki kemampuan yang berbeda dalam mengintegrasikan kondisi perkerasan, biaya, dan risiko pengambilan keputusan (Beg, 2022) (Pourgholamali et al., 2023) (Huang et al., 2024).

Meskipun mampu menghasilkan keputusan yang komprehensif, sebagian besar metode tersebut memerlukan basis data historis yang lengkap, survei kondisi berkala, parameter lalu lintas yang rinci, serta perangkat lunak khusus. Kondisi tersebut menjadi kendala bagi banyak pemerintah daerah yang masih mengandalkan observasi lapangan dan keterbatasan data aset jalan.

2.2 Ekonomi Siklus Hidup dan Biaya Pengguna Jalan

LCCA telah menjadi pendekatan utama dalam evaluasi alternatif preservasi karena mempertimbangkan biaya selama umur layanan, termasuk biaya pemeliharaan dan biaya pengguna jalan. Namun demikian, sebagian besar studi LCCA berfokus pada evaluasi ekonomi setelah alternatif penanganan ditentukan. Pendekatan tersebut belum memberikan mekanisme sederhana untuk memilih prioritas awal ruas jalan ketika pemerintah daerah harus menentukan lokasi penanganan berdasarkan data lapangan yang terbatas.

Penelitian LCA-LCCA pada perkerasan aspal daur ulang menunjukkan bahwa keputusan material dan metode penanganan dapat memengaruhi biaya sekaligus emisi selama siklus hidup (A. Hasan et al., 2022) (U. Hasan et al., 2022) (Liu et al., 2023). Penelitian lain menekankan bahwa penentuan waktu pemeliharaan preventif yang optimal dapat menekan biaya total dan menghindari kondisi jalan menurun ke level yang membutuhkan rekonstruksi mahal (Babashamsi et al., 2022) (Guan et al., 2023) (Abaza, 2024). Dalam konteks daerah, prinsip ini relevan karena anggaran pemeliharaan biasanya terbatas, sedangkan biaya akibat keterlambatan perbaikan sering ditanggung masyarakat sebagai pengguna jalan.

2.3 Pemodelan Kerusakan dan Prioritas Penanganan

Kerusakan perkerasan jalan terdiri atas berbagai bentuk, seperti retak, lubang, alur, penurunan, ketidakrataan, dan pelepasan agregat, yang memiliki karakteristik penyebab dan tingkat keparahan berbeda sehingga memerlukan strategi penanganan yang bervariasi, mulai dari pemeliharaan preventif hingga rekonstruksi struktural. Pemodelan deteriorasi dengan Markov chain dan matriks transisi membantu pengelola memperkirakan perubahan kondisi perkerasan dari waktu ke waktu, sehingga program pemeliharaan dapat dibuat lebih antisipatif (Salman & Gursoy, 2022) (Alonso-Solorzano et al., 2023).

Dalam praktik manajemen konstruksi, prioritas penanganan perlu memperhitungkan tingkat kerusakan, fungsi ruas, volume lalu lintas, risiko keselamatan, dampak ekonomi, dan kesiapan anggaran. Penelitian terbaru juga mengembangkan kerangka berbasis data dan pengetahuan untuk menghasilkan strategi pemeliharaan otomatis serta optimasi penjadwalan yang mempertimbangkan dinamika lalu lintas (Prajapati et al., 2024) (Li et al., 2025). Meskipun demikian, banyak pemerintah daerah belum memiliki data kuantitatif lengkap, sehingga diperlukan indeks sederhana yang dapat menjembatani data observasi lapangan dengan kebutuhan pengambilan keputusan awal.

2.4 Pengendalian Mutu, Material, dan Efisiensi Ekonomi

Pengendalian mutu pada pekerjaan perkerasan aspal mencakup pemeriksaan ketebalan, kepadatan, berat jenis, temperatur, gradasi agregat, dan kesesuaian campuran terhadap job mix formula. Kegagalan mutu akan menghasilkan pekerjaan berumur pendek, memicu rework, dan meningkatkan biaya total proyek. Dalam kasus Jalan Letjen MT Haryono, laporan lapangan menunjukkan adanya pemeriksaan core drill untuk mengevaluasi ketebalan dan kepadatan lapisan, serta pengawasan konsultan untuk memastikan kesiapan alat dan kesesuaian pekerjaan di lapangan.

Aspek ekonomi juga berkaitan dengan pemilihan material. Penelitian 2022-2025 banyak menyoroti penggunaan reclaimed asphalt pavement, material daur ulang, limbah plastik, dan limbah industri untuk menekan biaya siklus hidup dan dampak lingkungan (Assaf & Abu Abdo, 2024) (Zhao & Yang, 2022) (Zhao & Yang, 2023a) (Zhao & Yang, 2023b) (Zhao & Yang, 2024) (Hao et al., 2024) (Sajid et al., 2024) (Wu et al., 2025). Untuk jalan daerah, temuan tersebut dapat menjadi arah pengembangan lanjutan, tetapi tetap harus dikontrol melalui spesifikasi teknis, uji laboratorium, dan evaluasi umur layanan agar penghematan awal tidak berubah menjadi biaya pemeliharaan berulang.

Tabel 1. Peta Literatur Mutakhir untuk Penyusunan Model Preservasi Mutu-Biaya

Fokus kajian	Kontribusi terhadap artikel	Rujukan utama	Implikasi pada kasus MT Haryono
LCCA dan LCA perkerasan	Menilai biaya awal, biaya pemeliharaan, biaya pengguna, dan nilai siklus hidup.	Babashamsi et al. (2022); Hasan et al. (2022a, 2022b); Liu et al. (2023); Guan et al. (2023); Suwanto et al. (2024); Abaza (2024)	Leveling dan rekonstruksi harus dibandingkan dengan biaya keterlambatan, gangguan lalu lintas, dan umur layanan.
Manajemen perkerasan	Mengarahkan penilaian kondisi menjadi program prioritas dan sistem keputusan.	Beg (2022); Salman & Gursay (2022); Alonso-Solorzano et al. (2023); Huang et al. (2024); Li et al. (2025)	Data retak, ketidakrataaan, overload, dan drainase perlu diubah menjadi indeks prioritas.
Optimasi program	Menyeimbangkan mutu teknis, biaya, kinerja, dan jadwal pemeliharaan.	Pourgholamali et al. (2023); Prajapati et al. (2024)	Ruas dengan kerusakan berat dan dampak logistik tinggi ditempatkan pada prioritas awal.
Risiko biaya proyek	Menjelaskan pentingnya estimasi biaya, pengawasan, dan pengendalian deviasi lapangan.	Ammar et al. (2022); Welde & Klakegg (2024); Xegwana et al. (2024)	Perbedaan kondisi aktual dan gambar rencana perlu dikelola agar tidak memicu rework dan pembengkakan biaya.
Material dan ekonomi sirkular	Menunjukkan peluang material daur ulang untuk efisiensi biaya dan lingkungan.	Assaf & Abu Abdo (2022); Zhao & Yang (2022, 2023a, 2023b, 2024); Hao et al. (2024); Sajid et al. (2024); Wu et al. (2025)	Dapat menjadi alternatif penelitian lanjutan untuk lapis perkerasan, dengan tetap mempertahankan mutu teknis.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-kualitatif yang diperkaya dengan sintesis literatur internasional. Objek kajian adalah program penanganan perbaikan Jalan Letjen MT Haryono, Purbalingga. Data dasar diambil dari laporan teknologi jalan raya yang memuat observasi lapangan,

wawancara dengan pelaksana pekerjaan, dokumentasi visual, serta uraian tahap pelaksanaan dan pengendalian mutu. Data tersebut kemudian disusun kembali dalam kerangka manajemen konstruksi dan ekonomi infrastruktur.

Tahapan analisis dilakukan melalui empat langkah. Pertama, mengidentifikasi jenis kerusakan dan faktor penyebab. Kedua, memetakan metode penanganan yang relevan, yaitu pemeliharaan lokal, leveling, rehabilitasi, dan rekonstruksi. Ketiga, mengevaluasi proses pengendalian mutu melalui pengujian core drill, pemeriksaan ketebalan, pemeriksaan kepadatan, dan pengawasan konsultan. Keempat, menyusun model prioritas berbasis Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) sebagai alat bantu awal pengambilan keputusan.

IKMB dikembangkan sebagai indeks komposit sederhana dengan skala 0-100. Skor setiap kriteria diberikan pada rentang 1-5, yaitu 1 berarti sangat rendah dan 5 berarti sangat tinggi. Formula yang digunakan adalah:

$$IKMB_i = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^n (w_j \times S_{ij})}{5} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana $IKMB_i$ adalah nilai IKMB alternatif penanganan ke-i; w_j adalah bobot kriteria ke-j; S_{ij} adalah skor kriteria ke-j pada alternative ke-i.

Enam kriteria yang digunakan terdiri atas tingkat kerusakan, paparan lalu lintas, risiko kendaraan overload, risiko drainase, risiko mutu pekerjaan, dan kelayakan biaya. Skor setiap kriteria menggunakan skala Likert 1–5, dengan interpretasi sebagaimana pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Penilaian IKMB

Skor	Interprestasi
1	Sangat rendah/tidak berpengaruh
2	Rendah
3	Sedang
4	Tinggi
5	Sangat Tinggi/sangat berpengaruh

Penilaian setiap kriteria dilakukan berdasarkan hasil observasi lapangan. Sebagai contoh, skor tingkat kerusakan ditentukan berdasarkan tingkat keparahan kerusakan perkerasan, sedangkan skor risiko drainase diberikan berdasarkan keberadaan genangan atau fungsi saluran drainase di sekitar lokasi.

Bobot masing-masing kriteria ditetapkan melalui expert judgement yang disusun berdasarkan sintesis hasil penelitian terdahulu mengenai manajemen perkerasan, life-cycle cost analysis, risiko konstruksi, dan pengendalian mutu, kemudian disesuaikan dengan karakteristik preservasi jalan daerah. Bobot yang digunakan terdiri atas tingkat kerusakan (0,30), paparan lalu lintas (0,20), risiko overload (0,15), risiko drainase (0,15), risiko mutu pekerjaan (0,10), dan kelayakan biaya (0,10). Penetapan bobot tersebut bersifat konseptual sehingga penelitian ini diposisikan sebagai pengembangan model awal (*preliminary model*) yang masih memerlukan kalibrasi menggunakan data lalu lintas, biaya proyek, dan umur layanan pada penelitian berikutnya.

Validasi internal model dilakukan melalui triangulasi hasil observasi lapangan, dokumentasi visual, serta kesesuaian dengan temuan pada literatur ilmiah yang relevan untuk memastikan konsistensi penilaian setiap kriteria dalam IKMB. Selain itu, dilakukan uji sensitivitas sederhana dengan mengubah bobot masing-masing kriteria sebesar $\pm 10\%$ secara bergantian untuk mengevaluasi kestabilan urutan prioritas yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan bobot tersebut tidak mengubah urutan prioritas utama, sehingga model IKMB memiliki tingkat konsistensi yang memadai sebagai alat bantu awal dalam penentuan prioritas preservasi jalan. Meskipun demikian, karena model ini masih merupakan pengembangan awal, kalibrasi menggunakan data lalu lintas, biaya pemeliharaan, dan umur layanan perkerasan yang lebih komprehensif tetap diperlukan pada penelitian selanjutnya guna meningkatkan akurasi dan reliabilitas model.

Untuk mengevaluasi kestabilan model, dilakukan uji sensitivitas sederhana dengan menaikkan dan menurunkan bobot setiap kriteria sebesar $\pm 10\%$ secara bergantian, kemudian bobot dinormalisasi sehingga

jumlah total tetap satu. Nilai IKMB dihitung kembali dan dibandingkan dengan hasil awal untuk mengetahui perubahan nilai indeks maupun urutan prioritas preservasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Kerusakan Ruas Jalan Letjen MT Haryono



Gambar 1. Lokasi pengamatan ruas Jalan Letjen MT Haryono, Purbalingga

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa ruas Jalan Letjen MT Haryono memiliki fungsi penting sebagai jalur aktivitas masyarakat dan distribusi barang. Secara manajemen konstruksi, fungsi ruas ini meningkatkan konsekuensi ekonomi jika kerusakan dibiarkan karena gangguan pada permukaan jalan berpotensi menaikkan biaya perjalanan, menambah waktu tempuh, dan mengganggu kelancaran pengiriman material.

Kerusakan yang teridentifikasi meliputi retak ringan, ketidakrataan atau penurunan permukaan, ketidaklekatan lapisan permukaan, serta kerusakan berat yang membutuhkan rekonstruksi. Faktor penyebab utama adalah kendaraan bermuatan lebih, lalu lintas berulang, umur perkerasan yang menurun, genangan air karena drainase samping tidak memadai, serta risiko komposisi agregat yang tidak sesuai dengan rancangan campuran. Kerusakan tersebut menunjukkan bahwa penanganan tidak cukup dilakukan dengan tambal sulam, tetapi harus dikaitkan dengan pencegahan sumber kerusakan.

Tabel 3. Sintesis Kerusakan, Penyebab, dan Konsekuensi Ekonomi

Temuan kerusakan	Penyebab dominan	Risiko mutu	Dampak ekonomi	Arah penanganan
Retak ringan	Beban berulang, umur lapisan, perubahan cuaca	Retak berkembang menjadi lubang jika air masuk	Meningkatkan biaya perawatan dan risiko kendaraan	Sealing, patching lokal, pemeliharaan rutin
Ketidakrataan atau penurunan permukaan	Overload dan daya dukung lapisan menurun	Kenyamanan turun dan risiko genangan meningkat	Waktu tempuh dan biaya operasional kendaraan meningkat	Leveling sebelum overlay
Ketidaklekatan permukaan	Kondisi lapisan lama, kebersihan permukaan, kualitas tack coat	Overlay tidak menyatu dan rawan delaminasi	Potensi rework dan pemborosan material	Pembersihan, tack coat, kontrol suhu dan pemadatan

Temuan kerusakan	Penyebab dominan	Risiko mutu	Dampak ekonomi	Arah penanganan
Kerusakan berat	Overload, drainase buruk, kegagalan struktural	Perbaikan lokal tidak cukup	Biaya rekonstruksi tinggi dan gangguan lalu lintas besar	Rekonstruksi/rehabilitasi struktural
Genangan sisi jalan	Drainase samping tidak memadai	Air merusak ikatan aspal-agregat	Mempercepat siklus kerusakan dan kebutuhan anggaran	Perbaikan drainase sebagai program pendukung

4.2 Tahap Pelaksanaan dan Pengendalian Program



Gambar 2. Tahap pembersihan permukaan sebelum penanganan perkerasan

Tahap pelaksanaan pemeliharaan pada kasus ini diawali dengan penentuan prioritas ruas oleh Dinas PUPR berdasarkan tingkat kerusakan dan ketersediaan anggaran. Tidak semua ruas dapat ditangani bersamaan, sehingga keputusan prioritas menjadi titik kritis manajemen konstruksi. Setelah itu dilakukan pemilihan metode perbaikan sesuai kondisi ruas. Pelaksanaan pekerjaan dilakukan oleh pihak ketiga melalui mekanisme tender atau lelang, sedangkan pengawasan lapangan dilakukan bersama konsultan supervisi dan unsur teknis dinas.

Secara ekonomi, mekanisme prioritas dan metode perbaikan menentukan efektivitas penggunaan anggaran. Apabila ruas dengan kerusakan berat tidak segera ditangani, biaya dapat meningkat karena kerusakan berkembang ke lapisan struktural. Sebaliknya, apabila ruas yang masih ringan diberi penanganan preventif, biaya awal lebih kecil dan umur layanan dapat diperpanjang. Hal ini sejalan dengan prinsip preservasi preventif yang menekankan bahwa waktu intervensi yang tepat lebih ekonomis daripada menunggu kerusakan menjadi berat.

Kendala utama pada tahap pelaksanaan adalah perbedaan kondisi aktual lapangan dengan gambar perencanaan. Dalam manajemen konstruksi, kondisi ini harus dikendalikan melalui survei awal yang lebih detail, rapat teknis sebelum pelaksanaan, pencatatan as-built, serta mekanisme persetujuan perubahan pekerjaan. Tanpa pengendalian tersebut, risiko pekerjaan tambah, keterlambatan, dan pembengkakan biaya akan meningkat.

4.3 Pengendalian Mutu Pekerjaan



Gambar 3. Kegiatan clearing dan persiapan area kerja

Pengendalian mutu dilakukan melalui pengujian material dan pengawasan pelaksanaan. Sampel perkerasan diambil menggunakan core drill untuk memeriksa ketebalan dan kepadatan lapangan. Sampel kemudian diperiksa di laboratorium melalui penimbangan dalam kondisi kering dan saturated surface dry (SSD), sehingga volume, berat jenis, dan tingkat kepadatan campuran dapat dievaluasi. Prosedur ini penting

karena kualitas pemadatan dan ketebalan lapis perkerasan berhubungan langsung dengan umur layanan dan risiko kerusakan dini.

Pengawasan oleh konsultan supervisi juga memegang peran penting. Sebelum pekerjaan penghamparan dimulai, kontraktor harus melaporkan kesiapan armada alat berat dan kondisi lapangan kepada pengawas. Pemeriksaan manual atau visual pada saat aspal masih panas memang dapat membantu pengendalian awal, tetapi kurang efisien apabila tidak didukung alat ukur dan dokumentasi yang memadai. Karena itu, pengendalian mutu sebaiknya didukung oleh check list mutu, uji suhu, uji kepadatan, dokumentasi lokasi, dan pencatatan hasil core drill sebagai dasar pembayaran serta evaluasi kinerja kontraktor.

Dari sisi ekonomi proyek, pengendalian mutu adalah mekanisme pencegahan biaya kegagalan. Pekerjaan yang tidak memenuhi ketebalan, kepadatan, atau ikatan antar lapisan akan menimbulkan biaya perbaikan ulang, klaim, penundaan, dan penurunan kepercayaan publik. Dengan demikian, pengendalian mutu bukan sekadar prosedur teknis, melainkan instrumen pengendalian biaya siklus hidup.

4.4 Model Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB)

Berdasarkan temuan lapangan dan sintesis literatur, IKMB digunakan untuk mengurutkan prioritas penanganan. Kriteria tingkat kerusakan diberi bobot terbesar karena menentukan kebutuhan teknis. Paparan lalu lintas/logistik diberi bobot tinggi karena ruas yang mendukung distribusi barang memiliki dampak ekonomi lebih besar apabila rusak atau terganggu. Risiko overload dan drainase menjadi faktor penyebab percepatan kerusakan. Risiko mutu/rework dan kelayakan biaya dipakai untuk menjaga agar pekerjaan tidak hanya prioritas secara teknis, tetapi juga realistis untuk dilaksanakan.

Tabel 4. Perhitungan Konseptual IKMB pada Program Penanganan

Alternatif penanganan	Kerusakan 0,30	Lalu lintas 0,20	Overload 0,15	Drainase 0,15	Mutu 0,10	Biaya 0,10	IKMB
Pemeliharaan lokal retak ringan	2	4	4	3	2	5	63
Leveling dan overlay pada ketidakrataan	3	4	4	3	3	4	69
Rekonstruksi titik kerusakan berat	5	4	5	4	4	2	85
Perbaikan drainase pendukung	3	3	3	5	3	3	66

Hasil perhitungan konseptual menunjukkan bahwa rekonstruksi titik kerusakan berat memperoleh skor tertinggi yaitu 85. Artinya, secara teknis dan ekonomi, segmen dengan kerusakan berat perlu mendapat prioritas karena berisiko menurunkan layanan dan menambah biaya jika terlambat ditangani. Leveling dan overlay memperoleh skor 69 karena berhubungan dengan kenyamanan, kelancaran lalu lintas, dan pencegahan kerusakan lanjutan. Perbaikan drainase memperoleh skor 66 meskipun tidak selalu terlihat sebagai pekerjaan perkerasan utama, karena genangan air merupakan akar penyebab percepatan kerusakan. Pemeliharaan lokal retak ringan memperoleh skor 63, tetapi tetap penting karena biaya penanganannya relatif rendah dan dapat mencegah retak berkembang menjadi lubang.

Model ini membantu mengubah data observasi menjadi keputusan program. Jika Dinas PUPR memiliki keterbatasan anggaran, pekerjaan dapat dibagi menjadi dua paket: paket prioritas struktural untuk rekonstruksi dan leveling, serta paket preventif untuk drainase dan perbaikan retak ringan. Strategi tersebut lebih seimbang daripada hanya memperbaiki kerusakan yang tampak paling parah, karena sumber penyebab seperti overload dan air tetap harus dikendalikan.

4.5 Uji Sensitivitas IKMB

Uji sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan model IKMB terhadap perubahan bobot kriteria. Pengujian dilakukan dengan menaikkan dan menurunkan bobot setiap kriteria sebesar $\pm 10\%$ secara bergantian, kemudian bobot dinormalisasi kembali sehingga total bobot tetap sama ($\Sigma w = 1$). Nilai IKMB setiap alternatif penanganan dihitung kembali dan dibandingkan dengan hasil perhitungan awal untuk mengetahui apakah terjadi perubahan urutan prioritas.

Tabel 5. Bobot Awal dan Bobot Uji Sensitivitas

Kriteria	Bobot Awal	Bobot Setelah Penyesuaian*
Tingkat kerusakan	0,30	0,33/0,27
Paparan lalu lintas	0,20	0,22/0,18
Risiko overload	0,15	0,165/0,135
Risiko drainase	0,15	0,165/0,135
Risiko mutu pekerjaan	0,10	0,11/0,09
Kelayakan biaya	0,10	0,11/0,09

*Bobot kemudian dinormalisasi sehingga total bobot tetap 1,00.

Tabel 6. Hasil Uji Sensitivitas IKMB

Alternatif Penanganan	IKMB Awal	IKMB Setelah Uji Sensitivitas	Urutan
Rekonstruksi kerusakan berat	85	83-87	1
Leveling dan overlay	69	68-70	2
Perbaikan drainase	66	65-67	3
Pemeliharaan local retak ringan	63	62-64	4

Hasil uji sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan bobot masing-masing kriteria sebesar $\pm 10\%$ hanya menyebabkan perubahan kecil pada nilai IKMB, namun tidak mengubah urutan prioritas penanganan. Hal ini menunjukkan bahwa model IKMB memiliki tingkat kestabilan yang cukup baik terhadap variasi bobot dalam kisaran tersebut. Dengan demikian, indeks yang diusulkan relatif robust sebagai alat bantu awal dalam menentukan prioritas preservasi jalan pada kondisi data yang terbatas. Meskipun demikian, penelitian lanjutan tetap diperlukan untuk mengkalibrasi bobot menggunakan metode yang lebih formal, seperti *Analytical Hierarchy Process (AHP)* atau *Delphi*, sehingga bobot yang digunakan tidak hanya didasarkan pada *expert judgement* tetapi juga memperoleh validasi empiris yang lebih kuat.

4.6 Keterkaitan dengan Aspek Ekonomi dan Manajemen Konstruksi

Hasil perhitungan Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) menunjukkan bahwa setiap alternatif penanganan memiliki tingkat prioritas yang berbeda berdasarkan kombinasi kondisi kerusakan, risiko lalu lintas, risiko mutu, risiko drainase, dan kelayakan biaya. Rekonstruksi pada segmen dengan kerusakan berat memperoleh nilai IKMB tertinggi sebesar 85, diikuti oleh leveling dan *overlay* sebesar 69, perbaikan drainase sebesar 66, serta pemeliharaan lokal retak ringan sebesar 63. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa keputusan preservasi tidak hanya ditentukan oleh tingkat kerusakan perkerasan, tetapi juga dipengaruhi oleh besarnya risiko teknis dan konsekuensi ekonomi apabila penanganan ditunda (Tiwari et al., 2025)(Suwanto et al., 2024b).

Dari perspektif ekonomi infrastruktur, nilai IKMB yang tinggi pada pekerjaan rekonstruksi mencerminkan besarnya potensi kerugian apabila kerusakan berat tidak segera ditangani. Kerusakan struktural yang terus berkembang akan meningkatkan biaya pemeliharaan di masa mendatang, memperbesar biaya operasional kendaraan, meningkatkan konsumsi bahan bakar akibat permukaan jalan yang tidak rata, serta menimbulkan kerugian waktu perjalanan bagi pengguna jalan. Sebaliknya, meskipun pemeliharaan lokal retak ringan memiliki nilai IKMB yang lebih rendah, tindakan preventif tetap penting karena mampu memperlambat proses deteriorasi dan mencegah berkembangnya kerusakan menjadi rehabilitasi atau rekonstruksi yang memerlukan biaya jauh lebih besar. Temuan ini sejalan dengan konsep *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)* yang menekankan bahwa intervensi pada waktu yang tepat dapat meminimalkan biaya selama umur layanan perkerasan (Tiwari et al., 2025).

Dari sudut pandang manajemen konstruksi, IKMB memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan penentuan prioritas yang hanya berdasarkan kondisi visual. Penilaian tidak hanya mempertimbangkan tingkat kerusakan, tetapi juga memasukkan risiko mutu pekerjaan, paparan lalu lintas, risiko kendaraan bermuatan lebih, kondisi drainase, serta aspek kelayakan biaya. Integrasi beberapa parameter tersebut menghasilkan dasar pengambilan keputusan yang lebih rasional karena mencerminkan kondisi teknis sekaligus risiko pelaksanaan proyek. Sebagai contoh, lokasi dengan kerusakan sedang tetapi berada pada ruas dengan volume lalu lintas tinggi dan sistem drainase yang kurang memadai dapat memperoleh prioritas lebih tinggi dibandingkan lokasi dengan kerusakan serupa tetapi memiliki risiko operasional yang lebih rendah.

Selain mendukung penentuan prioritas teknis, IKMB juga berpotensi meningkatkan efektivitas pengelolaan anggaran preservasi jalan. Pada kondisi keterbatasan anggaran daerah, seluruh ruas yang mengalami kerusakan umumnya tidak dapat ditangani secara bersamaan. Oleh karena itu, penggunaan indeks komposit seperti IKMB dapat membantu pengelola jalan menentukan urutan penanganan berdasarkan tingkat urgensi dan konsekuensi ekonomi sehingga alokasi sumber daya menjadi lebih efisien (Chen et al., 2025). Pendekatan ini mendukung prinsip asset management, yaitu mengoptimalkan manfaat pelayanan infrastruktur melalui penggunaan anggaran yang terukur, transparan, dan berbasis risiko.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena komponen biaya dalam IKMB belum didasarkan pada data rinci biaya siklus hidup maupun biaya operasional kendaraan, melainkan pada indikator kelayakan biaya yang disusun berdasarkan observasi lapangan dan sintesis literatur (Suwanto et al., 2024b). Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengintegrasikan data *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)*, *Vehicle Operating Cost (VOC)*, dan data lalu lintas yang lebih rinci agar bobot setiap parameter dapat dikalibrasi secara empiris. Dengan pengembangan tersebut, IKMB tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu penentuan prioritas preservasi, tetapi juga dapat berkembang menjadi instrumen pendukung pengambilan keputusan dalam sistem manajemen aset jalan yang lebih komprehensif (Boakye & Okte, 2025).

5. PENUTUP

Penelitian ini berhasil mengembangkan Indeks Kendali Mutu-Biaya (IKMB) sebagai model indeks komposit untuk mendukung penentuan prioritas preservasi jalan melalui integrasi tingkat kerusakan, paparan lalu lintas, risiko kendaraan bermuatan lebih, risiko drainase, risiko mutu pekerjaan, dan kelayakan biaya. Model ini merupakan kontribusi penelitian dalam bidang manajemen konstruksi karena menyediakan pendekatan yang sederhana dan aplikatif bagi pengelola jalan daerah yang memiliki keterbatasan data maupun sumber daya dalam proses pengambilan keputusan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerusakan pada ruas Jalan Letjen MT Haryono, Kabupaten Purbalingga, didominasi oleh retak ringan, ketidakrataan permukaan, ketidaklekatan lapis permukaan, dan kerusakan berat yang memerlukan rekonstruksi. Faktor penyebab utama meliputi kendaraan bermuatan lebih, tingginya volume lalu lintas, bertambahnya umur perkerasan, genangan akibat sistem drainase yang kurang memadai, serta potensi ketidaksesuaian mutu material. Berdasarkan perhitungan IKMB, rekonstruksi pada kerusakan berat memperoleh nilai prioritas tertinggi sebesar 85, diikuti leveling dan overlay sebesar 69, perbaikan drainase sebesar 66, dan pemeliharaan lokal retak ringan sebesar 63. Hasil tersebut menunjukkan bahwa prioritas preservasi tidak hanya ditentukan oleh tingkat kerusakan, tetapi juga oleh besarnya risiko teknis, risiko mutu, risiko lalu lintas, dan implikasi ekonomi dari setiap alternatif penanganan.

Dari perspektif manajemen konstruksi, penerapan IKMB dapat mendukung proses penyusunan program preservasi jalan yang lebih objektif, transparan, dan berbasis risiko. Penggunaan indeks komposit ini memungkinkan pengelola jalan mengalokasikan sumber daya secara lebih efektif, mengurangi potensi rework

akibat kegagalan mutu, serta mengarahkan strategi pemeliharaan dari pendekatan reaktif menuju preservasi preventif sehingga biaya siklus hidup infrastruktur dapat ditekan.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena bobot setiap kriteria disusun berdasarkan expert judgement dan sintesis literatur, sedangkan komponen ekonomi belum didukung oleh data rinci biaya siklus hidup maupun biaya operasional kendaraan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu melakukan validasi pada berbagai karakteristik ruas jalan, mengkalibrasi bobot menggunakan metode seperti *Analytical Hierarchy Process (AHP)* atau *Delphi*, serta mengintegrasikan data *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)*, *Vehicle Operating Cost (VOC)*, volume lalu lintas, riwayat pemeliharaan, dan biaya konstruksi aktual. Pengembangan tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi, reliabilitas, dan penerapan IKMB sebagai bagian dari sistem manajemen aset jalan dan pendukung pengambilan keputusan preservasi jalan di tingkat pemerintah daerah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaza, K. A. (2024). A novel life-cycle analysis approach using pavement performance curves with cost and performance considerations. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 778–792. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2405570>
- Alonso-Solorzano, Á., Pérez-Acebo, H., Findley, D. J., & Gonzalo-Orden, H. (2023). Transition probability matrices for pavement deterioration modelling with variable duty cycle times. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2278694>
- Assaf, H., & Abu Abdo, A. (2024). Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 36(7), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.001>
- Babashamsi, P., Khahro, S. H., Omar, H. A., Al-Sabaei, A. M., Memon, A. M., Milad, A., Khan, M. I., Sutanto, M. H., & Yusoff, N. I. M. (2022). Perspective of Life-Cycle Cost Analysis and Risk Assessment for Airport Pavement in Delaying Preventive Maintenance. *Sustainability*, 14(5), 2905. <https://doi.org/10.3390/su14052905>
- Beg, M. A. (2022). Pavement Management Programs Based on Quantitative Performance Targets. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(6), 721–730. <https://doi.org/10.1177/03611981221076125>
- Boakye, J., & Okte, E. (2025). Which impacts matter for pavement management decisions? Quantifying social sustainability based on a capability approach. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 29, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101312>
- Chen, Q., Yu, B., Wang, Y., Shao, X., Pang, Z., & Zhang, Y. (2025). Multidimensional automated decision support for asphalt pavement maintenance using the BIM-LCA-LCCA method. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2508343>
- Guan, X., Zhang, H., Du, X., Zhang, X., & Sun, M. (2023). An Improved Method for Optimizing the Timing of Preventive Maintenance of Pavement: Integrating LCA and LCCA. *Applied Sciences*, 13(19), 10629. <https://doi.org/10.3390/app131910629>
- Hao, G., He, M., Lim, S. M., Ong, G. P., Zulkati, A., & Kapilan, S. (2024). Recycling of plastic waste in porous asphalt pavement: Engineering, environmental, and economic implications. *Journal of Cleaner Production*, 440, 140865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140865>
- Hasan, A., Hasan, U., Whyte, A., & Al Jassmi, H. (2022). Lifecycle Analysis of Recycled Asphalt Pavements: Case Study Scenario Analyses of an Urban Highway Section. *CivilEng*, 3(2), 242–262. <https://doi.org/10.3390/civileng3020015>
- Hasan, U., Whyte, A., Al Jassmi, H., & Hasan, A. (2022). Lifecycle Cost Analysis of Recycled Asphalt Pavements: Determining Cost of Recycled Materials for an Urban Highway Section. *CivilEng*, 3(2), 316–331. <https://doi.org/10.3390/civileng3020019>
- Huang, L.-L., Lin, J.-D., Huang, W.-H., Kuo, C.-H., Chiou, Y.-S., & Huang, M.-Y. (2024). Developing Pavement Maintenance Strategies and Implementing Management Systems. *Infrastructures*, 9(7), 101. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9070101>
- Liu, Y., Li, H., Wang, H., Wang, Y., & Han, S. (2023). Integrated Life Cycle Analysis of Cost and CO2 Emissions from Vehicles and Construction Work Activities in Highway Pavement Service Life. *Atmosphere*, 14(2), 194. <https://doi.org/10.3390/atmos14020194>

- Li, W., Chen, L., Chen, X., Chen, R., Qian, Z., Chen, D., & Song, Y. (2025). A data-and-knowledge-driven framework for automated generation of asphalt pavement maintenance strategies. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2458731>
- Pourgholamali, M., Labi, S., & Sinha, K. C. (2023). Multi-objective optimization in highway pavement maintenance and rehabilitation project selection and scheduling: A state-of-the-art review. *Journal of Road Engineering*, 3(3), 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.05.003>
- Prajapati, A. K., Sengupta, A., & Guler, S. I. (2024). Accounting for Traffic Dynamics in Pavement Maintenance Scheduling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(7), 361–375. <https://doi.org/10.1177/03611981231206176>
- Sajid, Z. W., Hussian, A., Khan, M. U. A., Alqahtani, F. K., & Ullah, F. (2024). Technical, Economic, and Environmental Sustainability Assessment of Reclaimed Asphalt and Waste Polyethylene Terephthalate Pavements. *Sustainability*, 16(12), 4911. <https://doi.org/10.3390/su16124911>
- Salman, B., & Gursoy, B. (2022). Markov chain pavement deterioration prediction models for local street networks. *Built Environment Project and Asset Management*, 12(6), 853–870. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-09-2021-0117>
- Suwarto, F., Parry, T., & Airey, G. (2024a). Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 25(8), 1631–1657. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149>
- Suwarto, F., Parry, T., & Airey, G. (2024b). Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 25(8), 1631–1657. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149>
- Tiwari, A., Ansari, M. T., Cook, A., Hedden, J., Ogundipe, T., Ortlieb, J., Nunez, T., Roy, A., Turben, T., & Braham, A. (2025). Comparative life-cycle cost analysis of flexible and rigid pavement: a case study of four Arkansas roadway sections. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2489044>
- Wu, S., Bhatt, B., & Kenney, C. (2025). Towards carbon neutrality: a comprehensive review of sustainable materials for asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 26(10), 2431–2460. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2443518>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2022). Performance characterization and life cycle assessment of semi-flexible pavement after composite modification of cement-based grouting materials by desulfurization ash, fly ash, and rubber powder. *Construction and Building Materials*, 359, 129549. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129549>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2023a). Design and performance evaluation of a new green pavement: 100% recycled asphalt pavement and 100% industrial solid waste. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138483>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2023b). Life cycle assessment and multi-index performance evaluation of semi-flexible pavement after composite modification by using fly ash, rubber particles, warm mixing asphalt and recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 364, 129945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129945>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2024). Life-cycle assessment of sustainable pavement based on the coordinated application of recycled asphalt pavement and solid waste: Environment and economy. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140203>