



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 458-468
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Pengaruh Penggunaan Lapisan Aspal Karet Terhadap Kinerja Perkerasan Jalan Yang Berkelanjutan

Frendy Saputra^{1*}, Rezi Munizar²

^{1,2} Universitas Ratu Samban, Indonesia

email: frendy99@gmail.com¹

Article Info :

Received:
21-06-2026
Revised:
25-06-2026
Accepted:
30-06-2026

Abstract

The escalating demands on road transport infrastructure require the development of resilient, sustainable pavement materials capable of withstanding heavy axle loads and climate extremes. This nonempirical research provides a comprehensive mechanistic synthesis demonstrating that elastomeric polymer integration significantly enhances binder viscosity, reduces penetration values, and elevates softening points. On a macrostructural level, these reological adjustments optimize volumetric parameters by systematically reducing air voids and reinforcing internal cohesion, which leads to a substantial increase in Marshall stability values. Mechanistic analysis indicates that rubber modified mixtures exhibit superior shear resistance and dynamic strain recovery, effectively minimizing rutting depth and extending the projected pavement service life from ten to fifteen years. This study successfully establishes a robust theoretical framework for the wider implementation of green infrastructure technologies within circular economy goals.

Keywords: Asphalt Rubber, Sustainable Pavement, Crumb Rubber, Marshall Stability, Fatigue Resistance.

Abstrak

Meningkatnya tuntutan terhadap infrastruktur transportasi jalan mengharuskan pengembangan bahan perkerasan yang tangguh dan berkelanjutan, yang mampu menahan beban gandar yang berat serta kondisi iklim ekstrem. Penelitian non-empiris ini menyajikan sintesis mekanistik yang komprehensif yang menunjukkan bahwa integrasi polimer elastomerik secara signifikan meningkatkan viskositas pengikat, menurunkan nilai penetrasi, dan menaikkan titik pelunakan. Pada tingkat makrostruktural, penyesuaian reologi ini mengoptimalkan parameter volumetrik dengan secara sistematis mengurangi rongga udara dan memperkuat kohesi internal, yang mengakibatkan peningkatan substansial pada nilai stabilitas Marshall. Analisis mekanistik menunjukkan bahwa campuran yang dimodifikasi karet menunjukkan ketahanan geser dan pemulihan regangan dinamis yang unggul, sehingga secara efektif meminimalkan kedalaman lekukan dan memperpanjang masa pakai perkerasan yang diproyeksikan dari sepuluh menjadi lima belas tahun. Studi ini berhasil menetapkan kerangka teori yang kokoh untuk penerapan teknologi infrastruktur ramah lingkungan yang lebih luas dalam rangka mencapai tujuan ekonomi sirkular.

Kata kunci: Karet Aspal, Perkerasan Berkelanjutan, Karet Remah, Stabilitas Marshall, Ketahanan Lelah.



©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

Infrastruktur transportasi jalan raya pada era kontemporer menghadapi tantangan ganda yang masif, yaitu lonjakan volume lalu lintas dengan beban gandar berat serta tuntutan global untuk menerapkan prinsip konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan. Perancangan perkerasan jalan yang andal memerlukan pemahaman mendalam mengenai interaksi antara beban roda kendaraan dan respons struktural material pengikat agar dapat meminimalkan kegagalan dini (Yoder dan Witczak, 1975). Dalam konteks makro, ketergantungan industri konstruksi pada material bitumen konvensional berbahan dasar minyak bumi dinilai kurang adaptif terhadap fluktuasi iklim ekstrem yang memicu fenomena alur, retak lelah, dan pelepasan butir. Dinamika ini mendorong komunitas ilmiah internasional untuk mengeksplorasi modifikasi reologi aspal melalui pemanfaatan material polimer daur ulang dan limbah industri guna meningkatkan durabilitas struktural sekaligus menekan jejak karbon sektor konstruksi.

Diskursus akademis mengenai optimalisasi campuran beraspal telah memunculkan berbagai inovasi adaptif, mulai dari rekayasa ukuran partikel filler hingga penambahan senyawa kimia polimerik.

Eksperimen terkini membuktikan bahwa mekanika campuran *Asphalt Concrete Wear Course* dapat ditingkatkan secara struktural melalui kombinasi pengisi nonkonvensional seperti material tanah putih dan abu sekam padi yang memicu reaksi pozolanik sekunder serta memperbaiki ikatan antarmuka agregat (Wuwur dkk., 2025). Selain pemanfaatan limbah agrikultur dan mineral lokal, diversifikasi bahan tambah juga merambah pada pemanfaatan senyawa kimia kompleks yang diekstraksi dari limbah medis untuk mengintervensi stabilitas termal makromolekul aspal (Putra dkk., 2023). Tren riset ini mengonfirmasi bahwa modifikasi karakteristik fisik dan kimia pengikat merupakan intervensi paling efektif dalam memperpanjang siklus hidup perkerasan jalan raya di wilayah tropis.

Meskipun terdapat spektrum aditif yang luas, fokus riset global kini bergeser secara progresif pada pemanfaatan polimer elastomik berbasis karet, baik dalam bentuk orisinal maupun material daur ulang. Integrasi lateks karet alam ke dalam aspal penetrasi 60/70 terbukti secara empiris mampu menguatkan kohesi internal campuran sehingga menghasilkan ketahanan rendaman yang unggul terhadap deformasi akibat air (Situmorang dkk., 2026). Peningkatan performa mekanis ini sejalan dengan temuan yang mengonfirmasi bahwa penambahan getah karet alam secara langsung berkontribusi pada lonjakan nilai stabilitas Marshall, memberikan kapasitas layan yang lebih kokoh pada lapisan aus kendaraan (Yanti dkk., 2024). Di sisi lain, pertimbangan ekologis memicu pemanfaatan limbah karet ban padat melalui mekanisme perendaman khusus yang mendegradasi ikatan vulkanisasi silang untuk menghasilkan sifat elastisitas tinggi pada aspal panas (Sibala dkk., 2025). Secara simultan, formulasi yang menggabungkan serbuk karet ban dengan abu tempurung kelapa sebagai filler terbukti mampu mensinergikan peningkatan viskositas aspal dan pengisian rongga udara untuk meminimalkan potensi deformasi permanen (Rashif dkk., 2025).

Terlepas dari capaian positif tersebut, tinjauan kritis terhadap literatur mutakhir menyingkap adanya inkonsistensi konseptual dan celah empiris yang signifikan terkait mekanisme interaksi molekuler pada antarmuka aspal modifikasi polimer ini. Evaluasi reologis menunjukkan bahwa interaksi fisikokimia antara matriks aspal dan partikel karet sering kali terhambat oleh masalah stabilitas penyimpanan fase yang buruk serta risiko degradasi termal akibat temperatur pencampuran yang terlalu tinggi (Zain, 2025). Fenomena pembengkakan partikel karet saat menyerap fraksi maltena aspal berpotensi memicu ketidakseimbangan komposisi kimiawi pengikat, yang dalam beberapa kasus justru menurunkan workabilitas campuran dan mempercepat penuaan dini. Mayoritas penelitian terdahulu cenderung berfokus pada optimasi parsial parameter Marshall tanpa memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana stabilitas penyimpanan dan homogenitas dispersi karet memengaruhi indikator kinerja perkerasan jalan jangka panjang di bawah beban dinamis yang berulang.

Ketidakpastian ilmiah mengenai stabilitas jangka panjang dan kompatibilitas reologis aspal karet ini menciptakan urgensi mendesak yang harus segera dijawab, mengingat kegagalan dalam menjaga homogenitas campuran akan langsung berdampak pada penurunan durabilitas jalan raya di lapangan. Tanpa adanya pemahaman yang komprehensif mengenai kontrol termal dan kinetika adsorpsi maltena oleh partikel polimer elastomik, implementasi aspal karet berskala besar akan terus terhambat oleh tingginya risiko retak fatik dini dan pemisahan fase material. Masalah ini tidak hanya mengancam investasi finansial infrastruktur publik, tetapi juga menghambat agenda nasional dalam mereduksi limbah ban bekas secara masif melalui jalur sirkular ekonomi konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan sebuah kajian sistematis yang mampu memetakan korelasi kausalitas antara metode modifikasi pengikat karet dan ketahanan mekanis struktural campuran perkerasan guna merumuskan panduan teknis yang aplikatif dan valid.

Menyikapi celah keilmuan tersebut, penelitian ini memposisikan diri sebagai kajian komprehensif yang menjembatani aspek reologi pengikat aspal karet dengan kinerja mekanis makro pada lapisan perkerasan jalan berkelanjutan. Kebaruan riset ini terletak pada pendekatan investigasi terintegrasi yang mengevaluasi perilaku viskoelastis aspal modifikasi karet alam dan daur ulang dalam menahan kerentanan air serta retak fatik secara simultan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji pengaruh variasi jenis dan kadar lapisan aspal karet terhadap performa struktural perkerasan jalan melalui serangkaian pengujian mekanistik canggih. Kontribusi teoretis yang ditawarkan adalah formulasi model kinetika interaksi aspal karet yang stabil, sedangkan kontribusinya metodologisnya terwujud dalam standarisasi prosedur pencampuran suhu optimum untuk meminimalkan efek penuaan pengikat, yang pada akhirnya menyediakan landasan ilmiah kuat demi mewujudkan infrastruktur transportasi hijau yang resilien.

METODE PENELITIAN

Penyelidikan ilmiah ini dirancang menggunakan pendekatan deskriptif analitis berbasis desain sistem non-empiris dengan metode studi literatur komprehensif guna mengevaluasi dampak reologis modifikasi pengikat terhadap keandalan struktural jalan raya. Kerangka konseptual dibangun melalui penelusuran sistematis dokumen spesifikasi teknis dan kompilasi data sekunder dari berbagai publikasi bereputasi untuk merumuskan sintesis mekanistik mengenai campuran aspal beton. Alur pemodelan diawali dengan tahap identifikasi masalah struktural perkerasan dilanjutkan dengan penapisan pustaka secara ketat berdasarkan parameter kesesuaian material pengikat konvensional penetrasi 60/70 serta aditif elastomik serbuk ban bekas. Formulasi teoretis dalam mendesain lapisan komposit ini mengintegrasikan prinsip mekanika dasar perancangan perkerasan jalan untuk memetakan distribusi tegangan dan regangan akibat beban roda kendaraan. Proses komparasi konseptual dilakukan dengan membandingkan sifat viskoelastisitas, stabilitas internal, dan ketahanan deformasi antara aspal modifikasi polimer dan bitumen murni untuk memvalidasi efisiensi material baru dalam mendukung sistem transportasi yang ramah lingkungan.

Analisis teknis dijalankan melalui metode evaluasi teoretis terhadap parameter mekanis makro dengan merujuk pada standar baku pengujian Marshall dan parameter volumetrik campuran beraspal. Metode meta-analisis diterapkan untuk menguji konsistensi data sekunder mengenai pengaruh kadar serbuk karet berkisar sepuluh hingga dua puluh persen terhadap lonjakan nilai stabilitas mekanis struktural. Validasi terhadap kekuatan konstruksi dihitung berdasarkan pendekatan teoritis perilaku elastisitas jangka panjang untuk memproyeksikan perpanjangan umur layanan jalan raya dari sepuluh tahun menjadi lima belas tahun. Metrik evaluasi kinerja difokuskan pada tiga indikator utama yaitu peningkatan ketahanan retak fatik, penurunan kedalaman alur deformasi permanen, serta tingkat efisiensi reduksi kebisingan permukaan perkerasan. Seluruh prosedur penarikan kesimpulan disinkronkan secara ketat dengan parameter teknis ketahanan rendaman untuk memastikan reliabilitas dan reproduktifitas sintesis konseptual ini sebagai acuan pengembangan standar infrastruktur hijau.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Sintesis Reologis Pengikat Bitumen Modifikasi Elastomik Karet Alam dan Limbah Polimer

Evaluasi teoritis terhadap interaksi makromolekul menunjukkan bahwa modifikasi bitumen menggunakan material polimer mengintervensi struktur koloid aspal secara signifikan demi meningkatkan ketahanan termal. Penambahan polimer elastomik berupa lateks alam maupun rekayasa kimia limbah ban bekas terbukti memicu pembengkakan partikel saat menyerap fraksi minyak ringan maltena dalam matriks bitumen (Zain, 2025). Proses adsorpsi fraksi maltena ini meningkatkan konsentrasi aspalten secara relatif sehingga menghasilkan viskositas pengikat yang lebih tinggi pada temperatur operasional jalan raya. Rekayasa struktur reologi tersebut sangat krusial dalam meminimalkan kepekaan suhu bitumen murni yang sering kali melunak akibat radiasi termal ekstrem di kawasan tropis (Anggara dan Syarma, 2025).

Kombinasi material tambah organik dan anorganik dalam kajian literatur global menunjukkan adanya efek sinergis yang secara radikal mengubah sifat viskoelastisitas pengikat komposit. Kajian sintesis membuktikan bahwa stabilitas penyimpanan fase aspal karet dapat dioptimalkan dengan penambahan material nano atau senyawa organik berantai panjang yang bertindak sebagai agen penstabil jaringan polimer (Niu dkk., 2025). Pembentukan jaringan tiga dimensi antara rantai hidrokarbon aspal dan gugus aktif polimer elastomik mencegah pemisahan fase akibat perbedaan densitas material saat penyimpanan statis temperatur tinggi. Fenomena penguatan ikatan intermolekuler ini memperluas rentang temperatur viskoelastis bitumen sehingga material menjadi lebih kenyal pada suhu rendah dan tetap kaku pada suhu operasional puncak (Shell, 2003).

Investigasi teoretis berbasis kompilasi data literatur internasional mengonfirmasi bahwa karakteristik fisik pengikat seperti nilai penetrasi mengalami penurunan sementara titik lembek meningkat seiring peningkatan kadar aditif karet. Penurunan nilai penetrasi menandakan peningkatan kekerasan matriks bitumen yang secara langsung memperkuat daya dukung struktural terhadap deformasi plastis (Federal Highway Administration, 2016). Di sisi lain kenaikan titik lembek memastikan bahwa pengikat memiliki ketahanan termal yang superior terhadap risiko pelelehan akibat akumulasi panas beban lalu lintas berulang (Dayma dan Rajput, 2025b). Keseimbangan parameter

reologi ini menjadi fondasi utama dalam merancang lapisan aus perkerasan lentur yang adaptif terhadap pola pembebanan dinamis gandar berat tanpa mengorbankan sifat kohesi internal material.

Integrasi limbah padat perkotaan maupun limbah industri ke dalam pengikat aspal memerlukan pemahaman mendalam mengenai kompatibilitas kimiawi antarmuka material agar tidak memicu kegagalan kohesif. Sebagai komparasi teoritis modifikasi bitumen menggunakan limbah non-karet seperti batu bara menunjukkan kecenderungan peningkatan kekakuan yang kaku namun rentan terhadap retak lelah dini akibat hilangnya sifat elastis pengikat (Baene dkk., 2026). Karakteristik tersebut sangat bertolak belakang dengan modifikasi polimer karet yang justru mempertahankan daktilitas tinggi melalui fleksibilitas rantai elastomernya yang panjang (Dayma dan Rajput, 2025a). Sifat elastisitas laten dari partikel karet ban inilah yang meredam konsentrasi tegangan internal pada struktur perkerasan jalan raya sehingga retak mikro akibat beban roda tidak mudah berpropagasi menjadi retak makro yang destruktif.

Tabel 1. Sintesis Karakteristik Fisik dan Reologi Pengikat Bitumen Modifikasi Elastomik Karet

Jenis Pengikat Bitumen	Kadar Aditif (%)	Nilai Penetrasi (0,1 mm)	Titik Lembek (°C)	Stabilitas Fase Penyimpanan	Sumber Data Konseptual
Bitumen Pen 60/70 Murni	0	64,5	48,5	Sangat Stabil	Shell (2003)
Aspal Karet Lateks Alam	5	52,1	54,8	Cukup Stabil	Zain (2025)
Aspal Karet Ban (<i>Crumb Rubber</i>)	10	46,3	58,2	Kurang Stabil	FHWA (2016)
Komposit Karet Organik dan Lumpur Merah	15	39,8	63,4	Sangat Stabil	Niu dkk. (2025)

Analisis mekanistik terhadap data Tabel 1 memperlihatkan korelasi linier yang jelas antara peningkatan kadar aditif karet dengan reduksi nilai penetrasi serta peningkatan titik lembek bitumen. Perubahan parameter fisik ini merepresentasikan transformasi reologi pengikat dari sifat dominan viskus menjadi lebih elastis akibat pembentukan matriks jaringan polimer silang dalam aspal (Zain, 2025). Meskipun demikian masalah stabilitas penyimpanan fase pada aspal karet konvensional tanpa agen penstabil organik menjadi batasan teknis yang perlu diintervensi melalui kontrol termal yang ketat selama proses produksi (Federal Highway Administration, 2016). Rekayasa pengikat komposit dengan senyawa rantai panjang terbukti menjadi solusi konseptual terancang untuk menjaga homogenitas campuran komposit dalam jangka panjang.

Karakteristik reologi pengikat yang superior secara langsung memengaruhi kemudahan pelaksanaan pemadatan serta penentuan suhu pencampuran optimum di fasilitas pencampur aspal panas. Peningkatan viskositas pada aspal karet menuntut peningkatan suhu pencampuran teoretis demi menjamin agregat terselimuti secara merata oleh lapisan film bitumen yang homogen (Roberts dkk., 2009). Ketebalan film aspal yang ideal di sekeliling butiran agregat sangat vital untuk mencegah penuaan dini akibat oksidasi termal serta volatilisasi fraksi ringan bitumen selama masa layanan perkerasan. Oleh karena itu pemodelan viskositas terhadap suhu menjadi indikator fundamental dalam mengevaluasi workabilitas mekanis campuran sebelum dihampar di lapangan.

Penelitian non-empiris ini menggarisbawahi bahwa pemanfaatan aditif karet berkontribusi besar pada reduksi penggunaan bitumen murni yang bersumber dari sumber daya alam tidak terbarukan. Melalui substitusi parsial menggunakan material limbah ban ataupun pemanfaatan lateks lokal ketahanan mekanis perkerasan dapat ditingkatkan sekaligus menghemat energi ekstraksi minyak bumi

(Khan dan Tabassum, 2025). Keunggulan ekologis tersebut menempatkan teknologi aspal karet sebagai pilar utama dalam perancangan infrastruktur transportasi hijau berkelanjutan. Pendekatan teoritis ini sekaligus membuktikan bahwa reduksi jejak karbon dapat dicapai secara simultan dengan peningkatan kualitas teknis perkerasan jalan tol.

Koreksi reologis melalui penambahan karet juga memengaruhi kapasitas adsorpsi energi mekanis saat menerima beban kejut dari roda kendaraan bermotor di jalan raya. Sifat viskoelastis aspal modifikasi elastomer mengizinkan material mengalami deformasi pulih (*recoverable strain*) yang tinggi ketika menerima tegangan geser (Huang, 2004). Kapasitas pemulihan elastis yang superior ini meminimalkan akumulasi regangan permanen yang menjadi pemicu utama kegagalan alur pada jejak roda kendaraan. Fleksibilitas makromolekul polimer dengan demikian bertindak sebagai peredam tegangan internal yang mendistribusikan beban gandar secara lebih merata ke lapisan di bawahnya.

Pemahaman mendalam mengenai interaksi antarmuka kimiawi antara bitumen modifikasi dan jenis agregat kasar maupun halus juga menentukan keberhasilan aplikasi teknologi ini. Ikatan adhesi antara aspal karet yang kaya akan gugus fungsional polar dan permukaan agregat silika atau karbonat terbukti lebih kuat dibandingkan bitumen konvensional (Khasawneh dkk., 2024). Kekuatan ikatan adhesif ini menurunkan sensitivitas campuran terhadap fenomena pengelupasan akibat penetrasi air pada rongga udara perkerasan. Dengan demikian integrasi data reologi pengikat memberikan justifikasi teoretis yang kuat mengenai peningkatan durabilitas struktural beton aspal campuran panas secara menyeluruh.

Secara konseptual perbaikan sifat fundamental pengikat aspal modifikasi karet ini menjadi prasyarat utama sebelum melakukan analisis parameter mekanis makro Marshall pada campuran beton aspal lapis aus. Keselarasan antara peningkatan viskositas pengikat dan kekuatan ikatan adhesi agregat memformulasi struktur komposit yang padat dan kedap air (Sukirman, 2016). Melalui intervensi reologi yang presisi kelemahan bawaan dari bitumen penetrasi standar dapat dieliminasi secara tuntas demi memenuhi tuntutan umur rencana perkerasan yang lebih panjang. Pembahasan bab ini menegaskan bahwa rekayasa level mikro pada pengikat merupakan kunci utama keberhasilan performa struktural lapisan perkerasan jalan raya di masa depan.

Analisis Karakteristik Volumetrik dan Nilai Stabilitas Mekanis Marshall Campuran Komposit Beraspal

Kompilasi ilmiah mengenai mekanika campuran beraspal panas menunjukkan bahwa integrasi polimer elastomik mengubah parameter volumetrik serta respon kekuatan struktur lapis aus secara masif. Penambahan partikel serbuk karet ke dalam matriks aspal penetrasi 60/70 berdampak langsung pada peningkatan viskositas yang mempertebal selimut aspal di sekeliling agregat (Artha dkk., 2026). Penebalan film bitumen ini mereduksi volume rongga dalam campuran secara terkontrol sehingga menciptakan struktur makro yang lebih rapat serta kedap air. Modifikasi struktural tersebut sangat efektif guna mencegah intervensi cairan yang kerap memicu pelapukan ikatan adhesi pada perkerasan jalan tropis (Situmorang dkk., 2026).

Transformasi parameter volumetrik akibat penggunaan karet alam maupun daur ulang ban bekas terbukti memberikan efek pengisian rongga agregat yang optimal. Kehadiran partikel elastomik yang terdispersi homogen berfungsi sebagai penyumbat rongga mikro bersama dengan material pengisi konvensional (Artha dkk., 2026). Peningkatan densitas campuran beraspal panas ini meminimalkan nilai rongga di antara agregat tanpa memicu fenomena pelelehan aspal ke permukaan akibat suhu ekstrem (Sukirman, 2016). Keseimbangan proporsi volume udara dan binder ini menjadi parameter krusial dalam mempertahankan kinerja mekanis perkerasan dari risiko deformasi plastis dini.

Evaluasi konseptual terhadap komposit beraspal menunjukkan bahwa perbaikan volumetrik ini berkorelasi linear dengan peningkatan kapasitas dukung mekanis luar dari struktur lapis perkerasan. Peningkatan nilai stabilitas Marshall menjadi indikator utama yang merepresentasikan ketahanan material komposit terhadap akumulasi beban gandar lalu lintas berat (Yanti dkk., 2024). Fleksibilitas laten dari rantai polimer aditif karet memberikan kemampuan penyerapan energi mekanis yang lebih tinggi saat menerima tegangan geser (Zain, 2025). Akibatnya campuran memiliki kapasitas layan superior dibandingkan dengan konstruksi jalan konvensional yang cenderung kaku dan mudah retak.

Modifikasi struktural campuran beton aspal juga dapat dikombinasikan dengan pemanfaatan limbah lokal nonkaret demi mencapai efisiensi volumetrik yang berkelanjutan. Sebagai komparasi pemanfaatan limbah abu kayu dan *expanded polystyrene* menunjukkan pola pengisian rongga yang baik

namun memiliki keterbatasan pada stabilitas suhu tinggi (Ningtyias dkk., 2025). Hal ini berbeda dengan perilaku mekanis aspal karet lateks alam yang dikombinasikan dengan abu sekam padi sebagai filler pengisi (Pujito dkk., 2026). Sinergi material tersebut menghasilkan nilai kelelahan plastik yang ideal sehingga perkerasan mampu mendistribusikan beban roda kendaraan secara elastis tanpa mengalami keruntuhan struktural.

Tabel 2. Kompilasi Karakteristik Volumetrik dan Parameter Mekanis Marshall Campuran Aspal Lapis Aus

Komposisi Campuran Komposit	Kadar Karet (%)	Rongga Udara (VIM) (%)	Rongga Terisi Aspal (VFB) (%)	Stabilitas Marshall (kg)	Kelelahan Marshall (mm)	Sumber Data Konseptual
AC WC Aspal Pen 60/70 Murni	0	4,20	76,50	1050	3,10	Sukirman (2016)
AC WC Aspal Karet Lateks	5	3,85	79,20	1280	3,45	Artha dkk. (2026)
AC WC Aspal Crumb Rubber	10	3,60	81,40	1340	3,60	Rashif dkk. (2025)
AC WC Aspal Karet dan Sekam	7	3,72	80,10	1310	3,50	Pujito dkk. (2026)

Analisis mekanistik terhadap data sekunder pada Tabel 2 memperlihatkan secara jelas bahwa penambahan polimer karet menurunkan nilai rongga udara sekaligus mendongkrak stabilitas Marshall campuran secara signifikan. Penurunan rongga udara mengindikasikan bahwa partikel karet terkompresi dengan baik untuk mengisi ruang kosong di antara agregat kasar dan halus (Rashif dkk., 2025). Peningkatan nilai stabilitas hingga melampaui seribu tiga ratus kilogram memberikan justifikasi ilmiah bahwa lapisan aus modifikasi elastomik ini sangat andal untuk memikul beban lalu lintas berat (Artha dkk., 2026). Karakteristik volumetrik yang stabil ini menjamin retensi kekuatan mekanis perkerasan tetap terjaga optimal selama masa pelayanan jalan rencana.

Keseimbangan antara nilai stabilitas dan kelelahan plastik Marshall mencerminkan tingkat kekakuan serta kelenturan relatif dari struktur perkerasan jalan tol. Nilai kelelahan yang berada pada rentang ideal mengonfirmasi bahwa campuran aspal karet tidak bersifat rapuh saat menerima beban kejut roda kendaraan (Yanti dkk., 2024). Sifat daktilitas tinggi dari binder modifikasi polimer elastomerik menjaga integritas struktural campuran tetap kohesif di bawah cekaman suhu ekstrem (Zain, 2025). Karakteristik komposit ini meminimalkan potensi pelepasan butir agregat akibat gaya gesek ban mobil yang melintas berulang kali.

Sintesis teoritis ini juga membuktikan bahwa optimalisasi parameter volumetrik aspal karet sejalan dengan pemenuhan spesifikasi teknis infrastruktur jalan modern. Penataan gradasi agregat yang tepat dikombinasikan dengan pengikat elastomik menghasilkan parameter kekuatan sisa yang tinggi setelah proses perendaman air (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Durabilitas struktural campuran beton aspal campuran panas ini sangat ditentukan oleh kemampuan film binder dalam mempertahankan kohesi internal (Roberts dkk., 2009). Oleh sebab itu analisis volumetrik menjadi prasyarat fundamental dalam mengevaluasi kelayakan material sebelum diimplementasikan pada skala industri konstruksi.

Intervensi aditif elastomerik ke dalam campuran beraspal juga terbukti memberikan kontribusi positif pada peningkatan fleksibilitas makro komponen struktural perkerasan. Sifat lentur laten dari serbuk ban bekas memicu terbentuknya jembatan elastis antarbutir agregat yang menahan konsentrasi tegangan tarik (Rashif dkk., 2025). Kemampuan ini mencegah timbulnya retak mikro pada bagian

bawah lapisan aus yang biasanya dipicu oleh kelelahan struktural akibat repetisi pembebanan (Huang, 2004). Fleksibilitas struktural inilah yang menjadi keunggulan utama material inovatif ini dalam memperpanjang siklus hidup infrastruktur transportasi darat.

Pemanfaatan material alternatif sebagai bahan pengisi pendukung juga memperluas fleksibilitas perancangan volumetrik campuran beraspal tropis. Karakteristik mekanis beton aspal lapis aus dapat ditingkatkan dengan memadukan serbuk karet dan pengisi abu tempurung kelapa yang memiliki afinitas kimiawi tinggi terhadap bitumen (Rashif dkk., 2025). Penambahan material pengisi nonkonvensional tersebut membantu mengikat kelebihan fraksi bebas aspal sehingga menurunkan risiko keruntuhan plastis saat musim kemarau. Skenario pemodelan ini memperkuat argumen teoretis mengenai keandalan mekanistik komposit aspal karet dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Secara menyeluruh analisis parameter volumetrik dan karakteristik mekanis Marshall mengonfirmasi bahwa teknologi aspal karet menawarkan performa struktural superior yang melampaui aspal konvensional. Penurunan rongga udara yang dibarengi lonjakan stabilitas mekanis memformulasi lapisan aus yang padat, lentur, serta berdaya tahan tinggi (Sukirman, 2016). Sintesis data teoretis ini memberikan landasan ilmiah kuat bagi para perancang infrastruktur untuk beralih ke material jalan hijau yang berkelanjutan. Kinerja makro yang andal ini menjadi jembatan menuju evaluasi fungsional jangka panjang terkait ketahanan alur dan efisiensi layanan jalan raya.

Analisis Komparatif Mekanistik Kedalaman Alur Deformasi Permanen dan Durabilitas Jangka Panjang Struktur Perkerasan Berkelanjutan

Evaluasi teoritis terhadap aspek mekanistik perkerasan lentur mengonfirmasi bahwa integrasi polimer elastomik mampu mereduksi akumulasi regangan plastis akibat siklus beban lalu lintas dinamis secara signifikan. Modifikasi reologi pengikat aspal melalui penambahan serbuk ban bekas memicu peningkatan kekakuan geser material yang membatasi pergerakan relatif antarbutir agregat pada temperatur tinggi (Zain, 2025). Distribusi tegangan vertikal di dalam struktur perkerasan berlapis menjadi lebih merata sehingga menurunkan risiko konsentrasi beban yang memicu alur pada jejak roda kendaraan (Huang, 2004). Fleksibilitas laten dari makromolekul polimer karet ban dengan demikian memformulasi suatu sistem pelindung struktural yang secara konseptual memperlambat laju penuaan mekanis lapisan aus (Federal Highway Administration, 2016).

Korelasi analitis menunjukkan bahwa penambahan material elastomik juga meningkatkan ketahanan lelah perkerasan secara substansial melalui penyerapan energi regangan tarik yang superior. Di bawah beban roda yang repetitif, struktur beraspal konvensional cenderung mengalami perambatan retak mikro dari dasar lapisan menuju permukaan akibat melampaui batas deformasi elastis (Yoder dan Witczak, 1975). Kehadiran partikel karet yang terdispersi secara homogen bertindak sebagai jembatan elastis yang menahan regangan tarik internal tersebut sehingga struktur komposit tetap kohesif (Khasawneh dkk., 2024). Mekanisme pertahanan mikro ini memproyeksikan peningkatan sisa umur pelayanan jalan raya yang signifikan di bawah skenario pembebanan kendaraan berat (Natsir dkk., 2025).

Kapasitas layanan fungsional perkerasan komposit ini juga sangat dipengaruhi oleh tingkat kekesatan permukaan dan kemampuannya dalam meminimalkan kebisingan kontak ban. Sintesis literatur membuktikan bahwa tekstur permukaan yang terbentuk dari campuran aspal modifikasi karet memiliki koefisien gesek yang stabil untuk menjamin keselamatan berkendara (Lamtiar dan Utama, 2023). Elastisitas makro dari partikel karet ban di permukaan menyerap sebagian energi akustik dari interaksi roda kendaraan sehingga berkontribusi pada reduksi polusi suara (Federal Highway Administration, 2016). Integrasi performa struktural dan fungsional ini memperkuat justifikasi teoretis pemanfaatan aspal karet sebagai material utama pembangunan jalan tol modern (Anggara dan Syarma, 2025).

Diversifikasi material alternatif dalam pemodelan durabilitas jalan juga mencakup evaluasi stabilitas lapisan pondasi pendukung di bawah struktur beraspal. Sebagai perbandingan, perkuatan struktural pada lapis pondasi daur ulang menggunakan emulsi semen menunjukkan peningkatan modulus kekakuan yang tinggi namun rentan terhadap retak reflektif (Hariyadi dan Mahardika, 2026). Fenomena ini berbeda dengan fleksibilitas struktur lapis aus komposit aspal karet yang mampu meredam deformasi dari lapisan bawah tanah dasar yang distabilisasi (Dewi dkk., 2025). Sinergi karakteristik mekanistik antar-lapisan ini memastikan bahwa perkerasan jalan raya memiliki resiliensi tinggi terhadap penurunan daya dukung tanah dasar akibat fluktuasi air tanah.

Tabel 3. Sintesis Mekanistik Kedalaman Alur, Ketahanan Lelah, dan Prediksi Siklus Hidup Pelayanan Jalan

Karakteristik Struktural Perkerasan	Modulus Resilien (MPa)	Kedalaman Alur (Rutting) (mm)	Ketahanan Lelah (Siklus)	Prediksi Umur Layan (Tahun)	Sumber Referensi
Campuran Aspal Pen 60/70 Standar	2800	6,50	$1,2 \times 10^5$	10	Hardiyatmo (2015)
Komposit Aspal Modifikasi Lateks	3400	4,20	$2,8 \times 10^5$	12	Kodri dkk. (2025)
Komposit Aspal Modifikasi Crumb Rubber	3900	3,10	$4,5 \times 10^5$	15	Khan dan Tabassum (2025)
Komposit Aspal Modifikasi Nano Silika dan Karet	4200	2,80	$5,1 \times 10^5$	16	Alizadeh dkk. (2023)

Analisis mekanistik terhadap kompilasi data pada Tabel 3 memperlihatkan secara eksplisit bahwa peningkatan modulus resilien pada aspal karet berdampak langsung pada reduksi kedalaman alur deformasi permanen. Modulus yang lebih tinggi mengindikasikan kemampuan elastis struktural yang superior dalam menahan regangan permanen akibat akumulasi beban statis maupun dinamis (Hardiyatmo, 2015). Lonjakan siklus ketahanan lelah hingga melampaui empat kali lipat dari kondisi konvensional membuktikan bahwa material komposit polimer memiliki ketahanan fatik jangka panjang yang luar biasa (Khan dan Tabassum, 2025). Peningkatan ini memberikan justifikasi ilmiah kuat terhadap perpanjangan umur layanan teoritis perkerasan jalan berkelanjutan hingga mencapai lima belas tahun (Alizadeh dkk., 2023).

Optimalisasi durabilitas jangka panjang struktur perkerasan juga memerlukan kajian mendalam mengenai kerentanan material komposit terhadap fenomena penuaan oksidatif. Penggunaan aspal modifikasi elastomerik yang dikombinasikan dengan partikel nano terbukti efektif menghambat laju difusi oksigen ke dalam pengikat bitumen (Alizadeh dkk., 2023). Hambatan oksidasi ini mencegah material menjadi rapuh dan retak akibat radiasi sinar ultraviolet matahari yang intensif pada koridor jalan tol tropis (Anggara dan Syarma, 2025). Stabilitas kimiawi jangka panjang tersebut memastikan bahwa modulus kekakuan elastis perkerasan tidak mengalami degradasi drastis selama masa layanan rencana.

Sintesis teoritis ini sekaligus mengonfirmasi bahwa pemanfaatan aspal karet memenuhi persyaratan teknis spesifikasi umum untuk lapisan beraspal berkinerja tinggi. Peningkatan ketahanan fatik dan ketahanan alur berjalan seiring dengan tingginya nilai stabilitas sisa campuran setelah mengalami perendaman jangka panjang (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Selimut aspal modifikasi polimer yang tebal dan lengket membungkus agregat secara kokoh sehingga ikatan adhesif terhindar dari kerusakan hidrolis (Kodri dkk., 2025). Efek perlindungan ganda ini meminimalkan biaya pemeliharaan berkala yang biasanya dialokasikan untuk perbaikan lubang dan pelepasan butir.

Keberlanjutan ekologis dari teknologi perkerasan ini juga diperkuat melalui pemanfaatan limbah padat perkotaan sebagai substitusi parsial agregat halus. Formulasi komposit hijau yang memadukan bubuk karet ban dengan substitusi agregat halus terbukti mampu menurunkan dampak negatif penambangan material alam secara masif (Alizadeh dkk., 2023). Pendekatan daur ulang material sirkular ini memberikan performa mekanis yang setara dengan campuran agregat standar murni (Roberts dkk., 2009). Efisiensi lingkungan ini menjadi poin krusial dalam mendukung komitmen global untuk mereduksi jejak karbon sektor konstruksi sipil.

Eksplorasi konseptual juga membandingkan pemanfaatan limbah biomassa nonkaret dalam matriks campuran perkerasan beton untuk elemen pelengkap jalan. Sebagai studi komparatif, pemanfaatan limbah serbuk kayu untuk campuran paving block terbukti memberikan kekuatan tekan memadai untuk beban lalu lintas ringan (Fadhilah dan Sanjaya, 2025). Namun, untuk struktur utama perkerasan jalan tol berkecepatan tinggi, kestabilan mekanis aspal karet komposit tetap tidak tergantikan oleh limbah organik berserat pendek (Khan dan Tabassum, 2025). Karakteristik elastomik dari limbah ban karet hancuran memberikan retensi kekuatan geser yang mutlak dibutuhkan oleh struktur perkerasan lentur modern.

Secara komprehensif, analisis mekanistik komparatif ini memberikan kesimpulan teoretis yang kuat bahwa penggunaan lapisan aspal karet menjamin keberlanjutan siklus hidup perkerasan jalan raya. Kombinasi reduksi kedalaman alur dan lonjakan ketahanan lelah memformulasi struktur jalan yang minim pemeliharaan dan ramah lingkungan (Hardiyatmo, 2015). Integrasi data pustaka internasional bereputasi ini berhasil membuktikan bahwa rekayasa pengikat berbasis limbah karet bukan sekadar solusi ekologis, melainkan sebuah lompatan teknologi menuju infrastruktur transportasi masa depan yang tangguh dan berkelanjutan (Alizadeh dkk., 2023). Penilaian analitis ini sekaligus menyempurnakan pembuktian ilmiah mengenai pengaruh positif lapisan aspal karet secara holistik.

KESIMPULAN

Sintesis analitis secara komprehensif membuktikan bahwa modifikasi reologi bitumen menggunakan polimer elastomik lateks alam maupun serbuk karet daur ulang ban bekas secara radikal mentransformasi karakteristik fisik matriks pengikat dengan menurunkan nilai penetrasi dan mendongkrak titik lembek. Perubahan pada level mikro tersebut mentranslasikan perbaikan signifikan pada parameter volumetrik campuran beraspal panas yang dicirikan oleh penurunan rongga udara secara terkontrol serta lonjakan stabilitas mekanis Marshall hingga melampaui ambang batas spesifikasi teknis standar. Implikasi makro dari penyempurnaan karakteristik volumetrik dan reologis ini mewujudkan pada peningkatan kapasitas struktural perkerasan dalam meredam konsentrasi tegangan tarik, meminimalkan kedalaman alur deformasi permanen, serta mendongkrak siklus ketahanan lelah. Integrasi performa mekanistik yang unggul ini memberikan justifikasi ilmiah kuat bahwa teknologi aspal karet mampu memperpanjang prediksi umur layanan jalan raya secara signifikan sekaligus menyediakan solusi infrastruktur transportasi hijau yang tangguh, bernilai ekonomi tinggi, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alizadeh, S., Shafabakhsh, G., & Sadeghnejad, M. (2023). Sustainable asphalt mixtures: enhancing environmental impact by partial fine aggregate substitution with rubber powder and bitumen modification using Nano-SiO₂. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2), 2257851. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2257851>
- Anggara, M. A. R., & Syarma, D. P. (2025). Studi Perilaku Material Aspal Modifikasi Untuk Konstruksi Jalan Tol Di Daerah Tropis. *Jurnal Studi Dan Aplikasi Teknik Sipil (JSATS)*, 1(1), 1-6. <https://doi.org/10.64123/jsats.v1.i1.1>
- Artha, F. D., Akbar, G. A., & Diana, N. A. (2026). Analisis Karakteristik Marshall pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) dengan Aspal Pen 60/70 Campur Serbuk Ban Karet. *Anggapa Journal-Building design and architecture management studies*, 5(1), 8-18. <https://doi.org/10.61293/anggapa.v5i1.943>
- Baene, H. K. P., Hani, S., & Lubis, M. Y. P. (2026). Pengaruh Penambahan Batu Bara Terhadap Aspal Minyak Untuk Perkerasan Jalan AC-BC. *Indonesian Journal of Innovation Multidisipliner Research*, 4(2), 1676-1685. <https://doi.org/10.69693/ijim.v4i2.644>
- Dayma, R. K., & Rajput, A. (2025). Performance Evaluation of Waste Plastic and Rubber Modified Bitumen in Flexible Pavements. *Journal of Integrated Engineering Sciences*, 1(3), 8-19. <https://doi.org/10.63686/jies.v1i3014>
- Dayma, R. K., & Rajput, A. (2025). Waste Plastic and Rubber Modified Bitumen in Flexible Pavements: A Comprehensive Performance Review. *Journal of Integrated Engineering Sciences*, 1(2), 51-56. <https://doi.org/10.63686/jies.v1i2012>
- Dewi, A. P. S., Akbar, S. A., Harianto, Y., & Gofar, N. (2025). Pengaruh Campuran Abu Terbang dan Kapur terhadap Daya Dukung Tanah Dasar. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 62-71. <https://doi.org/10.23917/dts.vi.9855>

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi umum Bina Marga 2018*.
- Fadhilah, A., & Sanjaya, A. (2025). Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu untuk Bahan Campuran Paving Block di Pabrik Briket PT. Bukit Asam, Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 2(3), 149-156. <https://doi.org/10.62278/jits.v2i3.58>
- Federal Highway Administration. (2016). *Asphalt rubber usage guide*.
- Fitra, A., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2025). Penggunaan Asbuton Berbutir sebagai Bahan Substitusi Parsial Agregat Halus pada Campuran Aspal Beton Lapis Antara (AC-BC). *Jurnal Flyover*, 5(1), 35-46. <https://doi.org/10.52103/jfo.v5i1.2161>
- Hardiyatmo, H. C. (2015). *Perancangan perkerasan jalan*. Gadjah Mada University Press.
- Hariyadi, E. S., & Mahardika, M. Pengaruh Penambahan Aspal Emulsi pada Lapis Pondasi Hasil Daur Ulang dengan Semen (CTRB) terhadap Kinerja Struktural Perkerasan Lentur. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 31(2), 160-171. <https://doi.org/10.14710/mkts.v31i2.73022>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson.
- Khan, A. A. R., & Tabassum, N. (2025). Enhancing pavement performance and economy through crumb rubber modified bitumen: a sustainable engineering approach. *Smart and Green Materials*, 2(1), 47-61. <https://doi.org/10.70028/sgm.v2i1.39>
- Khasawneh, M. A., Dernayka, S. D., & Chowdhury, S. R. (2024). Physical properties of crumb rubber modified asphalt binders and environmental impact consideration. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(26), 7678-7692. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2248969>
- Kodri, I., Trisnawati, I., & Agustria, Y. (2025). Karakteristik Marshall Dengan Penambahan Lateks Dari Berat Filler Dalam Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC). *Jurnal Deformasi*, 10(2), 183-193. <https://doi.org/10.31851/deformasi.v10i2.20355>
- Lamtiar, S., & Utama, R. W. J. (2023). Evaluasi Kekesatan Runway 06/24 menggunakan Alat Skiddometer di Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta. *Airman: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, 6(2), 131-142. <https://doi.org/10.46509/ajtk.v6i2.410>
- Mashuri. (2017). *Teknik jalan raya*. Erlangga.
- Natsir, K., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2025). Pengaruh Penggunaan Minyak Pelumas Bekas Terhadap Lapisan Aspal Beton dan Prediksi Sisa Umur Perkerasan Jalan Menggunakan Metode Mekanistik Empirik Program Kenpave. *Jurnal Flyover*, 5(1), 23-34. <https://doi.org/10.52103/jfo.v5i1.2160>
- Ningtyias, P. S., Fatimah, S., & Mudiyo, R. (2025). Analisis Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) Modifikasi Dengan Penambahan Wood Ash Dan Styrofoam Expanded Polystyrene (EPS) Untuk Perkerasan Jalan. *Journal of Engineering and Applied Technology*, 1(2), 410-422. <https://doi.org/10.65310/a7qp5y50>
- Niu, X., Liu, S., Han, X., Zhang, Z., Yang, J., Liang, Y., ... & Wang, Y. (2025). Investigation of Properties of Long-Chain Organic Modified Red Mud and Waste Rubber Powder Composite Recycled Asphalt: Toward to Sustainable Pavement Materials. *Langmuir*, 41(45), 30528-30540. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c04259>
- Pujito, P., Azhim, Z. S., & Satrio, E. M. (2026). Analisis Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan Penambahan Lateks dan Abu Sekam Padi pada Perkerasan Jalan. *Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(1), 79-95. <https://doi.org/10.65310/eamtj865>
- Putra, I. G. A. A., Thanaya, I. N. A., Ariawan, I. M. A., & Ciawi, Y. (2023). Unsur Senyawa Kimia dari Limbah Masker Medis untuk Meningkatkan Kinerja Campuran Aspal. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v19i1.38940>
- Rashif, M. F., Nisumanti, S., & Al Qubro, K. (2025). Analisis Pengaruh Penambahan Crumb Rubber dan Filler Abu Tempurung Kelapa Terhadap Nilai Karakteristik Marshall pada Campuran Aspal Lapis Aus (AC-WC). *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 11(3), 281. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v11i3.281>
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (2009). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. National Center for Asphalt Technology.
- Shell. (2003). *The Shell bitumen handbook*.
- Sibala, T. R., Nurdin, A. R., & Mallawangeng, T. (2025). Pemanfaatan Limbah Karet Tambal Ban (Kompon) Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Aspal Panas Menggunakan Metode Durasi

- Perendaman. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 3(3), 271-279.
<https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i3.3198>
- Situmorang, J., Azizah, N., & Oktafia, E. (2026). Pengaruh Penambahan Lateks Karet Alam terhadap Ketahanan Rendaman Campuran AC-WC Menggunakan Aspal Pen 60/70. *Momentum Jurnal Inovasi dan Rekayasa Teknik Sipil (MJIRTS)*, 2(2), 68-76.
<https://doi.org/10.64123/mjirts.v2.i2.4>
- Sukirman, S. (2016). *Beton aspal campuran panas*. Nova.
- Wuwur, D. A. I., Pantas, V. B., Sodanango, M. R., & Mbau, R. B. (2025). Kajian Kinerja Kombinasi Filler Tanah Putih dan Abu Sekam Padi pada Campuran Aspal AC-WC. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, 8(1), 33-47. <https://doi.org/10.30737/jurmateks.v8i1.6304>
- Yanti, A. T., Masthura, L., & Basrin, D. (2024). Pengaruh Penambahan Getah Karet Terhadap Stabilitas Nilai Marshall pada Campuran Aspal (AC-WC). *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 71-78.
<https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.24459>
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.
- Zain, W. (2025). Interaksi aspal-karet dan evaluasi kinerja pengikat aspal karet. *Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 13-20. <https://doi.org/10.53712/rjrs.v10i2.2847>