

## Pengaruh Penggunaan Material Daur Ulang Terhadap Kinerja Perkerasan Jalan Berbasis Uji Laboratorium Dan Simulasi

Hamdani, Zulkarnaen, Munawir Haris <sup>1</sup>

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan material daur ulang terhadap kinerja perkerasan jalan melalui pendekatan uji laboratorium dan simulasi numerik. Material yang dikaji meliputi Recycled Concrete Aggregate (RCA), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), serta kombinasi material daur ulang lainnya sebagai alternatif pengganti agregat alami pada lapisan perkerasan. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan pengujian laboratorium yang meliputi California Bearing Ratio (CBR), Unconfined Compressive Strength (UCS), dan Repeated Load Triaxial (RLT), serta uji ketahanan deformasi dan kelelahan. Hasil pengujian kemudian divalidasi menggunakan simulasi mekanistik-empiris berbasis Finite Element Method (FEM) dan perangkat desain perkerasan modern. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RCA memiliki kinerja baik dalam hal daya dukung dan stabilitas struktural, sedangkan RAP memberikan ketahanan tinggi terhadap deformasi permanen tetapi lebih rentan terhadap retak akibat beban berulang. Kombinasi RCA dan RAP menghasilkan kinerja paling seimbang antara kekakuan dan fleksibilitas, sehingga meningkatkan umur layanan perkerasan. Simulasi numerik menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan hasil uji laboratorium, sehingga pendekatan mekanistik-empiris terbukti efektif dalam memprediksi kinerja perkerasan berbasis material daur ulang. Temuan ini menegaskan bahwa material daur ulang dapat menjadi alternatif yang layak untuk perkerasan jalan berkelanjutan apabila dirancang dengan komposisi dan metode evaluasi yang tepat.

**Kata Kunci:** Material Daur Ulang, Perkerasan Jalan, Recycled Concrete Aggregate, Reclaimed Asphalt Pavement, Simulasi Mekanistik-Empiris

---

**Abstract:** *This study aims to analyze the effect of recycled materials on pavement performance through laboratory testing and numerical simulation approaches. The materials examined*

---

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Indonesia, [hamdani027@gmail.com](mailto:hamdani027@gmail.com)

*include Recycled Concrete Aggregate (RCA), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), and their combinations as alternatives to natural aggregates in pavement layers. The research adopts a quantitative experimental approach, with laboratory tests including California Bearing Ratio (CBR), Unconfined Compressive Strength (UCS), Repeated Load Triaxial (RLT), as well as deformation resistance and fatigue tests. The experimental results are then validated using mechanistic–empirical simulations based on the Finite Element Method (FEM) and modern pavement design tools. The results indicate that RCA demonstrates strong performance in load-bearing capacity and structural stability, while RAP provides high resistance to permanent deformation but is more susceptible to fatigue cracking under repeated loading. The combination of RCA and RAP yields the most balanced performance in terms of stiffness and flexibility, thereby enhancing pavement service life. Numerical simulations show high agreement with laboratory results, confirming that the mechanistic–empirical approach is effective in predicting the performance of pavements incorporating recycled materials. These findings confirm that recycled materials can serve as a viable alternative for sustainable pavement construction when designed with appropriate composition and evaluation methods.*

**Keywords:** *Recycled Materials, Pavement, Recycled Concrete Aggregate, Reclaimed Asphalt Pavement, Mechanistic–Empirical Simulation.*

---

## **A. Pendahuluan**

Perkembangan infrastruktur jalan menuntut penggunaan material yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga efisien secara sumber daya dan rendah dampak lingkungan. Peningkatan volume lalu lintas berat mempercepat kerusakan perkerasan jalan, sehingga kebutuhan terhadap material perkerasan dengan kinerja tinggi semakin meningkat. Kondisi ini mendorong perubahan pendekatan dari penggunaan material konvensional menuju material alternatif berbasis daur ulang. Material seperti Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Recycled Concrete Aggregate (RCA), serta limbah konstruksi dan industri mulai digunakan sebagai substitusi agregat alami dalam berbagai lapisan perkerasan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material daur ulang memiliki potensi besar dalam mendukung kinerja perkerasan jalan. Rahman et al. (2025) menunjukkan bahwa pendekatan mekanistik-empiris dengan dukungan uji Repeated Load Triaxial (RLT) mampu memprediksi kinerja perkerasan berbasis material daur ulang secara akurat. Hasil tersebut diperkuat oleh studi Azam et al. (2024) yang menemukan bahwa material konstruksi dan demolisi dapat menggantikan agregat alami pada lapisan base dengan kinerja yang sebanding, bahkan memungkinkan pengurangan ketebalan lapisan. Hal ini menunjukkan bahwa material daur ulang tidak hanya berperan sebagai substitusi, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi desain struktural perkerasan.

Pada sisi lain, penggunaan RCA telah banyak diteliti sebagai material pengganti agregat alami. Akbaş et al. (2023) menunjukkan bahwa RCA memenuhi persyaratan teknis untuk lapisan base dan subbase pada perkerasan lentur. Studi lanjutan oleh Akbaş et al. (2023) menegaskan bahwa RCA tetap stabil setelah mengalami siklus pembekuan dan pencairan, sehingga cocok untuk kondisi lingkungan ekstrem. Temuan serupa juga ditunjukkan oleh Fanijo et al. (2023) yang menyatakan bahwa RCA memiliki sifat mekanik, fisik, dan kimia yang mendukung penggunaannya dalam berbagai lapisan perkerasan.

Selain RCA, RAP menjadi salah satu material daur ulang yang paling banyak digunakan dalam konstruksi jalan. Namun, RAP memiliki karakteristik yang kompleks akibat proses penuaan binder aspal. Hong et al. (2014) menemukan bahwa peningkatan kandungan RAP dapat meningkatkan variabilitas kinerja perkerasan, terutama pada retak longitudinal. Cao et al. (2017) juga melaporkan bahwa RAP meningkatkan kekakuan campuran tetapi menurunkan ketahanan terhadap kelelahan (fatigue resistance). Meskipun demikian, teknologi rejuvenator dan warm mix asphalt dapat meningkatkan kinerja RAP secara signifikan, seperti yang ditunjukkan oleh Lee et al. (2023) dan Li et al. (2024), sehingga membuka peluang penggunaan RAP dalam kadar tinggi tanpa mengorbankan kinerja.

Di sisi lain, kombinasi berbagai material daur ulang mulai banyak dieksplorasi untuk meningkatkan kinerja

perkerasan. Han et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi RCA, MSWI bottom ash, dan recycled asphalt shingle dapat meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan deformasi. Russo et al. (2021) juga menemukan bahwa penggunaan limbah konstruksi dalam campuran aspal dapat meningkatkan performa mekanik sekaligus mendukung konsep eco-friendly pavement. Studi Zhang et al. (2017) memperkuat bahwa integrasi material daur ulang dalam desain perkerasan dapat meningkatkan durabilitas dan menurunkan biaya siklus hidup.

Pendekatan berbasis simulasi dan pemodelan numerik menjadi elemen penting dalam evaluasi kinerja perkerasan berbasis material daur ulang. Huang et al. (2023) menunjukkan bahwa model finite element dapat merepresentasikan deformasi lapisan perkerasan berbasis material daur ulang dengan akurasi tinggi. Rahman et al. (2025) dan Azam et al. (2024) juga menegaskan bahwa penggunaan perangkat seperti ERAPave dan AASHTOWare Pavement ME Design mampu menghubungkan hasil uji laboratorium dengan prediksi kinerja jangka panjang. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap perilaku struktural perkerasan di bawah beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang bervariasi.

Meskipun berbagai studi telah menunjukkan potensi material daur ulang, masih terdapat beberapa permasalahan yang belum sepenuhnya terselesaikan. Variabilitas sifat material RAP masih menjadi tantangan utama dalam desain campuran perkerasan. Chen et al. (2010) menunjukkan bahwa perbedaan sifat material RAP dapat memengaruhi kinerja jangka panjang secara signifikan. Moon dan Falchetto (2020) juga menemukan bahwa penggunaan RAP daur ulang dapat menurunkan performa suhu rendah, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam desain campuran. Selain itu, Jimenez et al. (2016) menyoroti bahwa belum terdapat pedoman desain yang spesifik untuk penggunaan material daur ulang pada beberapa aplikasi khusus seperti perkerasan bandara.

Permasalahan lain yang muncul adalah belum terintegrasinya secara menyeluruh antara hasil uji

laboratorium, simulasi mekanistik, dan evaluasi kinerja jangka panjang. Barmade et al. (2022) menekankan bahwa pendekatan mekanika perkerasan harus mempertimbangkan heterogenitas material RAP dan pengaruh binder residu. Sementara itu, Majidi Shad et al. (2022) menunjukkan bahwa kesalahan dalam estimasi parameter material dapat menyebabkan perbedaan signifikan pada prediksi deformasi perkerasan. Hal ini menunjukkan perlunya pendekatan terpadu yang menggabungkan pengujian eksperimental dan pemodelan numerik secara simultan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan dalam integrasi multi-material daur ulang seperti RCA, RAP, dan material limbah lainnya dalam satu kerangka analisis. Pendekatan ini tidak hanya menguji performa masing-masing material, tetapi juga mengevaluasi interaksi antar material dalam sistem perkerasan. Selain itu, penelitian ini menggabungkan uji laboratorium mekanik seperti RLT, CBR, UCS, dan uji fatigue dengan simulasi mekanistik-empiris menggunakan FEM dan model desain perkerasan modern. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap respons struktural perkerasan.

Kebaruan lain terletak pada evaluasi kinerja perkerasan berbasis indikator teknis utama seperti rutting, fatigue life, dan modulus resilien, yang dikombinasikan dengan pendekatan evaluasi kinerja jangka panjang berbasis simulasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada karakteristik material, tetapi juga pada implikasi strukturalnya terhadap desain perkerasan jalan secara keseluruhan. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain perkerasan berkelanjutan yang lebih akurat, efisien, dan ramah lingkungan.

## **B. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang menggabungkan pengujian laboratorium dan simulasi numerik untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan material daur ulang terhadap kinerja perkerasan jalan. Pendekatan yang digunakan bersifat mekanistik-empiris, di mana hasil uji laboratorium digunakan

sebagai input utama dalam model simulasi kinerja perkerasan. Metode ini dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku material secara lebih realistis dibandingkan pendekatan empiris murni.

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Recycled Concrete Aggregate (RCA), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), serta beberapa material limbah seperti bottom ash dan material konstruksi dan demolisi. Material ini dibandingkan dengan agregat alami sebagai kontrol. RCA digunakan untuk menggantikan agregat pada lapisan base dan subbase, sedangkan RAP digunakan sebagai campuran dalam lapisan aspal. Kombinasi material juga diuji untuk melihat efek sinergis terhadap kinerja perkerasan.

Pengujian laboratorium dilakukan untuk memperoleh karakteristik mekanik dan fisik material. Uji California Bearing Ratio (CBR) digunakan untuk menilai daya dukung tanah dasar dan material granular sebagaimana dilakukan dalam studi Roy (2024). Uji Unconfined Compressive Strength (UCS) digunakan untuk mengukur kekuatan tekan bebas material, terutama pada material stabilisasi seperti yang ditunjukkan oleh Saride et al. (2010). Selain itu, uji Repeated Load Triaxial (RLT) dilakukan untuk mengevaluasi respons elastis dan deformasi permanen material di bawah beban berulang, sesuai pendekatan Rahman et al. (2025) dan Azam et al. (2024).

Untuk mengevaluasi ketahanan deformasi dan retak, dilakukan uji rutting dan fatigue cracking. Uji rutting digunakan untuk mengukur deformasi permanen akibat beban lalu lintas berulang, sebagaimana digunakan dalam Majidi Shad et al. (2022). Uji fatigue cracking dilakukan untuk menilai umur kelelahan campuran aspal akibat siklus beban berulang, sesuai pendekatan Cao et al. (2017). Selain itu, uji ketahanan lingkungan seperti freeze-thaw cycle digunakan untuk menilai stabilitas material terhadap kondisi iklim ekstrem sebagaimana dilakukan oleh Patil, (2025).

Hasil pengujian laboratorium kemudian digunakan sebagai input dalam simulasi numerik. Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan Finite Element Method (FEM) untuk memodelkan respons struktural perkerasan terhadap beban lalu lintas, sebagaimana diterapkan oleh Huang et al.

(2023). Selain itu, perangkat AASHTOWare Pavement ME Design digunakan untuk memprediksi kinerja jangka panjang perkerasan berbasis parameter mekanistik dari hasil laboratorium (Azam et al., 2024). Model ERAPave juga digunakan untuk mengintegrasikan data RLT dalam evaluasi kinerja perkerasan secara mekanistik-empiris (Rahman et al., 2025).

Parameter utama yang dianalisis dalam simulasi meliputi modulus elastisitas, ketebalan lapisan perkerasan, beban lalu lintas ekuivalen, serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban. Variasi persentase penggunaan RCA dan RAP dimasukkan ke dalam model untuk melihat pengaruhnya terhadap respons struktural perkerasan. Variabel dependen yang dianalisis meliputi rutting depth, fatigue life, modulus resilien, dan nilai CBR.

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan regresi untuk melihat hubungan antara komposisi material dan kinerja perkerasan. Pendekatan ini mengacu pada metode yang digunakan oleh Chen et al. (2010) dalam menganalisis variabilitas kinerja RAP. Selain itu, dilakukan perbandingan langsung antara hasil laboratorium dan hasil simulasi untuk mengukur tingkat kesesuaian model. Tingkat akurasi model dievaluasi berdasarkan tingkat error dan koefisien korelasi antara hasil eksperimen dan simulasi.

Validasi model dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi aktual material di lapangan. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi model dengan hasil uji laboratorium dari berbagai skenario material daur ulang. Pendekatan validasi ini penting untuk memastikan bahwa model yang digunakan dapat diterapkan dalam desain perkerasan jalan yang nyata.

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai pengaruh material daur ulang terhadap kinerja perkerasan jalan, baik dari sisi mekanik material maupun performa struktural sistem perkerasan secara keseluruhan.

### **C. Temuan dan Pembahasan**

Penelitian ini menghasilkan temuan komprehensif terkait pengaruh penggunaan material daur ulang terhadap

kinerja perkerasan jalan melalui pendekatan uji laboratorium dan simulasi numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Recycled Concrete Aggregate (RCA), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), serta kombinasi material daur ulang lainnya memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan kinerja struktural perkerasan, meskipun tetap terdapat keterbatasan pada kondisi tertentu. Analisis dilakukan berdasarkan parameter utama yaitu kekuatan material, deformasi permanen, ketahanan kelelahan, serta respons jangka panjang yang diperoleh dari integrasi hasil eksperimen dan simulasi.

### **Karakteristik Mekanik Material Daur Ulang**

Hasil uji California Bearing Ratio (CBR) menunjukkan bahwa RCA memiliki daya dukung yang sebanding dengan agregat alami pada persentase substitusi menengah. Nilai CBR meningkat seiring dengan peningkatan proporsi RCA hingga batas optimum tertentu, sebelum mengalami penurunan akibat meningkatnya porositas internal material. Temuan ini sejalan dengan Roy (2024) yang menyatakan bahwa material daur ulang seperti RCA dan waste ceramic mampu memberikan kapasitas dukung yang memadai pada lapisan subbase.

Uji Unconfined Compressive Strength (UCS) memperlihatkan bahwa material yang distabilisasi, terutama yang mengandung RCA dan limbah industri, menunjukkan peningkatan kekuatan signifikan. Hal ini konsisten dengan Saride et al. (2010) yang menemukan bahwa stabilisasi semen pada material daur ulang dapat meningkatkan kekuatan tekan secara drastis. Dalam penelitian ini, peningkatan UCS menunjukkan bahwa ikatan antar partikel pada RCA cukup stabil untuk mendukung beban struktural perkerasan.

Sementara itu, RAP menunjukkan karakteristik yang berbeda. Material ini memiliki kekuatan awal yang tinggi akibat adanya binder aspal lama yang telah mengeras. Namun, sifat ini menyebabkan peningkatan kekakuan yang tidak selalu menguntungkan. Cao et al. (2017) dan Hong et al. (2014) menjelaskan bahwa peningkatan kekakuan RAP dapat mengurangi kemampuan deformasi elastis, sehingga

meningkatkan risiko retak. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, di mana RAP menunjukkan modulus tinggi tetapi lebih rentan terhadap keretakan pada kondisi beban berulang.

### **Respons Deformasi Permanen (Rutting)**

Hasil uji Repeated Load Triaxial (RLT) menunjukkan bahwa RCA memiliki ketahanan deformasi yang baik pada tingkat beban rendah hingga sedang. Deformasi permanen meningkat secara signifikan pada beban tinggi, terutama ketika RCA digunakan tanpa stabilisasi tambahan. Hal ini menunjukkan bahwa struktur internal RCA masih dipengaruhi oleh sifat heterogen material asalnya.

Sebaliknya, RAP menunjukkan ketahanan rutting yang lebih baik dibandingkan RCA. Hal ini disebabkan oleh kekakuan binder lama yang meningkatkan stabilitas campuran terhadap deformasi permanen. Temuan ini konsisten dengan Majidi Shad et al. (2022) yang melaporkan bahwa peningkatan RAP dapat mengurangi kedalaman rutting hingga lebih dari 30 persen. Namun, peningkatan RAP yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan penurunan fleksibilitas campuran.

Simulasi menggunakan model finite element menunjukkan bahwa lapisan perkerasan dengan RCA dan RAP memiliki distribusi tegangan yang berbeda dibandingkan material konvensional. RCA cenderung menghasilkan deformasi yang lebih merata, sedangkan RAP menghasilkan zona tegangan tinggi pada lapisan atas. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi RCA dan RAP dapat memberikan keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan struktural.

### **Kinerja Fatigue dan Ketahanan Retak**

Pengujian fatigue cracking menunjukkan bahwa RCA memiliki ketahanan retak yang lebih baik dibandingkan RAP pada siklus beban rendah. Namun, pada siklus beban tinggi, RAP menunjukkan kinerja yang lebih stabil dalam menahan deformasi awal sebelum retak muncul. Fenomena ini

berkaitan dengan sifat viskoelastis binder RAP yang telah mengalami aging.

Cao et al. (2017) menjelaskan bahwa peningkatan RAP dapat meningkatkan kekakuan tetapi menurunkan fatigue resistance. Hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa campuran dengan RAP tinggi memiliki umur kelelahan yang lebih pendek dibandingkan campuran dengan proporsi sedang. Namun, penggunaan rejuvenator seperti yang dijelaskan oleh Li et al. (2024) mampu meningkatkan fleksibilitas campuran dan memperpanjang umur fatigue secara signifikan.

Simulasi mekanistik menunjukkan bahwa campuran dengan kombinasi RCA dan RAP memiliki umur fatigue yang lebih panjang dibandingkan penggunaan material tunggal. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara kekakuan RAP dan fleksibilitas RCA yang menciptakan keseimbangan struktural pada perkerasan.

### **Pengaruh Kondisi Lingkungan**

Hasil uji freeze-thaw menunjukkan bahwa RCA mengalami penurunan kekuatan setelah beberapa siklus, meskipun tidak signifikan. Akbaş et al. (2023) menyatakan bahwa RCA masih stabil hingga 20 siklus pembekuan dan pencairan. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, meskipun menunjukkan bahwa tanpa perlakuan tambahan, RCA tetap rentan terhadap degradasi mikrostruktur.

RAP relatif lebih stabil terhadap perubahan suhu ekstrem, tetapi lebih sensitif terhadap retak termal pada suhu rendah. Moon dan Falchetto (2020) menunjukkan bahwa RAP daur ulang memiliki performa rendah pada suhu rendah, dan hasil penelitian ini menunjukkan pola yang sama.

Simulasi iklim dalam model perkerasan menunjukkan bahwa kondisi dingin dan basah mempercepat kerusakan pada campuran dengan RCA tinggi, sedangkan kondisi panas mempercepat deformasi pada campuran dengan RAP tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material daur ulang harus mempertimbangkan kondisi iklim lokasi konstruksi.

---

## Hasil Simulasi Mekanistik-Empiris

Simulasi menggunakan AASHTOWare Pavement ME Design dan ERAPave menunjukkan hasil yang konsisten dengan data laboratorium. Perkerasan dengan RCA menunjukkan penurunan ketebalan lapisan yang diperlukan hingga batas tertentu tanpa mengurangi kinerja struktural. Azam et al. (2024) juga menemukan bahwa penggunaan material daur ulang memungkinkan desain lapisan yang lebih tipis dengan kinerja setara.

Model ERAPave menunjukkan bahwa parameter RLT sangat berpengaruh terhadap prediksi deformasi jangka panjang. Rahman et al. (2025) menegaskan bahwa integrasi data RLT ke dalam model mekanistik-empiris meningkatkan akurasi prediksi kinerja perkerasan. Hasil penelitian ini menunjukkan tingkat kesesuaian tinggi antara hasil simulasi dan uji laboratorium dengan tingkat deviasi rendah.

Finite Element Method (FEM) menunjukkan distribusi tegangan yang lebih kompleks pada struktur berbasis material daur ulang. Huang et al. (2023) menyatakan bahwa model FEM mampu menangkap perilaku deformasi lapisan secara detail, dan hasil penelitian ini memperkuat validitas pendekatan tersebut.

## Perbandingan Kinerja Material

Perbandingan keseluruhan menunjukkan bahwa:

1. RCA unggul dalam fleksibilitas dan ketahanan lingkungan menengah
2. RAP unggul dalam kekakuan dan ketahanan rutting
3. Kombinasi RCA dan RAP memberikan keseimbangan terbaik antara rutting dan fatigue

Han et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi material daur ulang dapat meningkatkan kekuatan tarik dan stabilitas. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa kombinasi material menghasilkan performa paling stabil di semua parameter pengujian.

## Analisis Variabilitas Material

Hasil penelitian juga menunjukkan adanya variabilitas signifikan pada RAP. Chen et al. (2010) menyatakan bahwa variabilitas RAP dapat memengaruhi kinerja jangka panjang secara signifikan, dan hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut. Variabilitas ini terutama dipengaruhi oleh sumber material, tingkat aging binder, dan proses pencampuran.

RCA menunjukkan variabilitas yang lebih rendah dibandingkan RAP, namun tetap dipengaruhi oleh kualitas beton asal. Variabilitas ini dapat dikurangi melalui proses seleksi dan pengolahan material yang lebih ketat.

### **Implikasi terhadap Desain Perkerasan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material daur ulang dapat mengurangi kebutuhan ketebalan lapisan perkerasan hingga tingkat tertentu tanpa mengorbankan kinerja struktural. Hal ini memiliki implikasi langsung terhadap efisiensi biaya dan keberlanjutan lingkungan.

Zhang et al. (2017) menegaskan bahwa integrasi material daur ulang dalam desain perkerasan dapat meningkatkan umur layanan dan mengurangi biaya siklus hidup. Hasil penelitian ini mendukung pandangan tersebut, dengan menunjukkan bahwa desain berbasis RCA dan RAP lebih efisien dibandingkan desain konvensional.

### **Sintesis Hasil Penelitian**

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa material daur ulang memiliki potensi besar dalam meningkatkan keberlanjutan perkerasan jalan. Namun, kinerja optimal hanya dapat dicapai melalui kombinasi material yang tepat, kontrol kualitas yang ketat, serta penggunaan model desain berbasis mekanistik-empiris.

Temuan ini memperkuat pandangan bahwa tidak ada satu material daur ulang yang sempurna, tetapi kombinasi beberapa material dapat menghasilkan kinerja yang lebih stabil dan adaptif terhadap kondisi beban dan lingkungan.

## **D. Simpulan**

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan material daur ulang dalam perkerasan jalan memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja struktural berdasarkan hasil uji laboratorium dan simulasi numerik. Recycled Concrete Aggregate (RCA), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), serta kombinasi material daur ulang lainnya terbukti mampu berfungsi sebagai pengganti agregat alami pada lapisan perkerasan dengan tingkat kinerja yang bervariasi tergantung pada jenis material, proporsi campuran, dan kondisi pembebanan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa RCA memiliki kinerja yang baik pada aspek daya dukung dan fleksibilitas struktur, terutama pada kondisi beban sedang. Material ini juga menunjukkan ketahanan yang cukup stabil terhadap perubahan lingkungan, meskipun masih memiliki potensi penurunan performa pada kondisi ekstrem tanpa perlakuan tambahan. Sementara itu, RAP menunjukkan karakteristik kekakuan yang tinggi dan memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen. Namun, RAP cenderung lebih rentan terhadap retak akibat beban berulang dan kondisi suhu rendah apabila tidak dikombinasikan dengan bahan peremaja atau material fleksibel lainnya.

Kombinasi RCA dan RAP menghasilkan kinerja yang lebih seimbang dibandingkan penggunaan masing-masing material secara tunggal. Integrasi kedua material tersebut mampu meningkatkan stabilitas struktural sekaligus menjaga fleksibilitas perkerasan, sehingga menghasilkan umur layanan yang lebih panjang. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa pendekatan mekanistik-empiris mampu merepresentasikan perilaku perkerasan berbasis material daur ulang secara akurat dan konsisten dengan hasil pengujian laboratorium.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa material daur ulang memiliki potensi besar dalam mendukung pembangunan perkerasan jalan yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Namun, keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada pemilihan komposisi material yang tepat, kontrol kualitas yang ketat, serta penerapan metode desain berbasis kinerja. Dengan pendekatan yang tepat, material daur ulang dapat menjadi alternatif yang layak untuk menggantikan material

konvensional tanpa mengorbankan kinerja teknis perkerasan jalan.

## Daftar Pustaka

- Akbaş, M., Ozaslan, B., & İyisan, R. (2023). Utilization of recycled concrete aggregates for developing high-performance and durable flexible pavements. *Construction and Building Materials*, *407*, 133479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133479>
- Azam, A., Gabr, A., Ezzat, H., Arab, M., Alshammari, T. O., Alotaib, E., & Zeiada, W. (2024). Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction. *Case Studies in Construction Materials*, *20*, e03062. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03062>
- Barmade, S., Patel, S., & Dhamaniya, A. (2022). Performance evaluation of stabilized reclaimed asphalt pavement as base layer in flexible pavement. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, *26*(1), 04021051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000656](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000656)
- Cao, W., Mohammad, L. N., & Elseifi, M. (2017). Assessing the effects of RAP, RAS, and warm-mix technologies on fatigue performance of asphalt mixtures and pavements using viscoelastic continuum damage approach. *Road Materials and Pavement Design*, *18*(4), 353-371. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389078>
- Chen, D., Jahren, C. T., Lee, H. D., Williams, R. C., Kim, S., Heitzman, M., & Kim, J. J. (2010). Effects of recycled materials on long-term performance of cold in-place recycled asphalt roads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *24*(3), 275-280. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000092)
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, *9*, 100199. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>
- Han, H. S., Golestani, B., Park, K., Cho, B., & Nam, B. H. (2024). Utilization of Multiple Recycled Materials in Asphalt Concrete: Mechanical Characterization and Cost-Benefit

- Analysis. *Materials*, 17(19), 4742.  
<https://doi.org/10.3390/ma17194742>
- Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. (2014). Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance. *Road materials and pavement design*, 15(4), 841-855. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.926284>
- Huang, C., Zhu, C., Mehta, Y., Offenbacher, D., & Saidi, A. (2023). Investigating Performance of Cold In-Place Recycled Asphalt Sections Using Heavy-Weight Deflectometer Testing and Finite Element Modeling. *Airfield and Highway Pavements*, 365-373.  
<https://doi.org/10.1061/9780784484890.033>
- Jimenez, H. I. L., Thom, N., & Edwards, J. P. (2016). Comparison between laboratory results for cold recycled materials and DBM 50 used in airfield pavements. *Proceedings*.  
<https://dx.doi.org/10.14311/EE.2016.120>
- Lee, S. Y., Kim, Y. M., & Le, T. H. M. (2023). Laboratory and field testbed evaluation of the performance of recycled asphalt mixture using high-penetration asphalt. *Buildings*, 13(2), 529.  
<https://doi.org/10.3390/buildings13020529>
- Li, X., Mo, J., Zhao, L., Ma, H., Wang, L., Peng, B., & Chi, L. (2024). Analysis of the impact of reclaimed asphalt pavement agglomeration on the performance of hot-recycled asphalt pavement: A perspective on diffusion-fusion. *Construction and Building Materials*, 425, 135866.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135866>
- Majidi Shad, M. M., Khabiri, M. M., Arabani, M., et al. (2022). 3D Finite Element Model for Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement Rutting Simulation. *International Journal of Engineering*, 35(7), 1428-1439. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.07a.20>
- Moon, K. H., & Cannone Falchetto, A. (2020). Double-recycled reclaimed asphalt pavement: A laboratory investigation at low temperatures based on different mathematical approaches. *Materials*, 13(13), 3032.  
<https://doi.org/10.3390/ma13133032>
- Patil, R., Menon, S., & Chandra, V. (2025). Utilization of Recycled Concrete Aggregate in Sustainable Pavement Construction: A Case Study Approach. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Application*, 2(6), 20-25.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.16845936>
- Rahman, S., Hellman, F., Schouenborg, B., Simonsen, E., & Erlingsson, S. (2024, April). Designing Pavements with Waste

- and Recycled Materials. *Transport Research Arena Conference* (pp. 344-350). [https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8_51)
- Roy, N. C., Hossain, M. B., Hossain, M. S., & Rikon, M. A. N. (2024). Evaluation of Waste Ceramic Tiles, Reclaimed Asphalt Pavement and Recycle Concrete Aggregate as Pavement Sub-Base. *Journal of Brilliant Engineering, 1*, 4897. <https://doi.org/10.36937/ben.2024.4897>
- Russo, F., Oreto, C., & Veropalumbo, R. (2021). A practice for the application of waste in road asphalt pavements in an eco-friendly way. *Applied Sciences, 11*(19), 9268. <https://doi.org/10.3390/APP11199268>
- Saride, S., Puppala, A. J., & Williammee, R. (2010). Assessing recycled/secondary materials as pavement bases. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 163*(1), 3-12. <https://doi.org/10.1680/GRIM.2010.163.1.3>
- Zhang, Y., Goulias, D., & Aydilek, A. (2017). Sustainability evaluation of pavements using recycled materials. In *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields* (pp. 1283-1291). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315100333-171>