

## PENGARUH PENGGUNAAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DAN RECYCLED CONCRETE AGGREGATE PADA LAPIS PONDASI AGREGAT TERHADAP KEKUATAN MEKANIS

Agnes Yuliana Putri, Paravita Sri Wulandari\*

Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Jawa Timur

\*Email: paravita@petra.ac.id

### Abstrak

Pembangunan jalan raya mengonsumsi sumber daya alam yang besar serta menghasilkan emisi dan limbah konstruksi. Sebagai solusi berkelanjutan, penggunaan material daur ulang seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) menjadi alternatif yang potensial untuk menggantikan agregat alami. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh campuran RAP dan RCA terhadap karakteristik fisik dan mekanis lapis fondasi jalan, serta menentukan komposisi optimal guna mencapai kekuatan, daya tahan, dan stabilitas struktural yang maksimal. Metode yang digunakan adalah studi kuantitatif dengan pengujian laboratorium dan analisis statistik terhadap beberapa variasi campuran. Hasil menunjukkan bahwa campuran 55% RAP dan 45% RCA memberikan kinerja terbaik dengan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) sebesar 87,5% dan densitas kering maksimum sebesar 1,86 g/cm<sup>3</sup>. Kinerja ini mendekati karakteristik agregat konvensional, sehingga campuran RAP dan RCA dapat dipertimbangkan sebagai alternatif material konstruksi jalan yang lebih ramah lingkungan.

**Kata kunci:** *california bearing ratio*, lapis pondasi agregat, *reclaimed asphalt pavement*, *recycled concrete aggregate*

### Abstract

Road construction consumes a large amount of natural resources and generates significant emissions and construction waste. As a sustainable solution, the use of recycled materials such as *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) and *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) presents a potential alternative to replace natural aggregates. This study aims to analyze the effects of RAP and RCA mixtures on the physical and mechanical properties of road base layers, as well as to determine the optimal composition to achieve maximum strength, durability, and structural stability. A quantitative approach was used, involving laboratory testing and statistical analysis of various mixture compositions. The results show that a mixture containing 55% RAP and 45% RCA provides the best performance, with a *California Bearing Ratio* (CBR) value of 87.5% and a maximum dry density of 1.86 g/cm<sup>3</sup>. This performance closely approaches the characteristics of conventional aggregates, indicating that RAP and RCA mixtures can be considered as environmentally friendly alternatives for road construction materials.

**Keywords:** *base course*, *california bearing ratio*, *reclaimed asphalt pavement*, *recycled concrete aggregate*

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan jalan raya mengonsumsi sumber daya alam dalam jumlah besar, menimbulkan kekhawatiran akan keberlanjutan infrastruktur (Garg dan Kumar, 2022; Singh dan Yadav, 2024). Dalam beberapa tahun terakhir, emisi dari konstruksi jalan meningkat pesat, terutama di negara berkembang yang mempercepat pembangunan (Singh dan Yadav, 2024; United Nations Environment Programme, 2019). Infrastruktur jalan kini mencapai hampir 21 juta kilometer di seluruh dunia, dengan konstruksi dan pemeliharaan jalan menyumbang sekitar 30% konsumsi energi dan emisi karbon (United Nations Environment Programme, 2019; Zhao dan Wang, 2025). Tantangan utama adalah memenuhi kebutuhan sumber daya yang terus meningkat tanpa mengorbankan keberlanjutan.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan dalam mengatasi permasalahan ini adalah pemanfaatan material daur ulang sebagai pengganti agregat alami. *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) merupakan dua jenis material limbah yang memiliki potensi besar sebagai substitusi agregat konvensional (Arshad dan Ahmed, 2017; Berwal et al., 2024). RAP berasal dari hasil penggilingan lapisan perkerasan aspal yang sudah tidak digunakan, sedangkan RCA merupakan agregat yang diperoleh dari limbah beton yang dihancurkan (Mousa et al., 2016; Fernandez dan Morales, 2025). Kedua material ini telah banyak digunakan di berbagai negara sebagai alternatif agregat alami, mengingat ketersediaannya yang melimpah dan

karakteristiknya yang masih memenuhi standar teknis untuk berbagai aplikasi konstruksi (Yang, Hong, dan Cho, 2023; Li, Zhang, dan Chen, 2025).

Penggunaan RAP sebagai material substitusi menawarkan beberapa keuntungan, terutama karena kandungan aspal yang masih terdapat dalam material ini dapat berfungsi sebagai pengikat alami dalam campuran agregat (Chen dan Huang, 2025; Zhou et al., 2023). Sementara itu, RCA memiliki karakteristik fisik yang berbeda dari agregat alami, seperti densitas yang lebih rendah dan daya serap air yang lebih tinggi (Al-Saadi dan Al-Mufti, 2025; Fernandez dan Morales, 2025). Namun, RCA tetap memiliki kekuatan struktural yang memadai, terutama dalam aplikasi pada lapis pondasi jalan (Nowak dan Kowalski, 2025; El-Sayed dan Amin, 2025). Oleh karena itu, dalam penggunaannya, RCA memerlukan perlakuan khusus guna memastikan kinerja jangka panjang yang optimal dalam konstruksi jalan (Kumar dan Singh, 2025; Osei dan Boateng, 2025).

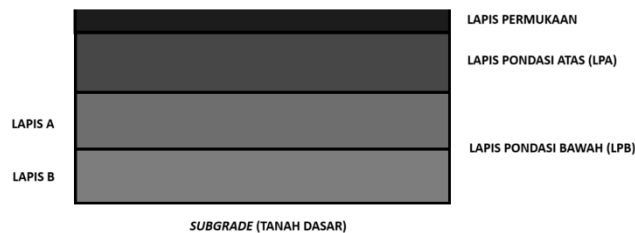
Mengingat masih terbatasnya studi yang mengkaji kombinasi RAP dan RCA dalam satu penelitian, studi ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada campuran lapis pondasi jalan berbahan RAP dan RCA. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memahami bagaimana kombinasi kedua material ini dapat mempengaruhi nilai CBR, yang merupakan indikator utama dalam desain perkerasan jalan (Al-Saadi dan Al-Mufti, 2025; Yang et al., 2023). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menentukan persentase optimum RAP dan RCA dalam campuran guna mencapai keseimbangan antara kekuatan, daya tahan, dan stabilitas struktural tanpa mengorbankan kualitas pondasi jalan (Arshad dan Ahmed, 2017; Marin dan Jonathan, 2024). Variabel yang diteliti mencakup kadar air optimum dan nilai CBR dengan berbagai komposisi campuran (Widayanti et al., 2019; Mousa et al., 2016).

Konstruksi perkerasan jalan adalah proses pembangunan atau perbaikan lapisan jalan untuk menciptakan permukaan yang kuat, aman, dan nyaman bagi pengguna. Struktur perkerasan terdiri dari beberapa lapisan, seperti AC-WC sebagai lapisan aus yang bersentuhan langsung dengan kendaraan, AC-BC sebagai lapisan pengikat, dan AC-Base sebagai lapisan dasar yang mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar (Sukirman, 1999; Pekerjaan Umum, Jalan, dan Jembatan, 2020.). Kombinasi material seperti agregat dan bahan pengikat (aspal atau semen) memastikan jalan mampu bertahan terhadap berbagai kondisi cuaca dan beban kendaraan (Sukirman, 2003; Zulfiqar et al., 2023).

Berdasarkan bahan pengikatnya, konstruksi perkerasan jalan terbagi menjadi tiga jenis: perkerasan kaku, perkerasan lentur, dan perkerasan komposit (Sukirman, 1999). Perkerasan kaku menggunakan beton semen sebagai material utama, dengan pelat beton yang mampu menahan beban secara langsung (El-Sayed dan Amin, 2025). Perkerasan lentur, yang menggunakan aspal sebagai pengikat, memiliki struktur berlapis untuk menyebarkan beban secara efektif ke tanah dasar (Zhou et al., 2023; Chen dan Huang, 2025). Sementara itu, perkerasan komposit menggabungkan keunggulan perkerasan kaku dan lentur, biasanya dengan lapisan lentur di atas perkerasan kaku atau sebaliknya, untuk meningkatkan efisiensi struktural dan memperpanjang umur jalan (Kumar dan Singh, 2025; Osei dan Boateng, 2025).

Tanah dasar, atau subgrade, merupakan fondasi utama dalam struktur perkerasan jalan. Lapisan ini berfungsi untuk mendukung seluruh beban lalu lintas yang diteruskan melalui lapisan perkerasan di atasnya (Pekerjaan Umum, Jalan, dan Jembatan, 2020.). Kualitas tanah dasar sangat penting karena daya dukungnya memengaruhi ketebalan dan kekuatan keseluruhan struktur perkerasan jalan (Arshad dan Ahmed, 2017; Nowak dan Kowalski, 2025).

Perkerasan jalan raya dibangun dalam beberapa lapisan untuk memastikan kekuatan dukung dan ketahanan yang optimal dengan tetap mempertimbangkan efisiensi biaya. Lapisan paling atas, atau lapisan permukaan, memiliki kualitas terbaik dan berfungsi memberikan kenyamanan serta perlindungan terhadap cuaca (Sukirman, 1999; Zulfiqar et al., 2023). Di bawahnya terdapat lapisan pondasi yang diletakkan di atas tanah dasar yang telah dipadatkan. Pematatan tanah dasar bertujuan meningkatkan daya dukung, mengurangi peresapan air, serta meminimalkan perubahan volume akibat penyusutan atau pengembangan tanah, sehingga struktur jalan tetap stabil dan tidak mudah rusak (Guthrie, Cooley, dan Eggett, 2007; Latjemma, Tahir, dan Haris, 2020).



Gambar 1. Susunan lapis perkerasan dibuat menggunakan *Paint App*. (Penulis, 2025)

Struktur perkerasan jalan terdiri dari empat lapisan utama. Lapisan permukaan dibuat dari campuran aspal dan agregat atau beton, berguna untuk kenyamanan dan perlindungan jalan. Di bawahnya, Lapisan Pondasi Atas (LPA) mendukung lapisan permukaan dan mendistribusikan beban ke Lapisan Pondasi Bawah (LPB), yang berfungsi mengurangi tekanan langsung ke tanah dasar. LPB biasanya terdiri dari material granular seperti pasir atau kerikil. Lapisan paling bawah adalah Lapisan Tanah Dasar (LTD), yang menjadi fondasi seluruh struktur dan harus dipadatkan agar mampu menopang beban lalu lintas serta mencegah penurunan tidak merata.

Lapis Fondasi Agregat dibagi menjadi empat kelas, yaitu Kelas A, Kelas B, dan Kelas S. Lapis Fondasi Agregat Kelas A merupakan lapisan fondasi atas yang terletak di bawah lapisan beraspal, sedangkan Lapis Fondasi Agregat Kelas B berfungsi sebagai lapisan fondasi bawah yang berada di bawah lapisan Kelas A. Lapis Fondasi Agregat Kelas S digunakan untuk bahu jalan yang tidak dilapisi (Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga, 2018).

Tabel 1. Sifat dan spesifikasi lapis pondasi agregat (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020)

Sifat-sifat	Lapis Fondasi Agregat			Lapis Drainase
	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 2417:2008)	0 - 40%	0 - 40%	0 - 40%	0 - 40%
Butiran pecah, ayakan No.4 (SNI 7619:2012)	95/90 <sup>1</sup>	55/50 <sup>2</sup>	55/50 <sup>2</sup>	80/75 <sup>3</sup>
Batas Cair (SNI 1967:2008)	0 - 25	0 - 35	0 - 35	-
Indeks Plastisitas (SNI 1966:2008)	0 - 6	4 - 10	4 - 15	-
Hasil kali Indeks Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No.200	maks.25	-	-	-
Gumpalan Lempung dan Butiran-butiran Mudah Pecah (SNI 4141:2015)	0 - 5%	0 - 5%	0 - 5%	0 - 5%
CBR rendaman (SNI 1744:2012)	min.90%	min.60%	min.50%	-
Perbandingan Persen Lolos Ayakan No.200 dan No.40	maks.2/3	maks.2/3	-	-
Koefisien Keseragaman : $C_v = D_{60}/D_{10}$	-	-	-	> 3,5

Catatan :

- 1) 95/90 menunjukkan bahwa 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.
- 2) 55/50 menunjukkan bahwa 55% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 50% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.
- 3) 80/75 menunjukkan bahwa 80% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 75% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih. (Spesifikasi umum, 2018, hal. 5-6)

Tabel 2 menampilkan persentase lolos berat untuk setiap kelas pada lapis pondasi agregat, dengan ukuran ayakan yang tertera di kolom paling kiri. Dapat diamati bahwa setiap kelas memiliki rentang batas atas dan batas bawah yang berbeda, sehingga batas tengahnya pun bervariasi.

Tabel 2. Gradasi lapis pondasi agregat dan lapis drainase (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020)

Ukuran Ayakan		Persen Berat Yang Lolos			Lapis Drainase
ASTM	(mm)	Lapis Fondasi Agregat			
		Kelas A	Kelas B	Kelas S	
2"	50		100		
1½"	37,5	100	88 - 95	100	100
1"	25,0	79 - 85	70 - 85	77 - 89	71 - 87
¾"	19,0				58 - 74
½"	12,5				44 - 60
3/8"	9,50	44 - 58	30 - 65	41 - 66	34 - 50
No.4	4,75	29 - 44	25 - 55	26 - 54	19 - 31
No.8	2,36				8 - 16
No.10	2,0	17 - 30	15 - 40	15 - 42	
No.16	1,18				0 - 4
No.40	0,425	7 - 17	8 - 20	7 - 26	
No.200	0,075	2 - 8	2 - 8	4 - 16	

Material perkerasan lentur jalan terdiri dari agregat kasar dan halus, di mana dalam penelitian ini digunakan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) dan RCA (*Recycled Concrete Aggregate*) sebagai substitusi agregat alam pada lapisan pondasi jalan. Agregat alam, menurut ASTM (1974), adalah material yang terdiri dari mineral padat dalam berbagai bentuk. Agregat menjadi komponen utama dalam perkerasan jalan, dengan persentase 90-95% dari berat agregat atau 75-85% dari volume total. Kualitas agregat ditentukan oleh beberapa faktor, seperti gradasi, kekuatan, keawetan, dan daya rekat dengan aspal. Standar proporsi agregat untuk lapisan fondasi kelas A adalah 64,5% agregat kasar dan 35,4% agregat halus.

RAP adalah material hasil daur ulang dari lapisan aspal jalan yang telah digunakan dan kemudian digantikan dengan lapisan baru. Material ini diperoleh dari proyek pemeliharaan atau pembongkaran jalan lama dan dapat dicampur dengan aspal serta agregat baru untuk meningkatkan kualitasnya. Berdasarkan studi, penggunaan 60% RAP sebagai pengganti agregat alam tetap memenuhi spesifikasi kurva gradasi yang diperlukan. Sebelum digunakan, RAP harus melalui analisis gradasi dan uji saringan untuk memastikan kelayakannya sebagai material substitusi.

Sementara itu, RCA diperoleh dari beton bekas yang dibongkar dari berbagai struktur seperti gedung dan jembatan. RCA memiliki densitas lebih rendah dibandingkan agregat alami serta tingkat penyerapan air yang lebih tinggi, yang menyebabkan porositasnya lebih besar. Hal ini membuat RCA memiliki karakteristik berbeda dibandingkan agregat alam, yang perlu diperhitungkan dalam penggunaannya sebagai material perkerasan jalan.

Untuk menganalisis dampak penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) sebagai substitusi agregat alami pada Lapis Pondasi Agregat Kelas A, dilakukan pengujian kepadatan tanah. Salah satu metode yang digunakan adalah uji Proctor untuk menentukan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) dan kepadatan kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*). Hasil pengujian ini menjadi dasar dalam evaluasi lebih lanjut menggunakan pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) guna menilai karakteristik mekanis material campuran.

Uji *Proctor* adalah metode laboratorium untuk menentukan kadar air optimal suatu tanah agar mencapai kepadatan kering maksimum. Pengujian ini dilakukan sesuai standar SNI 1743:2008 dan pertama kali diperkenalkan oleh R.R. Proctor. Konsep pemadatan melibatkan empat variabel utama, yaitu energi pemadatan, karakteristik tanah, kadar air, serta berat isi kering. Dalam penelitian ini, material dipadatkan dalam cetakan silinder berdiameter 6 inci dan tinggi 4,5 inci. Nilai kepadatan kering maksimum serta kadar air optimum yang diperoleh digunakan sebagai acuan dalam analisis karakteristik mekanis campuran.

Kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum memiliki hubungan erat karena setiap jenis tanah memerlukan kadar air tertentu untuk mencapai kepadatan maksimalnya. Saat tanah mencapai kepadatan kering tertinggi, kadar air pada kondisi tersebut merupakan kadar air optimum untuk proses pemadatan. Dalam pengujian ini, metode D digunakan dengan cetakan silinder yang sama, diterapkan pada material yang lolos saringan 19 mm atau ¾ inci. Material yang tertahan pada saringan tersebut dikategorikan sebagai agregat kasar dan tidak digunakan dalam pengujian.

Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) merupakan tahap lanjutan dari uji pemadatan tanah untuk menentukan daya dukung tanah dalam kondisi kepadatan dan kadar air tertentu. Uji ini dilakukan sesuai

standar SNI 1744:2012 dengan menggunakan sampel tanah yang telah dipadatkan melalui metode *proctor*. Nilai CBR menunjukkan kemampuan tanah dalam menahan beban struktur di atasnya dan harus memenuhi spesifikasi yang ditetapkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Bina Marga tahun 2018 revisi 2. Dalam penelitian ini, hanya material yang lolos saringan 3/4 inci yang diuji, sesuai dengan standar yang berlaku.

## 2. METODOLOGI

Metode yang diterapkan dimulai dengan tinjauan pustaka dari berbagai sumber seperti SNI, jurnal, dan buku untuk memperoleh informasi relevan. Selanjutnya, dilakukan persiapan bahan, termasuk RAP, RCA, dan agregat alam. Setelah bahan tersedia, dilakukan pengujian karakteristik material untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar SNI dan Bina Marga.

Setelah bahan diuji dan memenuhi spesifikasi, dilakukan pengujian pada tiga sampel dengan variasi campuran berbeda untuk menentukan kadar air optimum (KAO) melalui uji Proctor sesuai SNI 1743:2008. Sampel terdiri dari campuran agregat alam dengan RAP (Sampel A), RAP dengan RCA (Sampel B), serta agregat alam dengan RCA (Sampel C), masing-masing diuji dalam empat variasi komposisi. Setelah KAO diperoleh, dilakukan uji CBR laboratorium sesuai SNI 1744:2012 untuk menilai daya dukung tanah setelah perendaman. Data hasil uji, termasuk gradasi, kepadatan kering, dan nilai CBR, dianalisis dan disajikan dalam grafik untuk menentukan hubungan antara kadar air, kepadatan kering, serta daya dukung campuran sesuai spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 3. Variabel material agregat alam dan RAP

	Agregat Alam	RAP
Campuran 1	100%	-
Campuran 2	-	100%
Campuran 3	50%	50%
Campuran 4	40%	60%

Tabel 4. Variabel material RAP dan RCA

	RAP	RCA
Campuran 5	60%	40%
Campuran 6	50%	50%
Campuran 7	45%	55%
Campuran 8	55%	45%

Tabel 5. Variabel material agregat alam dan RCA

	Agregat Alam	RAP
Campuran 9	100%	-
Campuran 10	-	100%
Campuran 11	50%	50%
Campuran 12	25%	75%

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Hasil Pemeriksaan Ekstraksi

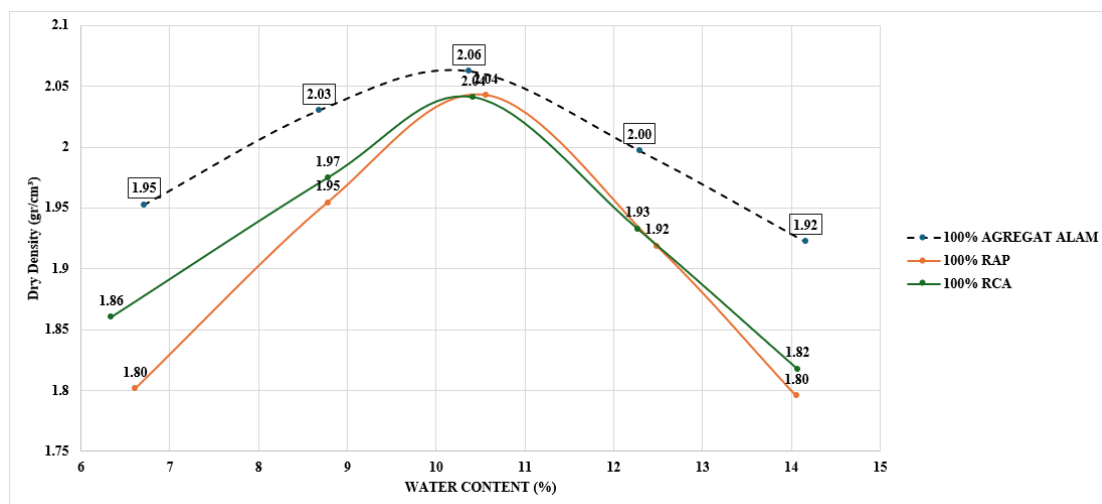
Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa kadar aspal dalam RAP yang digunakan adalah 4,37%, berdasarkan rata-rata dari dua sampel. Nilai ini menjadi acuan dalam pemilihan jenis Lapisan Pondasi Agregat agar sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2022 Revisi 2. Kadar aspal yang sesuai penting untuk menjaga keseimbangan antara kekakuan dan plastisitas campuran. Jika terlalu rendah, material dapat kehilangan daya tahan terhadap deformasi, sedangkan kadar yang terlalu tinggi dapat membuat campuran terlalu plastis dan rentan terhadap deformasi permanen. Oleh karena itu, meskipun kadar 4,37% berada dalam kisaran yang diharapkan, diperlukan pengujian lanjutan untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi teknis, terutama dalam aspek gradasi dan stabilitas campuran.

### 3.2. Hasil dan Analisa Gradasi

Analisis grafik yang dilakukan menunjukkan bahwa material RAP memiliki potensi untuk digunakan sebagai lapisan pondasi kelas A. Namun, agar memenuhi spesifikasi standar, diperlukan modifikasi pada gradasinya, terutama pada bagian partikel halus. Penyesuaian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja mekanis campuran sehingga dapat digunakan secara optimal dalam aplikasi konstruksi jalan. Untuk mencapai hal tersebut, penelitian ini melakukan proses penghancuran material RAP secara manual menggunakan palu. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan distribusi partikel yang lebih sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, batas tengah dari spesifikasi digunakan sebagai acuan utama dalam analisis dan evaluasi, sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih mendekati persyaratan teknis yang berlaku. RCA memiliki distribusi agregat kasar yang cukup baik dan dapat memenuhi spesifikasi pada ukuran ini. Tetapi dikarenakan kurangnya agregat halus, peneliti melakukan penghancuran manual dengan menggunakan palu pada material RCA.

### 3.3. Proktor 100% Agregat Alam, 100% RAP dan 100% RCA

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara *Water Content* (WC) dan *Dry Density* berdasarkan hasil uji Proktor untuk tiga jenis material, yaitu 100% Agregat Alam, 100% RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), dan 100% RCA (*Recycled Concrete Aggregate*). Dari analisis grafik, 100% Agregat Alam memiliki kinerja terbaik dengan *Maximum Dry Density* (MDD) sebesar  $2.06 \text{ g/cm}^3$  pada WC optimum. Pola grafik menunjukkan bahwa kepadatan menurun setelah WC melebihi nilai optimum akibat kelebihan air yang mengisi pori-pori. Sementara itu, material daur ulang seperti 100% RAP dan 100% RCA memiliki MDD yang lebih rendah, yaitu masing-masing  $1.97 \text{ g/cm}^3$  dan  $1.95 \text{ g/cm}^3$ . Kedua material ini mengalami penurunan kepadatan yang lebih signifikan saat WC meningkat, menandakan kecenderungan mereka untuk menjadi kurang padat dibandingkan agregat alam dalam kondisi air berlebih.

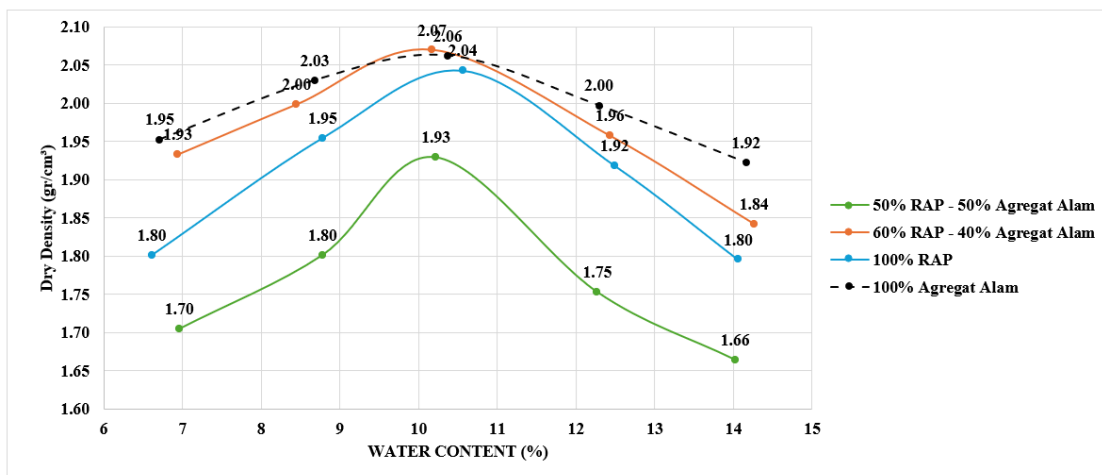


Gambar 2. Grafik gabungan proktor 100% agregat alam, 100% RAP, dan 100% RCA. (hasil analisis)

Material daur ulang seperti RAP dan RCA memiliki performa yang hampir sama pada WC tinggi, dengan kepadatan kering yang lebih rendah dibandingkan agregat alam. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat RAP yang mengandung bitumen serta RCA yang memiliki porositas lebih tinggi, sehingga memengaruhi pengisian pori-pori dan kepadatan akhir. Pola umum yang terlihat pada ketiga material menunjukkan bahwa kepadatan meningkat hingga mencapai MDD, kemudian menurun pada WC yang lebih tinggi. Selain itu, agregat alam menunjukkan kebutuhan air yang lebih besar untuk mencapai kepadatan optimum dibandingkan material daur ulang, menandakan kemampuannya untuk menampung kadar air lebih banyak dalam proses pemadatan.

### 3.4. Proktor Material RAP

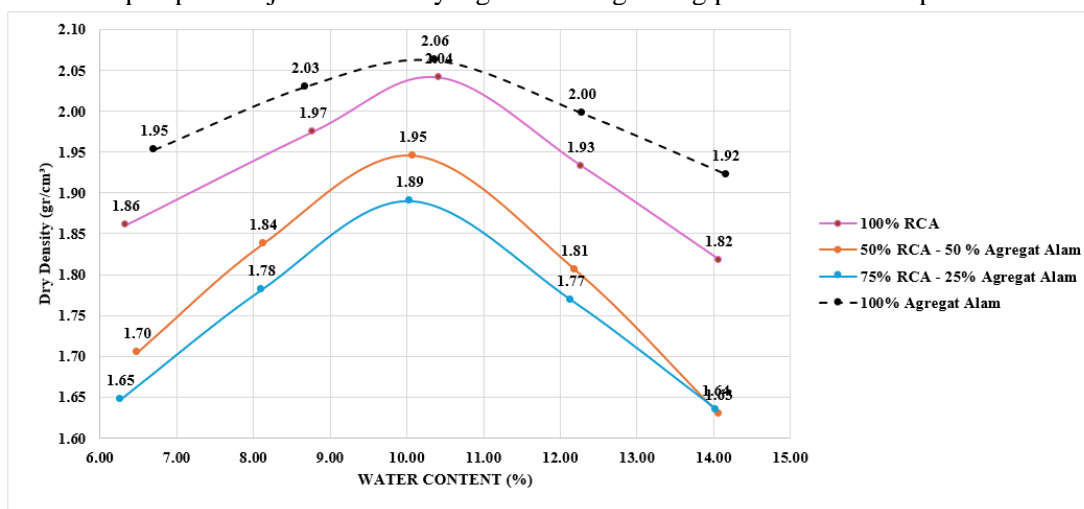
Peneliti membandingkan hasil pengujian proktor 100% RAP, 60% RAP dan 40% Agregat Alam, serta 50% RAP dan 50% Agregat Alam yang dapat dilihat pada Gambar 3 Pada komposisi 60% RAP - 40% Agregat Alam, nilai kepadatan kering maksimum (*Maximum Dry Density*) tertinggi tercapai sebesar  $2.05 \text{ g/cm}^3$ . Hal ini menunjukkan bahwa campuran 60% RAP - 40% Agregat Alam adalah kombinasi terbaik untuk aplikasi yang membutuhkan kepadatan tinggi karena memiliki kemampuan pemadatan terbaik dibandingkan komposisi lainnya.



Gambar 3. Grafik gabungan proktor material RAP. (hasil analisis)

### 3.5. Proktor Material RCA

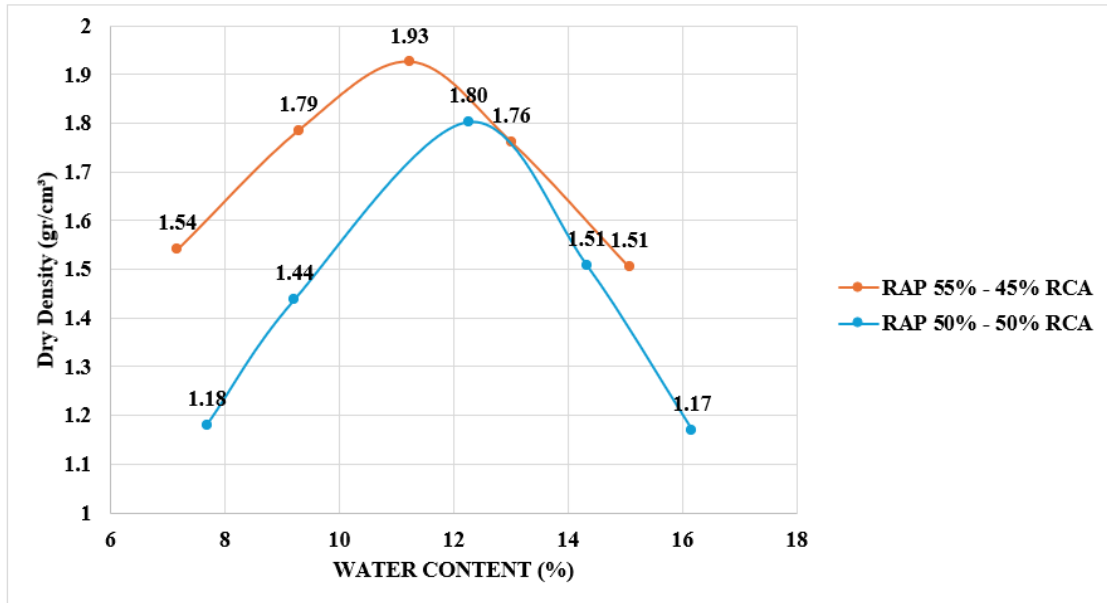
Gambar 4 menunjukkan perbandingan hasil uji Proctor untuk tiga variasi material, yaitu 100% RCA, 75% RCA - 25% Agregat Alam, dan 50% RCA - 50% Agregat Alam, dengan hubungan antara *Water Content* (WC) dan *Dry Density*. Material 100% RCA memiliki kepadatan kering maksimum (MDD) tertinggi sebesar 2.05 g/cm<sup>3</sup>, menunjukkan tingkat pemadatan yang baik, sementara campuran 50% RCA - 50% Agregat Alam memiliki MDD sebesar 1.95 g/cm<sup>3</sup> dan campuran 75% RCA - 25% Agregat Alam memiliki MDD terendah, yaitu 1.90 g/cm<sup>3</sup>. Semua variasi mengikuti pola khas uji Proctor, di mana kepadatan meningkat hingga MDD sebelum menurun akibat kelebihan air yang mengisi pori-pori. Material 100% RCA membutuhkan kadar air lebih tinggi untuk mencapai OMC, sedangkan campuran dengan agregat alam memiliki OMC dan MDD yang lebih rendah. Secara keseluruhan, 100% RCA menunjukkan performa terbaik, tetapi campuran RCA dan agregat alam tetap dapat menjadi alternatif yang efektif tergantung pada kebutuhan aplikasi.



Gambar 4. Grafik gabungan proktor material RCA. (hasil analisis)

### 3.6. Proktor Material RAP dan RCA

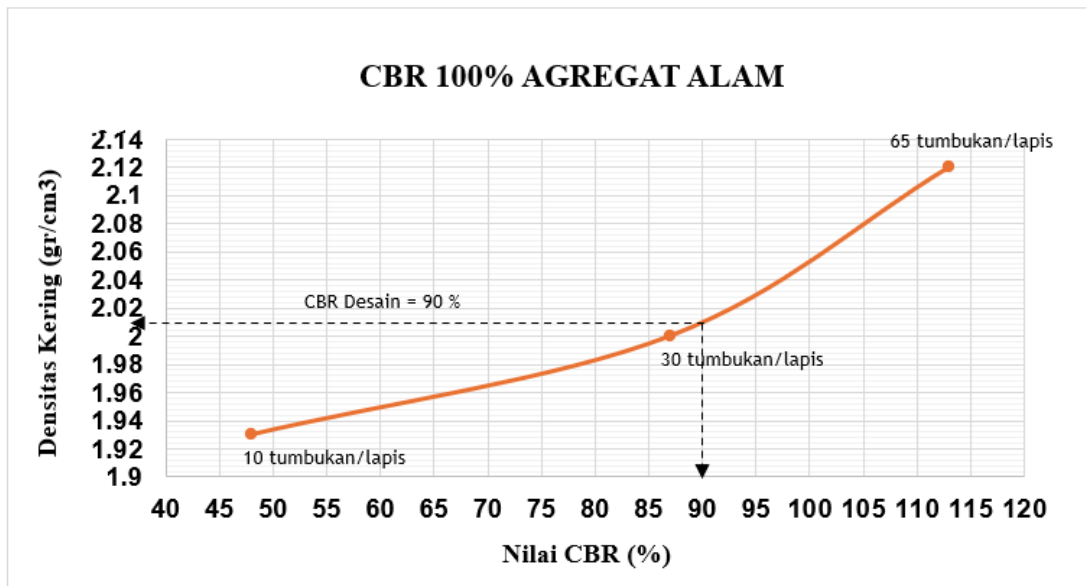
Peneliti membandingkan hasil pengujian proktor 55% RAP dan 45% RCA serta 50% RAP dan 50% RCA. Pada Gambar 5, terlihat bahwa campuran RAP 55% - RCA 45% (garis oranye) memiliki MDD sebesar 1,91 g/cm<sup>3</sup>. Sementara itu, campuran RAP 50% - RCA 50% (garis biru) memiliki MDD yang lebih rendah, yaitu 1,80 g/cm<sup>3</sup>, dengan OMC yang lebih tinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase RCA dalam campuran cenderung menurunkan densitas kering sekaligus meningkatkan kadar air optimum. Hal ini disebabkan oleh sifat RCA yang lebih berpori dibandingkan RAP, sehingga RCA memiliki kemampuan menyerap air yang lebih besar. Campuran dengan kandungan RAP yang lebih tinggi (55% RAP) mampu mencapai tingkat kepadatan yang lebih besar pada kadar air yang lebih rendah, karena RAP memiliki sifat material yang lebih padat dan tidak terlalu berpori seperti RCA.



Gambar 5. Grafik gabungan proktor material RAP dan RCA. (hasil analisis)

**3.7. CBR 100% Agregat Alam**

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 4 nilai CBR meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah tumbukan, dengan nilai CBR tertinggi sebesar 113% pada 65 tumbukan/lapis dan nilai CBR terendah sebesar 48% pada 10 tumbukan/lapis. Nilai CBR desain yang ditentukan adalah 90%, yang dicapai pada 30 tumbukan/lapis dengan densitas kering sebesar 2.01 g/cm<sup>3</sup>, yaitu 95% dari densitas kering maksimum (2.12 g/cm<sup>3</sup>). Hasil pengujian menunjukkan bahwa densitas kering juga meningkat dengan bertambahnya jumlah tumbukan, dari 1.93 g/cm<sup>3</sup> pada 10 tumbukan/lapis menjadi 2.12 g/cm<sup>3</sup> pada 65 tumbukan/lapis. Kadar air optimum untuk material ini adalah 10.37%, sesuai dengan standar pemadatan Modified Proctor (SNI 1742:2008). Nilai CBR desain sebesar 90% telah memenuhi persyaratan minimum untuk lapis fondasi agregat kelas A. Pemadatan yang lebih intensif (dengan jumlah tumbukan lebih tinggi) dapat meningkatkan nilai CBR dan kepadatan kering.



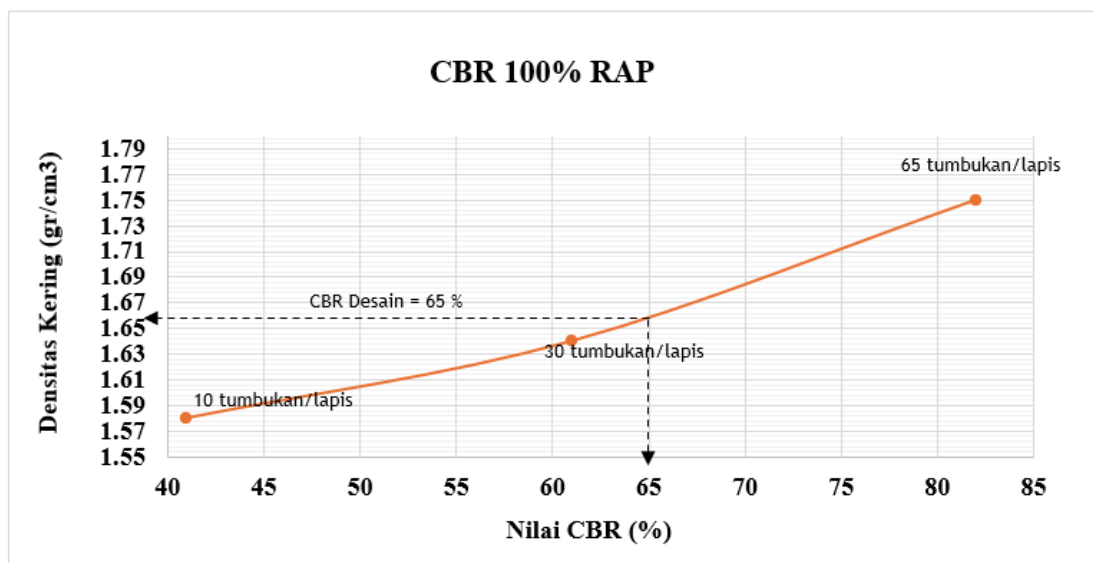
Gambar 6. Grafik CBR 100% agregat alam. (hasil analisis)

Tabel 6. Data keterangan grafik CBR 100% agregat alam

Jumlah Tumbukan	10	30	65
CBR %	48	87	113
Desinitas Kering	1.93	2	2.12
Cara Pemasatan	Modified D (SNI 1742:2008)		
Kadar Air Optimum	10.37	%	
Desinitas Kering Maksimum	2.12	gr/cm <sup>3</sup>	
Desinitas Kering Desain (95%)	2.01	gr/cm <sup>3</sup>	
CBR Desain	90.00	%	

### 3.8. CBR 100% RAP

Dapat dilihat pada Gambar 7 dan Tabel 5 nilai CBR tertinggi sebesar 82% dicapai pada 65 tumbukan/lapis, sedangkan nilai terendah sebesar 41% tercatat pada 10 tumbukan/lapis. Nilai CBR desain yang digunakan adalah 65%, yang tercapai pada 30 tumbukan/lapis dengan densitas kering sebesar 1.66 g/cm<sup>3</sup>, yaitu 95% dari densitas kering maksimum (1.75 g/cm<sup>3</sup>). Densitas kering juga meningkat dengan bertambahnya jumlah tumbukan, dari 1.58 g/cm<sup>3</sup> pada 10 tumbukan/lapis hingga 1.75 g/cm<sup>3</sup> pada 65 tumbukan/lapis. Kadar air optimum untuk material ini adalah 10.56%, sesuai dengan standar pemasatan Modified Proctor (SNI 1742:2008). Jika dibandingkan dengan persyaratan lapis fondasi kelas A, yang memiliki standar nilai CBR minimum sebesar 90%, material 100% RAP dengan nilai CBR desain sebesar 65% tidak memenuhi spesifikasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa material 100% RAP tidak dapat digunakan langsung untuk lapis fondasi kelas A tanpa adanya perbaikan atau stabilisasi material. Oleh karena itu, jika material RAP akan digunakan, diperlukan pencampuran dengan material lain, seperti agregat alam untuk meningkatkan nilai CBR agar sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan.

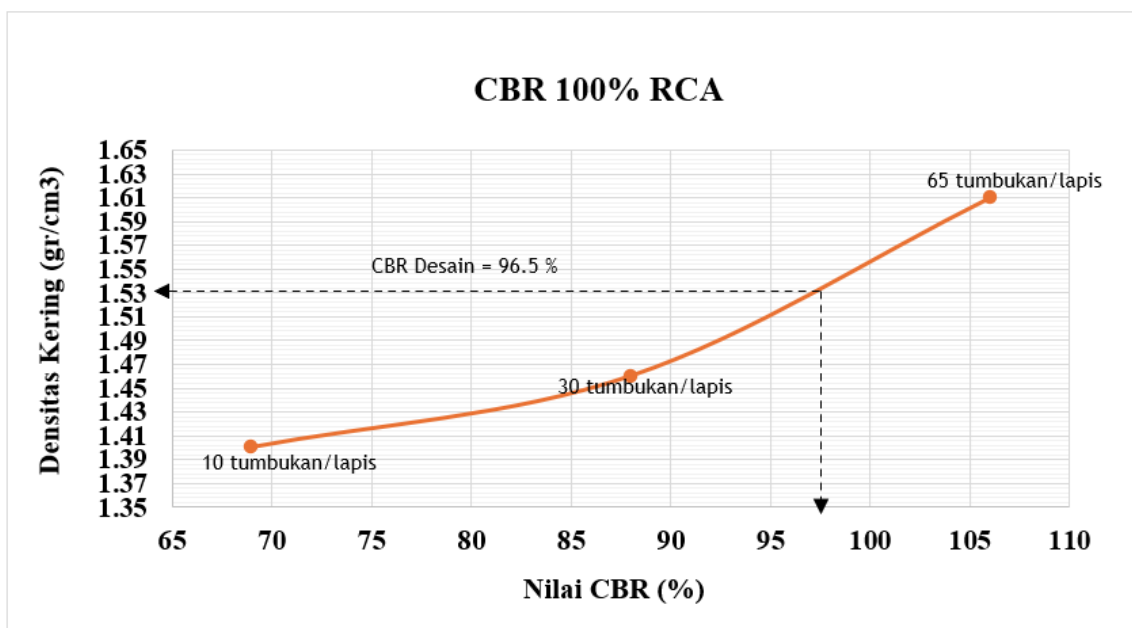


Gambar 7. Grafik CBR 100% RAP. (hasil analisis)

Tabel 7. Data keterangan grafik CBR 100% RAP

Jumlah Tumbukan	10	30	65
CBR %	41	61	82
Desinitas Kering	1.58	1.64	1.75
Cara Pemasatan	Modified D (SNI 1742:2008)		
Kadar Air Optimum	10.56	%	
Desinitas Kering Maksimum	1.75	gr/cm <sup>3</sup>	
Desinitas Kering Desain (95%)	1.66	gr/cm <sup>3</sup>	
CBR Desain	65.00	%	

3.9. CBR 100% RCA



Gambar 8. Grafik CBR 100% RCA. (hasil analisis)

Tabel 8. Data keterangan grafik CBR 100% RCA

Jumlah Tumbukan	10	30	65
CBR %	69	88	106
Desinitas Kering	1.4	1.46	1.61
Cara Pemasakan	Modified D (SNI 1742:2008)		
Kadar Air Optimum	10.42	%	
Desinitas Kering Maksimum	1.61	gr/cm <sup>3</sup>	
Desinitas Kering Desain (95%)	1.53	gr/cm <sup>3</sup>	
CBR Desain	96.5	%	

Gambar 8 dan Tabel 6 menunjukkan hubungan antara jumlah tumbukan per lapis dan nilai CBR (%) untuk material 100% RCA (*Recycled Concrete Aggregate*). Nilai CBR desain ditetapkan sebesar 97.5%, yang dicapai pada 30 tumbukan/lapis dengan densitas kering sebesar 1.53 g/cm<sup>3</sup>, yaitu 95% dari densitas kering maksimum (1.61 g/cm<sup>3</sup>). Bila dibandingkan dengan persyaratan lapis fondasi kelas A dengan standar nilai CBR minimum sebesar 90%, material 100% RCA memenuhi spesifikasi tersebut, baik pada nilai CBR desain (97.5%) maupun nilai CBR maksimum (106%). Hal ini menunjukkan bahwa material RCA memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai lapis fondasi kelas A tanpa memerlukan stabilisasi tambahan. Penggunaannya dapat menjadi alternatif yang berkelanjutan, terutama pada proyek-proyek yang mengutamakan daur ulang material konstruksi.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran RAP dan RCA berpotensi sebagai pengganti agregat alami untuk lapis fondasi agregat kelas A, terutama dalam mendukung keberlanjutan lingkungan. Campuran RCA 100% dengan nilai CBR 97,5% serta campuran RAP 55% dan RCA 45% dengan nilai CBR 87,5% menunjukkan kinerja terbaik, mendekati karakteristik campuran dengan agregat alam. Penggunaan RAP dan RCA mengurangi ketergantungan pada material alami serta memanfaatkan limbah konstruksi secara optimal. Selain itu, material ini memenuhi sebagian besar spesifikasi teknis Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk lapis fondasi agregat kelas A, terutama dalam kombinasi campuran 55% RAP dan 45% RCA, serta 100% RCA. Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan komposisi RAP dan RCA, terutama pengaruh kadar aspal pada RAP terhadap kekuatan mekanis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Saadi, S., & Al-Mufti, R. (2025). Influence of recycled concrete aggregates on the California Bearing Ratio. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 2761–2772. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-023-07955-x>
- Arshad, M., & Ahmed, M. F. (2017). Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 151, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.028>
- Berwal, P., Gupta, N., Kumar, R., Sherif, E., & Kumar, A. (2024). Environmental conservation by using recycled aggregates: Enhancing sustainability in road construction. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 26, 510–524. <https://ros.edu.pl/index.php?id=1426&lang=en>
- Chen, L., & Huang, Y. (2025). Advancing circular economy in road construction: Mechanical properties of RAP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(2), 04022514. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912525000478>
- Dinas Bina Marga dan Penataan Ruang. (2020). *Daur ulang aspal dengan RAP*. <http://dbmtr.jabarprov.go.id/daur-ulang-aspal-dengan-rap/>
- Earth911. (2025). *How to recycle concrete and asphalt*. <https://earth911.com/how-to-recycle/how-to-recycle-concrete-and-asphalt/>
- El-Sayed, M., & Amin, M. (2025). Development and performance evaluation of alternative road construction material using clay and recycled concrete debris. *Scientific Reports*, 15, Article 3627. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-89708-4>
- Fauzan, R. A., & Aulia, D. N. (2022). Studi pemanfaatan RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) terhadap stabilitas Marshall pada campuran aspal. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil V (SENTRA 5)*, 5(1), 223–231.
- Fernandez, R., & Morales, E. (2025). Mechanical and hydraulic properties of recycled concrete aggregate. *Sustainability*, 17(4), 4854. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4854>
- Garg, R., & Kumar, A. (2022). Environmental conservation by using recycled aggregates: Enhancing sustainability in road construction. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 26, 47–56.
- Guthrie, W. S., Cooley, D. A., & Eggett, D. L. (2007). Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials. *Transportation Research Record*, 2007(1), 44–52. <https://doi.org/10.3141/2007-06>
- Kumar, R., & Singh, A. (2025). A systematic review on the role of reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 412, 138574. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397625000255>
- Latjemma, S., Tahir, S., & Haris. (2020). Studi pemanfaatan limbah kulit kerang sebagai agregat kasar pada beton normal. *Siimo Engineering*, 4(1), 29–38. <https://doi.org/10.31934/siimo.v4i1.1109>
- Li, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2025). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 310, 128203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397623000321>
- Marin, A., & Jonathan, C. (2024). *Penggunaan reclaimed asphalt pavement dalam campuran beraspal dengan variasi temperatur pada lapisan aspal beton lapis antara* [Skripsi tidak diterbitkan]. Universitas Kristen Petra.
- Mousa, E., Azam, A., El-Shabrawy, M., & El-Badawy, S. (2016). Laboratory characterization of reclaimed asphalt pavement for road construction in Egypt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(6), 417–425. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0435>
- Nowak, P., & Kowalski, K. (2025). Evaluation of the properties of recycled concrete aggregate. *Civil and Environmental Engineering*, 31(1), 45–58. <https://sciendo.com/2/v2/download/article/10.2478/cee-2025-0013.pdf>
- Osei, K., & Boateng, G. (2025). A review on the incorporation of reclaimed asphalt pavement in road construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 120–135. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2025.2470889>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2020. Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). Jakarta Selatan : Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.

- Singh, S., & Yadav, A. (2024). A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in India. *International Council on Clean Transportation*. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-86-%E2%80%93LCA-HDV-India\\_final2.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-86-%E2%80%93LCA-HDV-India_final2.pdf)
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan lentur jalan raya*. Nova.
- Sukirman, S. (2003). *Beton aspal campuran panas*. Yayasan Obor Indonesia.
- United Nations Environment Programme. (2019). *Emissions gap report 2019*. <https://newclimate.org/sites/default/files/2019/11/EGR2019.pdf>
- Widayanti, A., Asih, R., Soemitro, A., Ekaputri, J. J., & Suprayitno, H. (2019). Gradation analysis of reclaimed asphalt pavement from national road as asphalt concrete layer. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Yang, K.-H., Hong, S.-Y., & Cho, H.-K. (2023). Assessment of mechanical properties of recycled road base materials using RCA and RAP. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02058. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02058>
- Zhao, Y., & Wang, X. (2025). Environmental implications of recycled materials in pavement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103428. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920925000525>
- Zhou, X., Guo, Y., Liu, H., & Wang, R. (2023). Experimental study on the performance of asphalt mixture with different RAP contents and rejuvenators. *Applied Sciences*, 13(1), 362. <https://doi.org/10.3390/app13010362>
- Zulfiqar, S., Akhtar, F., Nasir, H., & Ali, A. (2023). Sustainable performance of asphalt mixtures using waste plastic and recycled materials. *Materials*, 18(4), 854. <https://doi.org/10.3390/ma18040854>