

Durabilitas Campuran Aspal Emulsi Dingin dengan Substitusi Serbuk Karet Ban Bekas sebagai Agregat Halus

I Dewa Made Alit Karyawan^{1*}, Made Mahendra¹, Ida Ayu Oka Suwati Sideman¹, Ratna Yuniarti¹,
Jauhar Fajrin¹

¹Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

dewaalit@unram.ac.id*

| Received: 25/10/2025 |

Revised: 10/11/2025 |

Accepted: 17/11/2025 |

Copyright©2025 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Abstrak

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia berdampak pada bertambahnya limbah ban bekas yang sulit terurai secara alami. Pemanfaatan limbah ini sebagai material konstruksi jalan sejalan dengan konsep reduce, reuse, recycle. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh serbuk karet ban bekas sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik Marshall dan parameter volumetrik campuran aspal emulsi dingin (CAED). Metode penelitian dilakukan dengan lima variasi kadar substitusi (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) yang diuji menggunakan Marshall Test untuk menentukan stabilitas, *flow*, Marshall Quotient (MQ), serta parameter volumetrik (VIM, VMA, VFA). Penambahan karet hasil daur ulang ban bekas memengaruhi perilaku mekanistik campuran aspal. Hasil pengujian menunjukkan tren peningkatan VIM serta penurunan VMA dan VFA, dengan keseimbangan rongga optimal pada kadar 5–10%. Sifat elastomerik partikel karet meningkatkan kemampuan deformasi elastis, sehingga fleksibilitas campuran meningkat hingga kadar 5%. Pada kadar 10%, nilai *flow* menurun yang mengindikasikan peningkatan kekakuan atau stabilitas. Kadar yang lebih tinggi cenderung mengganggu kontinuitas matriks aspal dan menurunkan ikatan antar-agregat sesuai sifat viskoelastiknya. Dengan demikian, kadar 5% memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas, fleksibilitas, dan karakteristik *void*, sekaligus meningkatkan durabilitas campuran beraspal. Pemanfaatan material ini juga memberikan manfaat lingkungan melalui pengurangan limbah padat dan mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di bidang perkerasan jalan. Penelitian lanjutan disarankan mencakup uji ketahanan terhadap air, evaluasi deformasi plastis akibat beban berulang, serta pengujian skala lapangan untuk memverifikasi kinerja dalam kondisi sebenarnya.

Kata kunci: Agregat halus, Aspal emulsi, Durabilitas, Marshall, Serbuk karet

Abstract

The increasing number of motor vehicles in Indonesia has led to a rise in waste tires, which are difficult to decompose naturally. Utilizing this waste as road construction material aligns with the principles of reduce, reuse, and recycle. This study aims to analyze the effect of waste tire crumb rubber as a fine aggregate substitute on the Marshall characteristics and volumetric parameters of Cold Asphalt Emulsion Mixture (CAEM). The experimental method was conducted using five substitution levels (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%), which were tested using the Marshall Test to determine stability, flow, Marshall Quotient (MQ), and volumetric parameters (VIM, VMA, VFA). The addition of recycled rubber from waste tires influences the mechanistic behavior of asphalt mixtures. Test results show a trend of increasing VIM and decreasing VMA and VFA, with the optimal void balance achieved at a rubber content of 5–10%. The elastomeric properties of the rubber particles enhance the elastic deformation capacity, thereby improving the mixture's flexibility up to a 5% content. At 10%, the flow value decreases, indicating greater stiffness or stability. Higher contents tend to disrupt the continuity of the asphalt matrix and weaken the aggregate bonding, consistent with the material's viscoelastic behavior. Therefore, a 5% rubber content provides the best balance between stability, flexibility, and void characteristics, while also improving the durability of the asphalt mixture. The use of this material offers environmental benefits by reducing solid waste and supporting the concept of sustainable development in pavement construction. Further studies are recommended to include water susceptibility tests, evaluations of plastic deformation under repeated loading, and field-scale testing to verify performance under actual service conditions.

Keywords: Crumb rubber, Durability, Emulsion asphalt, Fine aggregate, Marshall

Pendahuluan

Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya. Kondisi ini berdampak langsung pada melonjaknya jumlah limbah ban bekas yang sulit terurai secara alami. Penanganan limbah ban yang selama ini hanya ditumpuk atau dibakar berpotensi menimbulkan pencemaran udara, tanah, dan air. Padahal, ban bekas masih mengandung material karet sintetis dan serbuk karbon yang dapat dimanfaatkan kembali dalam bidang konstruksi, sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan melalui prinsip *reduce, reuse, recycle*.

Dalam bidang perkerasan jalan, pemanfaatan limbah karet ban telah banyak diteliti pada campuran aspal panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa serbuk karet mampu meningkatkan fleksibilitas campuran dan ketahanan terhadap retak (Sarwono et al., 2017), menekan deformasi permanen (Karyawan, Yuniarti, et al., 2024), serta memberikan kontribusi terhadap peningkatan umur layanan perkerasan (Kurniawan et al., 2019). Sementara itu, perhatian terhadap campuran aspal emulsi dingin (CAED) semakin meningkat karena ramah lingkungan, hemat energi, serta dapat diproduksi dan diaplikasikan pada suhu rendah (Kristanto et al., 2018). Namun demikian, kelemahan utama CAED terletak pada sifat mekanisnya yang relatif lebih rendah dibanding campuran aspal panas, terutama pada aspek stabilitas dan durabilitas jangka Panjang (Karyawan, Anshari, et al., 2024).

Durabilitas perkerasan jalan sangat erat kaitannya dengan interaksi antara stabilitas, fleksibilitas, dan karakteristik rongga dalam campuran, seperti *void in mix* (VIM), *void in mineral aggregate* (VMA), dan *void filled with asphalt* (VFA). Nilai *void* yang terlalu rendah dapat menimbulkan bleeding dan deformasi plastis, sedangkan nilai *void* yang terlalu tinggi dapat memicu kerusakan akibat air. Beberapa studi menunjukkan bahwa modifikasi dengan material limbah dapat memengaruhi parameter *void*, meskipun hasil yang diperoleh seringkali bervariasi (Karyawan, Kencanawati, et al., 2023). Selain itu, sebagian besar kajian terkait pemanfaatan serbuk karet ban masih lebih banyak difokuskan pada campuran panas, sementara penerapannya pada CAED relatif jarang dilakukan (Karyawan, Mahendra, et al., 2023).

Meskipun demikian, penelitian yang secara spesifik mengkaji penggunaan serbuk karet ban bekas sebagai *substitusi agregat halus* pada campuran aspal emulsi dingin (CAED) masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya memanfaatkan serbuk karet sebagai bahan aditif atau modifikator aspal, bukan sebagai pengganti agregat halus. Dengan demikian, masih terdapat *research gap* dalam memahami bagaimana peran serbuk karet sebagai komponen agregat dapat memengaruhi karakteristik mekanik dan volumetrik CAED.

Sebagai pembanding, studi oleh (Ulfah, 2023) melaporkan bahwa penggunaan serbuk karet dalam campuran aspal panas dapat meningkatkan elastisitas campuran namun menurunkan stabilitas pada kadar yang tinggi. Akan tetapi, temuan tersebut belum banyak dikonfirmasi dalam konteks sistem emulsi dingin yang memiliki mekanisme pengikatan dan pembentukan struktur campuran yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi kekosongan ilmiah tersebut dengan menganalisis pengaruh substitusi serbuk karet terhadap karakteristik Marshall dan parameter volumetrik campuran aspal emulsi dingin.

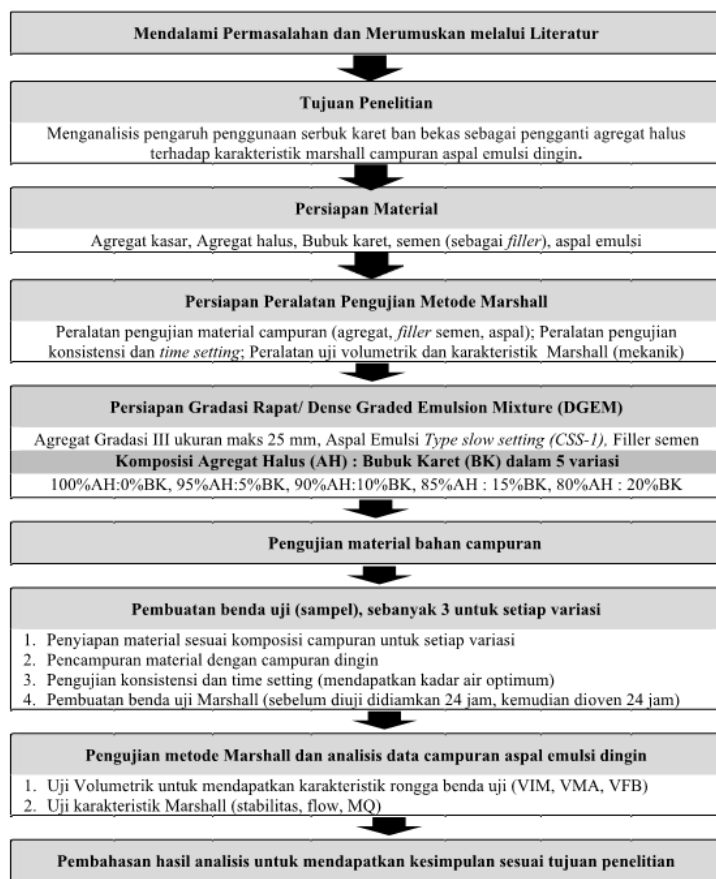
Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh pemanfaatan serbuk karet ban bekas sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik Marshall dan parameter volumetrik campuran aspal emulsi dingin. Kajian difokuskan pada bagaimana variasi kadar serbuk karet dapat memberikan keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, dan parameter *void* sehingga mendukung peningkatan durabilitas campuran.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Transportasi dan Rekayasa Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh pemanfaatan serbuk karet ban bekas sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik Marshall dan parameter volumetrik campuran aspal emulsi dingin (CAED), serta menentukan kadar optimum yang mendukung peningkatan durabilitas campuran.

Tahapan penelitian (Gambar 1) diawali dengan studi literatur untuk merumuskan permasalahan utama. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa campuran aspal emulsi dingin memiliki kelemahan berupa stabilitas yang rendah, rongga udara yang relatif besar, serta ketahanan terhadap beban lalu lintas yang terbatas. Di sisi lain, pemanfaatan serbuk karet ban bekas pada campuran aspal panas terbukti dapat meningkatkan fleksibilitas dan kepadatan campuran. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh

substitusi agregat halus dengan serbuk karet ban bekas terhadap sifat mekanis dan volumetrik campuran aspal emulsi dingin.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian terdiri atas aspal emulsi tipe *slow setting* (CSS-1) yang diproduksi oleh Pertamina sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga (2018), agregat kasar dan halus yang dipilih sesuai gradasi III dengan ukuran maksimum 25 mm mengacu pada SNI 1969:2008, serbuk karet ban bekas yang diperoleh dari proses penghancuran dan penyaringan hingga lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan saringan No. 200 (0,075 mm), serta semen Portland sebagai filler sesuai SNI 15-2049:2004. Peralatan uji yang digunakan meliputi oven, timbangan digital, peralatan uji gradasi, cetakan dan pemadat Marshall, serta alat uji stabilitas dan *flow* Marshall.

Campuran dirancang dengan lima variasi substitusi agregat halus oleh serbuk karet ban bekas, yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat agregat halus. Setiap variasi dibuat tiga benda uji sehingga total sampel berjumlah 15 buah. Proses pembuatan benda uji mengikuti prosedur standar Marshall Test dengan modifikasi pada bahan substitusi. Agregat halus diganti sebagian dengan serbuk karet ban bekas sesuai variasi, kemudian dicampur merata dengan agregat kasar. Aspal emulsi ditambahkan pada suhu ruang, dan seluruh material diaduk hingga homogen. Campuran selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan Marshall dan dipadatkan dengan 50 tumbukan per sisi menggunakan Marshall Hammer. Setelah dicetak, benda uji didiamkan selama

24 jam pada suhu ruang, kemudian dioven pada suhu 60 °C selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

Pengujian laboratorium mencakup dua kelompok pengujian utama, yaitu sifat volumetrik dan karakteristik Marshall. Pengujian volumetrik meliputi penentuan kepadatan campuran (*Bulk Density*), perhitungan *void in mix* (VIM), penentuan *void in mineral aggregate* (VMA) dan *void filled with asphalt* (VFA). Sementara itu, pengujian Marshall dilakukan untuk menentukan stabilitas dan *flow*, serta menghitung Marshall Quotient (MQ) sebagai indikator ketahanan terhadap deformasi.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan kinerja campuran pada setiap variasi terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga (2018). Metode perhitungan parameter volumetrik dan mekanik mengikuti ketentuan dalam SNI 06-2489-1991. Analisis difokuskan pada hubungan antara kadar serbuk karet ban bekas dengan parameter stabilitas, fleksibilitas, serta karakteristik rongga udara dalam campuran. Penentuan kadar optimum dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara nilai stabilitas yang memenuhi persyaratan, *flow* yang menunjukkan fleksibilitas yang memadai, dan parameter volumetrik (VIM, VMA, dan VFA) yang berada dalam batas spesifikasi. Melalui pendekatan ini, diperoleh gambaran mengenai kontribusi serbuk karet ban bekas terhadap peningkatan durabilitas campuran aspal emulsi dingin.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian Material

Agregat kasar, agregat halus, serbuk karet ban bekas, filler semen, serta aspal emulsi CSS-1h diuji sesuai standar. Tabel 1-4 menunjukkan hasil pengujian dimana seluruh material memenuhi syarat teknis sehingga layak digunakan dalam campuran aspal emulsi dingin (CAED). Serbuk karet ban memiliki tekstur elastis dengan ukuran lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan saringan No. 200 (0,075 mm), sehingga sesuai untuk digunakan sebagai substitusi agregat halus.

Tabel 1. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Metode	Hasil	Keterangan
1	Uji Impact Value	< 30%	SNI 03-4426-1997	18,51	Memenuhi
2	Berat Jenis Semu (Gsa)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,86	Memenuhi
3	Berat Jenis Kering (Gsb)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,72	Memenuhi
4	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (Gss)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,77	Memenuhi
5	Penyerapan Air (Sw)	< 3%	SNI 03-1969-2008	1,76	Memenuhi
6	Kelekatan	> 80%	SNI 2439:2011	94%	Memenuhi

*)Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Tabel 2. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Metode	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis Semu (Gsa)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,86	Memenuhi
2	Berat Jenis Kering (Gsb)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,65	Memenuhi
3	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (Gss)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,73	Memenuhi
4	Penyerapan Air (Sw)	< 3%	SNI 03-1969-2008	2,74	Memenuhi

**)Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)*

Tabel 3. Hasil pemeriksaan karakteristik serbuk karet ban bekas

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Metode	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis Semu (Gsa)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,64	Memenuhi
2	Berat Jenis Kering (Gsb)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,56	Memenuhi
3	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (Gss)	> 2,5	SNI 03-1969-2008	2,59	Memenuhi
4	Penyerapan Air (Sw)	< 3%	SNI 03-1969-2008	1,23	Memenuhi

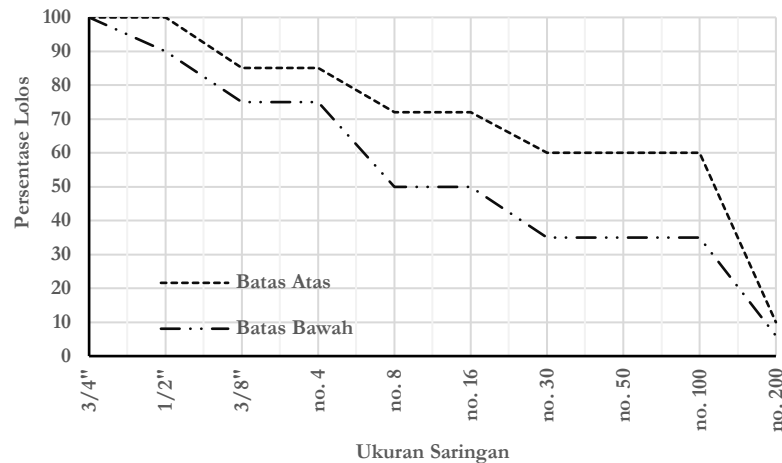
**)Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)*

Hasil pengujian karakteristik *filler* menunjukkan bahwa berat jenis abu batu yang digunakan adalah **2,52**, dengan metode pengujian mengacu pada **SNI 03-4145-1996**. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan standar, yaitu lebih besar dari **2,50**, sehingga abu batu dinyatakan layak digunakan sebagai bahan pengisi pada campuran beraspal. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Yacob & Wesli, 2018) yang melaporkan bahwa abu batu dengan berat jenis di atas 2,5 memenuhi kriteria sebagai *filler* yang sesuai dalam campuran aspal beton.

Tabel 4. Hasil pemeriksaan karakteristik aspal emulsi

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Metode	Hasil	Satuan	Keterangan
1	Kadar Residu**	>57	SNI 03-6829-2002	63,3	%	Memenuhi
2	Berat Jenis Aspal**	>1	SNI 2411:2011	1,05	-	Memenuhi
3	Muatan Partikel Listrik ***	Positif	SNI 03-3644-1994	Positif	-	Memenuhi
4	Pengendapan Per 24 Jam***	<1	SNI 6828-2001	0,81	%	Memenuhi
5	Viskositas***	20–100	SNI 06-6721-2002	85	detik	Memenuhi
6	Analisa Saringan***	-	SNI 3643-2012	0,09	%	Memenuhi
7	Kelarutan dalam Trichloro-ethylene***	>1	SNI 2438-2015	1,02	%	Memenuhi

)Spesifikasi Umum Bina Marga (2025); **)Hasil Pengujian ; *)PT Asphalt Karya Nusantara, 2024*



Gambar 2. Gradasi Agregat

Penentuan Kadar Aspal Residu Optimum

Penentuan kadar aspal residu optimum (KARO) dilakukan melalui serangkaian uji Marshall pada beberapa variasi kadar aspal (Tabel 5). Berdasarkan analisis, diperoleh nilai KARO sebesar $(13,75 \% + 14,25 \%) / 2 = 14,00 \%$ yang digunakan sebagai dasar perencanaan campuran. Dengan demikian, kadar 14,00 % diharapkan memberikan keseimbangan yang baik antara stabilitas, fleksibilitas, dan rongga dalam campuran.

Tabel 5. Penentuan KARO berdasarkan karakteristik Marshall

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal %					Spesifikasi
	12,75	13,25	13,75	14,25	14,75	
VIM	1,72	2,42	3,93	4,34	4,65	min. 3
						max. 5
VMA	36,33	35,87	37,32	38,05	38,71	min. 17
VFA	95,16	93,32	89,55	88,66	87,99	min. 68
Marshall	488,81	686,47	817,47	89,86	703,44	min. 600
MQ	201,69	275,16	345,68	334,68	237,81	min. 250
Flow	2,43	2,50	2,37	2,67	3,00	-
KAE	12,05	12,55	13,06	13,56	14,07	min. 5,9

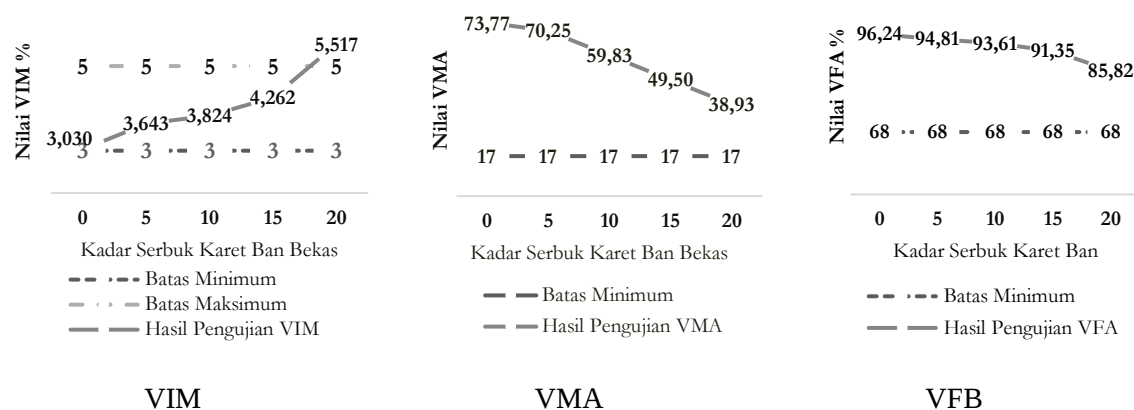
14,00%

Hasil Pengujian Marshall dan Volumetrik

Campuran diuji dengan variasi substitusi serbuk karet ban sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat agregat halus. Hasil uji volumetrik (Gambar 3) menunjukkan tren peningkatan VIM seiring dengan bertambahnya kadar karet. Variasi 0–15% masih dalam rentang spesifikasi (3–5%), sedangkan pada kadar 20% VIM melebihi batas maksimum (5,52%), yang menandakan rongga berlebih dan potensi kerentanan terhadap moisture damage (Wulandari &

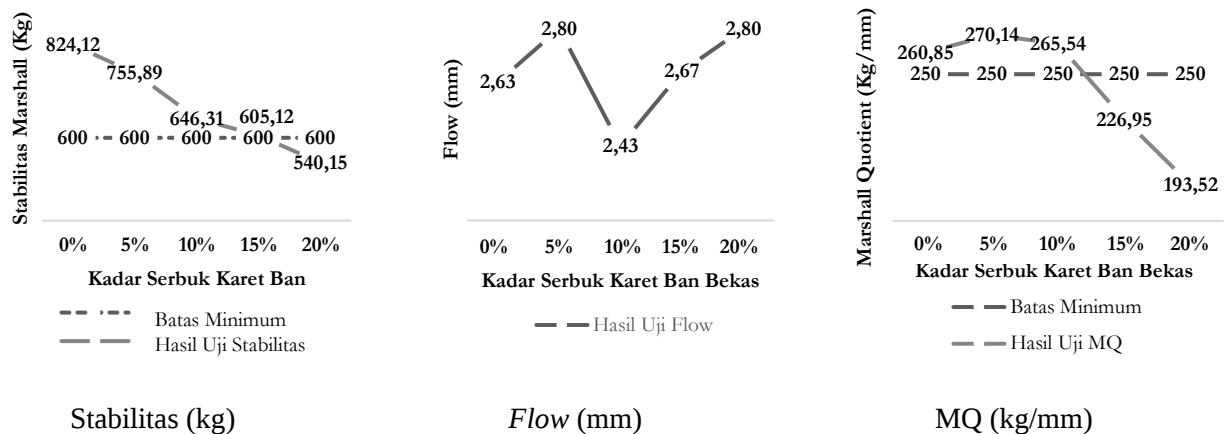
Tjandra, 2017). Nilai VMA menurun seiring penambahan karet, namun tetap di atas batas minimum ($\geq 17\%$). Nilai VFA juga mengalami penurunan bertahap tetapi masih sesuai standar.

Penambahan serbuk karet ban bekas pada campuran beraspal menyebabkan nilai VMA (*Void in Mineral Aggregate*) mengalami penurunan, meskipun masih berada di atas batas minimum spesifikasi ($\geq 17\%$). Penurunan ini menunjukkan bahwa partikel karet yang berukuran halus mampu mengisi rongga antar agregat sehingga meningkatkan kepadatan campuran tanpa mengurangi stabilitas secara signifikan. Nilai VFA (*Voids Filled with Asphalt*) juga menurun secara bertahap, yang mengindikasikan berkurangnya volume rongga yang terisi aspal akibat sebagian aspal terserap oleh partikel karet. Kondisi ini berdampak pada peningkatan elastisitas dan kemampuan deformasi plastis campuran, sehingga lebih tahan terhadap retak akibat beban berulang (*fatigue cracking*) dan perubahan suhu. Senada dengan beberapa riset sebelumnya menyatakan bahwa penambahan *crumb rubber* dapat meningkatkan fleksibilitas campuran dan menurunkan nilai VMA serta VFA sehingga menghasilkan struktur yang lebih rapat dan lentur (Rochaeti et al., 2018)(Ulfah, 2023)(Wulandari & Tjandra, 2017).



Gambar 3. Karakteristik Volumetric CAED berdasarkan Kadar Serbuk Karet Ban Bekas

Secara mekanis, peningkatan kadar serbuk karet dalam campuran aspal cenderung menurunkan nilai stabilitas Marshall secara signifikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan kadar karet hingga 10% masih memenuhi kriteria stabilitas untuk perkerasan lalu lintas berat, sedangkan pada kadar 15% dan 20% terjadi penurunan stabilitas yang melampaui batas minimum spesifikasi, sehingga tidak direkomendasikan untuk digunakan pada lalu lintas berat. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya elastisitas campuran akibat sifat lentur karet yang mengurangi kekakuan struktural agregat.



Gambar 4. Karakteristik Mekanis CAED berdasarkan Kadar Serbuk Karet Ban Bekas

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase karet, maka nilai stabilitas Marshall dan *Marshall Quotient* cenderung menurun akibat berkurangnya kekuatan ikatan antara agregat dan aspal (Rosyad et al., 2019)(Ulfah, 2023)(Rahmawati & Widhiastuti, 2023). Nilai *flow* cenderung meningkat, menunjukkan fleksibilitas campuran lebih baik, sedangkan nilai Marshall Quotient (MQ) hanya sesuai spesifikasi pada kadar 0–10% dan menurun signifikan pada kadar lebih tinggi.

Durabilitas CAED dengan Serbuk Karet Ban Bekas sebagai Agregat Halus

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk karet ban bekas (*crumb rubber*) berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanis dan parameter rongga (*voids*) pada campuran beraspal. Peningkatan kadar karet cenderung meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan peredaman (reduksi kerapuhan), sehingga berkontribusi pada ketahanan terhadap retak (FaritzieHijriah et al., 2021); namun pada kadar yang terlalu tinggi terjadi penurunan stabilitas Marshall. Analisis volumetrik menunjukkan keseimbangan terbaik antara stabilitas dan rongga tercapai pada kisaran kadar karet 5–10%, di mana nilai rongga tetap memenuhi persyaratan spesifikasi dan potensi kerusakan akibat kelembapan/air berkurang. Pernyataan ini konsisten dengan temuan Ulfah (2023) mengenai efek positif *crumb rubber* pada fleksibilitas dan sensitivitas kelembapan, serta penurunan stabilitas pada kadar tinggi (Ulfah, 2023).

Secara mekanistik, interaksi antara partikel karet dan matriks aspal berperan penting dalam menentukan perilaku campuran. Partikel karet yang bersifat elastomerik dapat menyerap sebagian energi tegangan saat beban diterapkan, kemudian melepaskannya kembali tanpa menyebabkan retak permanen pada matriks aspal. Peningkatan kadar serbuk karet hingga 5% mampu memperbesar kemampuan deformasi elastis campuran, sehingga campuran menjadi lebih lentur. Nilai *flow* yang tertinggi pada kadar tersebut menunjukkan bahwa fleksibilitas campuran berada pada kondisi paling baik. Sebaliknya, penambahan karet hingga 10% menyebabkan penurunan nilai *flow*, yang menandakan peningkatan kekakuan atau stabilitas campuran. Pada kadar karet yang lebih tinggi, keberadaan partikel elastomerik dapat mengganggu kontinuitas matriks aspal, melemahkan ikatan antar-agregat, dan menurunkan kestabilan sesuai dengan sifat viskoelastik material. Fenomena ini sejalan dengan model perilaku viskoelastik pada campuran beraspal, di mana penambahan material elastomerik berlebih dapat menggeser keseimbangan antara modulus elastisitas dan viskositas, mengurangi ketahanan terhadap deformasi plastis di

bawah beban berulang (Huang et al., 2023). Dengan demikian, pemanfaatan serbuk karet ban bekas sebagai substitusi agregat halus pada kadar 5% dapat memberikan keseimbangan optimal antara stabilitas, fleksibilitas, dan karakteristik *void*. Kombinasi ini berkontribusi pada peningkatan durabilitas CAED, sehingga pemanfaatan limbah ban bekas berpotensi menjadi solusi ramah lingkungan sekaligus memperbaiki kinerja campuran beraspal.

Kesimpulan

Pemanfaatan serbuk karet ban bekas sebagai substitusi agregat halus pada campuran aspal emulsi dingin memengaruhi sifat mekanis dan parameter rongga campuran. Penambahan serbuk karet cenderung menurunkan stabilitas tetapi meningkatkan fleksibilitas, di mana kadar 0–10% masih memenuhi spesifikasi Marshall untuk lalu lintas berat. Nilai VIM meningkat seiring dengan kadar serbuk karet, sementara VMA menurun namun tetap di atas batas minimum, dan VFA menurun perlahan tetapi masih sesuai spesifikasi. Kombinasi karakteristik tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk karet pada kadar 5–10% dapat memberikan keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, dan parameter *void* sehingga berkontribusi terhadap peningkatan durabilitas campuran aspal emulsi dingin.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar karet mampu meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan deformasi elastis campuran hingga kadar 5%, yang ditunjukkan peningkatan nilai *flow*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut campuran memiliki keseimbangan optimal antara fleksibilitas dan stabilitas. Namun, pada kadar karet di atas 5%, kontinuitas matriks aspal mulai terganggu, menyebabkan penurunan stabilitas Marshall dan potensi melemahnya ikatan antar-agregat. Secara umum, kadar serbuk karet sebesar 5% dinilai paling optimal karena mampu menjaga keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, dan karakteristik *void*, sekaligus meningkatkan durabilitas campuran beraspal. Pemanfaatan limbah ban bekas sebagai bahan substitusi dalam campuran aspal emulsi dingin memberikan nilai tambah dari aspek lingkungan, karena dapat mengurangi limbah padat dan mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di bidang perkerasan jalan. Untuk memastikan validitas dan kinerja campuran secara menyeluruh, disarankan dilakukan penelitian lanjutan yang mencakup uji ketahanan terhadap air, evaluasi deformasi plastis di bawah beban berulang, serta pengujian skala lapangan guna memverifikasi kinerja campuran dalam kondisi operasional sebenarnya.

Acknowledgment

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Mataram melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM Unram) atas dukungan pendanaan penelitian melalui skema Penelitian Pascasarjana Tahun 2025 yang bersumber dari dana PNBP Universitas Mataram. Penghargaan dan apresiasi juga disampaikan kepada mahasiswa anggota tim peneliti yang telah membantu dalam proses pengumpulan data (uji laboratorium), serta kompilasi data.

Daftar Pustaka

FaritzieHijriah, H. Al, Umari, Z. F., & Panjaitan, R. (2021). Analisis Kadar Optimum Serbuk Karet Ban Dalam Bekas Pada Campuran Aspal. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 11(1), 29.
<https://doi.org/10.24127/tp.v11i1.1784>

- Huang, Z., Lu, R., Fu, Z., Li, J., Li, P., Wang, D., Wei, B., Zhu, W., Wang, Z., & Wang, X. (2023). Investigation of Viscoelastic Properties of Polymer-Modified Asphalt at Low Temperature Based on Gray Relational Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086858>
- Karyawan, I. D. M. A., Anshari, B., Rahmatin, I. P., Sideman, I. A. O. S., & Mahendra, M. (2024). Performance of Modified Buton Asphalt with Marine Fuel Oil in Asphalt Pavement Mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, 924, 153–162.
- Karyawan, I. D. M. A., Kencanawati, N. N., Hariyadi, H., Hasyim, H., & Rohani, R. (2023). Karakteristik Aspal Buton Ekstraksi yang Dimodifikasi dengan Oli Bekas dan Plastik HDPE. *Rekonstruksi Tadulako: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 4(2), 79–86. <https://doi.org/10.22487/renstra.v4i2.596>
- Karyawan, I. D. M. A., Mahendra, M., BuanAnshari, & Setiawan, E. (2023). Konsistensi dan Setting Time Bubur Aspal Emulsi Menggunakan Filler Fly Ash dan Mastic Asbuton. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 176–188.
- Karyawan, I. D. M. A., Yuniarti, R., Widianty, D., Salsabila, F. F., Furwati, B. S., & Santi, B. A. L. (2024). Analysis of Volumetric Characteristics of Cold Emulsion Asphalt Mixtures on Closed and Open Gradation with Cement and Lime Filler Variations. 10(12), 10366–10375. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i12.9745>
- Kristanto, I., Wulandari, P. S., & Patmadjaja, H. (2018). Pengaruh Serbuk ban Bekas Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Aspal Emulsi Dingin Dengan Filler Fly Ash Tipe-C untuk Gradasi DGEM dan OGEM. *Dimens Pratama Teknik Sipil*, 7(2), 113–120.
- Kurniawan, S., Sunarjono, S., Riyanto, A., & Hernaeni, S. R. (2019). *Durabilitas campuran aspal emulsi dingin dan hangat*. 260–266.
- Rahmawati, A. N., & Widhiastuti, Y. (2023). Pengaruh Penambahan Serbuk Limbah Ban Bekas Kendaraan terhadap Karakteristik Laston Ac-Bc dengan Metode Uji Marshall. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7, 3974–3993. <https://jptam.org/index.php/jptam/article/view/5877>
- Rochaeti, Utami, R., & Febrianty, L. (2018). Karakteristik Marshall Campuran Asphalt Concrete Wearing Course dengan Modifikasi Karet Alam Padat SIR 20. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 615–623. <https://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/view/1486%0Ahttps://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/download/1486/1246>
- Rosyad, F., Prastyo, N., & Kasmuri, M. (2019). Analisis Pengaruh Penambahan Limbah Karet Terhadap Durabilitas Dan Flexibilitas Aspal Beton (Ac-Wc). *Forum Mekanika*, 7(2). <https://doi.org/10.33322/forummekanika.v7i2.202>
- Sarwono, D., Pungky Pramesti, F., & Nugroho, F. M. (2017). Studi Karakteristik Campuran Asphalt Concrete Wearing Course Dengan Asbuton Emulsi Sebagai Bahan Pengikat. *E-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL*, 1349.
- Ulfah, L. (2023). Pengaruh Karet Remah Terhadap Stabilitas Campuran Beraspal Laston AC-

- WC Menggunakan Metode Dry Mix. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12(1), 9–18. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v12i1.207>
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering*, 171, 1877–7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.451>
- Yacob, M., & Wesli, W. (2018). Pengaruh Kadar Filler Abu Batu Kapur Dan Abu Tempurung Kelapa Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Aspal Beton Ac-Bc. *Teras Jurnal*, 7(1), 213. <https://doi.org/10.29103/tj.v7i1.127>