

PEMANFAATAN SERBUK KARET BAN BEKAS SEBAGAI BAHAN TAMBAH PADA CAMPURAN *ASPHALT CONCRETE – WEARING COURSE* (AC–WC) UNTUK MENINGKATKAN KARAKTERISTIK *MARSHALL*

Salsabila Melyan¹, Lusi Dwi Putri², Hendri Rahmat³

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: salsabilamelyan8@gmail.com , lusidwiputri@unilak.ac.id , hendrirahmat@unilak.ac.id

ABSTRAK

Pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia memerlukan aspal dalam jumlah besar, namun ketergantungan terhadap impor masih tinggi. Di sisi lain, limbah ban bekas yang sulit terurai menimbulkan permasalahan lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan serbuk karet ban bekas dengan variasi kadar 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1% dari berat aspal terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC, serta memberikan klarifikasi terhadap penelitian Indriani dkk. (2022). Metode penelitian meliputi pengujian propertis agregat, aspal, dan serbuk karet ban bekas, penentuan kadar aspal optimum (KAO), pembuatan benda uji dengan variasi kadar serbuk karet, pengujian Marshall, dan analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah. Hasil penelitian menunjukkan KAO sebesar 5,39% dengan kadar optimal serbuk karet 0,9% yang menghasilkan karakteristik Marshall berupa density 2,37 gr/cm³, VMA 16,59%, VFWA 77,21%, VITM 3,88%, stabilitas 3951,46 kg (meningkat 20,5% dibanding kontrol), flow 3,80 mm, dan MQ 1072,47 kg/mm. Uji ANOVA menunjukkan variasi kadar serbuk karet tidak berpengaruh signifikan secara statistik ($F_{hitung} < F_{tabel} = 3,26$). Kadar 1% dan 1,1% tidak memenuhi persyaratan VITM. Penelitian ini melengkapi kajian yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya, dan menjadi referensi tambahan yang memperkaya pemahaman sekaligus mendorong penerapan analisis statistik yang lebih komprehensif.

Kata Kunci: AC-WC, ANOVA, Karakteristik *Marshall*, Serbuk Karet Ban Bekas

ABSTRACT

Road infrastructure development in Indonesia requires a large amount of asphalt; however, dependence on imports remains high. On the other hand, waste tire rubber that is difficult to decompose causes environmental problems. This study aims to analyze the effect of adding waste tire rubber powder with variations of 0.8%, 0.9%, 1%, and 1.1% of asphalt weight on the Marshall characteristics of the AC-WC mixture, and to provide clarification on the research by Indriani et al. (2022). The research methods include testing the properties of aggregates, asphalt, and waste tire rubber powder; determining the optimum asphalt content (OAC); preparing test specimens with rubber powder variations; Marshall testing; and statistical analysis using one-way ANOVA. The results show an OAC of 5.39% with an optimal rubber powder content of 0.9%, which produces Marshall characteristics of density 2.37 gr/cm³, VMA 16.59%, VFWA 77.21%, VITM 3.88%, stability 3951.46 kg (an increase of 20.5% compared to the control), flow 3.80 mm, and MQ 1072.47 kg/mm. The ANOVA test shows that variations in rubber powder content had no statistically significant effect ($F_{calculated} < F_{table} = 3.26$). Rubber contents of 1% and 1.1% did not meet the VITM requirement. This study clarifies that the inability of previous research to draw conclusions is reasonable due to limitations in statistical analysis and specification-standard testing.

Keywords: AC-WC, ANOVA, Marshall Characteristics, Waste Tire Rubber Powder

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu prioritas utama dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan konektivitas antar wilayah di Indonesia. Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) menjadi lapisan perkerasan yang paling umum digunakan karena fungsinya sebagai lapis aus yang bersentuhan langsung dengan beban lalu lintas. Dalam pembuatan campuran AC-WC, aspal penetrasi

60/70 sering menjadi pilihan utama karena karakteristiknya yang sesuai dengan iklim tropis Indonesia. Kadar Aspal Memberi Pengaruh Besar Bagi Pelayanan Lapis Perkerasan Jalan (Putri dkk., 2016).

Pada lima tahun terakhir (2015-2020), pembangunan jalan nasional mencapai 4.119 km. Pembangunan infrastruktur jalan tersebut membutuhkan aspal rata-rata 1,2 juta ton per tahun. Namun suplai aspal lokal masih sangat rendah

sehingga Indonesia masih bergantung pada impor. Dari kebutuhan 1,2 juta ton per tahun, hanya 600.000 ton yang dapat disuplai oleh Pertamina, sedangkan sisanya diimpor dari China, Korea Selatan, Singapura, dan Timur Tengah, sehingga Indonesia tercatat sebagai pengimpor aspal peringkat 10 di dunia (Pratama dkk., 2022)

Di sisi lain, permasalahan limbah ban bekas kendaraan semakin mengkhawatirkan. Indonesia menghasilkan jutaan ban bekas setiap tahunnya yang sulit terurai secara alami dan sering berakhir di tempat pembuangan akhir atau dibakar secara ilegal, menimbulkan polusi udara. Pemanfaatan kembali (recycle) ban bekas menjadi serbuk karet merupakan solusi yang tepat untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus memberikan nilai tambah ekonomis. Menurut Gunawan dkk., (2022), bahan tambahan yang tepat dapat meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap lendutan berlebihan dan memperpanjang umur layanan.

Karakteristik Marshall merupakan parameter penting dalam menilai kualitas campuran aspal yang meliputi stabilitas, flow, Void In Mix (VIM), Void In Mineral Aggregate (VMA), Void Filled With Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ). Peningkatan karakteristik Marshall melalui penambahan serbuk karet ban bekas diharapkan dapat menghasilkan campuran aspal AC-WC yang berkualitas tinggi dengan biaya yang lebih ekonomis (Sa'dillah dan Leliana, 2020).

Penelitian ini merujuk pada studi (Indriani dkk., 2022) dengan memanfaatkan variasi kadar serbuk karet ban bekas yang identik, yaitu 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1% dari total berat aspal. Pemilihan variasi kadar yang serupa didasarkan pada temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh masih memerlukan kajian lebih mendalam untuk memperoleh kesimpulan yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini hadir sebagai upaya untuk memperkuat dan melengkapi temuan yang telah ada sebelumnya. Menurut Rai dkk. (2017), penambahan serbuk ban bekas dengan kadar 5%, 10%, dan 15% menunjukkan bahwa komposisi 10% memberikan nilai Marshall Quotient terbaik. Sementara itu, menurut Gunawan dkk. (2022), penggunaan limbah ban karet dengan kadar 10%, 20%, dan 30% menghasilkan kadar 10% sebagai campuran terbaik dengan stabilitas yang meningkat.

Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penambahan serbuk karet ban bekas dengan kadar 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1% dari berat aspal terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi kadar tersebut terhadap karakteristik Marshall, serta memberikan kesimpulan yang lebih jelas dibandingkan penelitian Indriani dkk., (2022) melalui analisis statistik ANOVA satu arah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan serbuk karet ban bekas sebagai bahan tambah pada campuran AC-WC dengan variasi kadar spesifik (0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1%) yang belum dikaji secara komprehensif sebelumnya, sekaligus mengintegrasikan pendekatan statistik ANOVA satu arah untuk memvalidasi signifikansi pengaruhnya terhadap karakteristik Marshall.

Tinjauan Pustaka

Lapis aspal beton merupakan lapisan penutup pada konstruksi perkerasan jalan yang terbuat dari campuran agregat bergradasi dan aspal keras, diproses melalui pencampuran, penghamparan, dan pemadatan pada suhu tinggi Terdapat tiga jenis lapisan aspal beton campuran panas (Laston), yaitu AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course) sebagai lapis aus dengan tebal minimum 4 cm, AC-BC (Binder Course) sebagai lapis pengikat dengan tebal minimum 5 cm, dan AC-Base sebagai lapis pondasi dengan tebal minimum 6 cm. Penelitian ini berfokus pada AC-WC karena merupakan lapisan paling atas yang kontak langsung dengan beban lalu lintas dan tuntutan cuaca.

Agregat sebagai komponen utama perkerasan harus memenuhi proporsi 90%–95% dari berat total atau 75%–85% dari volume campuran. Jenis dan gradasi agregat sangat memengaruhi stabilitas perkerasan (Sa'dillah dan Leliana, 2020). Ketentuan agregat kasar mencakup keausan Los Angeles maksimum 40%, butir pecah minimum 95/90, dan partikel pipih-lonjong maksimum 10%. Sementara itu, agregat halus harus memiliki sand equivalent minimum 50% dan berat jenis minimum 2,50. Filler umumnya menggunakan abu batu dengan persentase 6% dari berat total agregat.

Aspal PEN 60/70 digunakan sebagai bahan pengikat karena karakteristiknya yang cocok untuk iklim tropis dengan nilai penetrasi 60–70 pada suhu 25°C, titik lembek 48–58°C, dan berat jenis 0,95–1,05. Aspal berfungsi sebagai perekat antarbutir agregat yang menjamin campuran kedap air dan tahan terhadap deformasi. Pengujian Marshall menjadi metode standar yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan, stabilitas, dan kepadatan campuran aspal. Prosedur pengujian Marshall di Indonesia mengacu pada SNI 06-2489-1991.

Karet ban bekas memiliki kandungan sulfur, zinc, dan kalsium yang berperan sebagai agen penguat ikatan. Sulfur membantu proses vulkanisasi, zinc mempercepat reaksi cross-linking, dan kalsium meningkatkan adhesi antara aspal dengan agregat. Oleh karena itu, penambahan serbuk karet ban bekas sebagai bahan tambah (modifier) berpotensi memperbaiki kinerja campuran aspal AC-WC (Pratama dkk., 2022). Studi terdahulu tentang penambahan filler alternatif — seperti abu batubara

(Abdullah dkk., 2017) dan abu tandan kosong kelapa sawit — juga menunjukkan potensi bahan tambah lokal dalam memodifikasi karakteristik aspal.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya Program Studi Teknik Sipil Universitas Lancang Kuning. Pengujian meliputi propertis agregat, propertis aspal, kadar serbuk karet ban bekas, perendaman sampel 24 jam, serta penentuan kadar aspal optimum (KAO). Analisis kandungan unsur serbuk karet ban bekas dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Dasar Universitas Riau menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF).

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan meliputi agregat dari PT. Riau Mas Bersaudara, aspal PEN 60/70 dari PT. Hakaaston AMP Muara Fajar, dan serbuk karet ban bekas yang dikumpulkan dari bengkel tambal ban, bengkel kendaraan, dan dealer ban. Ban bekas dibersihkan, dikeringkan 2–3 hari, dihancurkan dengan blender hingga menjadi serbuk halus, kemudian disimpan dalam kantong plastik tertutup agar tidak terkontaminasi kelembaban.

Peralatan utama meliputi alat Marshall lengkap dengan proving ring berkapasitas 22,2 kN (5000 lbf) dan pengukur flow, mesin Los Angeles, seperangkat saringan standar, piknometer, oven, waterbath, timbangan, thermometer, beaker glass, dan alat uji penetrasi serta titik lembek aspal.

Tahapan Pengujian

Pengujian propertis agregat kasar dan halus mencakup berat jenis (SNI 1969:2016 dan SNI 1970:2016), analisa saringan (ASTM C117:2012), keausan Los Angeles (SNI 2417:2008), serta sand equivalent. Propertis aspal diuji melalui penetrasi (SNI 2432:2011), titik lembek (SNI 06-2434:2011), dan berat jenis. Kandungan unsur serbuk karet dianalisis dengan metode XRF untuk memastikan karakteristik bahan tambah sesuai kebutuhan modifikasi aspal. Serbuk karet yang digunakan telah melalui proses pengayakan sehingga lolos saringan No. 40 (0,425 mm), sebagaimana yang diterapkan pada penelitian Indriani dkk. (2022).

Tahapan pencampuran serbuk karet dilakukan pada saat aspal telah dipanaskan hingga mencapai suhu pencampuran, kemudian serbuk karet ditambahkan ke dalam aspal panas dan diaduk secara merata sebelum dicampurkan dengan agregat. Proses pencampuran ini mengacu pada prosedur yang sama dengan penelitian Indriani dkk. (2022), di mana serbuk karet dicampurkan langsung ke dalam aspal sebagai bahan tambah (modifier) sebelum proses pencampuran dengan agregat dilakukan.

Proses pemadatan benda uji dilakukan sebanyak 75 tumbukan per sisi sesuai spesifikasi Marshall untuk lalu lintas berat. Suhu pemadatan dijaga pada rentang 140°C–150°C sesuai viskositas aspal yang digunakan. Setelah proses pemadatan selesai, benda uji dikondisikan (conditioning) selama 24 jam pada suhu ruang sebelum dilakukan pengujian Marshall.

Perencanaan Campuran

Perhitungan kadar aspal optimum (KAO) secara teoritis menggunakan rumus sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 (Machsus dkk., 2020):

$$Pb = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\%FF) + K \quad (1)$$

Keterangan: Pb = kadar aspal (%); CA = agregat kasar lolos saringan no.4 tertahan no.8; FA = agregat halus lolos saringan no.8 tertahan no.200; FF = agregat halus lolos saringan no.200; K = konstanta (laston = 1).

Setelah KAO teoritis diperoleh, dibuat 15 benda uji variasi kadar aspal Pb–1, Pb–0,5, Pb, Pb+0,5, dan Pb+1 (tiga benda uji per variasi sesuai konsep triplo). Setiap benda uji berisi 1200 gram agregat dengan dimensi diameter 10 cm dan tinggi 7,5 cm. Setelah KAO laboratorium ditetapkan, dibuat 15 benda uji variasi kadar serbuk karet (0%, 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1%) pada suhu pemadatan 135°C dan perendaman 60°C selama 24 jam

Parameter Marshall

Parameter Marshall yang dihitung meliputi density (g), VMA, VFWA, VITM, stabilitas (q), flow (r), dan MQ berdasarkan persamaan berikut:

$$g = c / f \quad (2)$$

$$VMA = 100 - j \quad (3)$$

$$VFWA = 100 \times i / VMA \quad (\%) \quad (4)$$

$$VITM = 100 - (100 \times g / h) \quad (\%) \quad (5)$$

$$q = p \times \text{kalibrasi proving ring} \times \text{angka koreksi} \quad (6)$$

$$MQ = q / r \quad (7)$$

dimana c = berat kering benda uji (gram); f = volume benda uji (cm³); h = berat jenis maksimum teoritis; i = persentase aspal efektif; j = persentase agregat terhadap volume; p = pembacaan proving ring.

Analisis Statistik ANOVA Satu Arah

Analisis data menggunakan Analysis of Variance (ANOVA) satu arah untuk mengkaji pengaruh variabel bebas (kadar serbuk karet) terhadap variabel terikat (parameter Marshall) (Suryo dkk., 2016). ANOVA satu arah dipilih karena penelitian ini hanya melibatkan satu faktor perlakuan, yaitu variasi kadar serbuk karet ban bekas, sehingga metode ini dinilai paling sesuai untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan tersebut. Tingkat signifikansi yang digunakan $\alpha =$

0,05. Hipotesis nol (H_0) menyatakan variasi kadar serbuk karet tidak berpengaruh terhadap karakteristik Marshall. Keputusan diambil berdasarkan perbandingan Fhitung dengan Ftabel ($F_{0,05;4;12} = 3,26$). Apabila Fhitung < Ftabel, H_0 diterima.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemeriksaan Agregat dan Aspal

Pengujian propertis agregat kasar, agregat halus, dan aspal bertujuan memastikan material memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Propertis Agregat dan Aspal (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium, 2025)

Seluruh pemeriksaan pada Tabel 1 memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, sehingga material layak digunakan.

Kandungan Serbuk Karet Ban Bekas

Analisis XRF memberikan gambaran unsur dominan pada serbuk karet ban bekas (Tabel 2).

Tabel 2. Kandungan Unsur Serbuk Karet Ban Bekas (XRF)

Unsur	Simbol	Kandungan (%)
Sulfur	S	38,76
Zinc	Zn	28,61
Calsium	Ca	13,69
Titanium	Ti	7,89
Sodium	Na	6,86
Silicon	Si	2,53
Pottassium	K	0,76
Aluminium	Al	0,69
Iron	Fe	0,20
Total		100,00

(Sumber: Lab. Teknik Kimia Universitas Riau, 2025)

Berdasarkan hasil analisis XRF, serbuk karet ban bekas didominasi oleh tiga unsur utama, yaitu sulfur (S) sebesar 38,76%, zinc (Zn) sebesar 28,61%, dan kalsium (Ca) sebesar 13,69%. Kandungan sulfur yang tinggi berperan dalam proses vulkanisasi yang dapat memperkuat ikatan polimer dalam campuran aspal. Zinc oksida (ZnO) yang terkandung berfungsi sebagai aktivator dalam proses vulkanisasi sekaligus meningkatkan kekakuan dan ketahanan campuran. Sementara itu, kalsium berperan sebagai pengisi (filler) yang dapat meningkatkan stabilitas campuran beraspal. Kombinasi ketiga unsur tersebut secara bersama-sama berkontribusi dalam memperkuat ikatan antara aspal dengan agregat, sehingga meningkatkan ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas dan deformasi permanen.

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berdasarkan hasil analisa saringan, diperoleh CA = 39%, FA = 54,5%, dan FF = 6,5%. Dengan persamaan (1):

$$P_b = 0,035(39) + 0,045(54,5) + 0,18(6,5) + 1 = 5,87\% \approx 6,0\%$$

KAO teoritis 6% dijadikan titik tengah untuk variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% pada uji Marshall laboratorium. Berdasarkan pemenuhan parameter VITM, VMA, VFWA, stabilitas, dan flow, diperoleh KAO laboratorium sebesar 5,39%. Dengan demikian, berat aspal untuk variasi kadar serbuk karet adalah $5,39\% \times 1200 \text{ gram} = 64,68 \text{ gram}$.

Hasil Pengujian Marshall Variasi Serbuk Karet

Pengujian dilakukan pada lima variasi kadar serbuk karet (0%, 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1%) dengan tiga benda uji per variasi. Rekapitulasi ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Marshall Test dengan Variasi Kadar Serbuk Karet

%Srb	Dens.	VFWA	VITM	VMA	Stab.	Flow	MQ
0,0	2,36	75,81	4,13	16,81	3279	3,98	864
0,8	2,36	87,86	4,16	16,83	3934	4,37	952
0,9	2,37	77,21	3,88	16,59	3951	3,80	1072
1,0	2,41	85,91	1,78	15,13	3899	4,97	679
1,1	2,40	86,51	2,33	15,22	3924	3,17	988
Spek	> 2	> 65	3-5	> 15	>800	2-4	>250

Ket: Stab. (kg), Flow (mm), MQ (kg/mm), Dens. (gr/cm³).
Baris 0,9% = kadar optimum.

Density tetap relatif konstan pada kadar 0%–0,9% (2,36–2,37 gr/cm³), meningkat ke 2,41 gr/cm³ pada kadar 1%, lalu menurun tipis menjadi 2,40 gr/cm³ pada kadar 1,1%. Peningkatan density pada kadar 1% menunjukkan bahwa serbuk karet pada kadar tersebut efektif mengisi rongga di antara agregat, menghasilkan campuran yang lebih padat. Semua nilai density memenuhi persyaratan minimum 2 gr/cm³ sesuai (Spesifikasi Bina Marga, 2025).

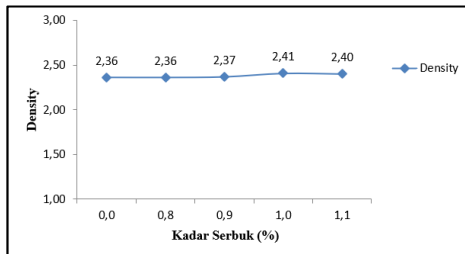
VFWA tertinggi pada kadar 0,8% (87,86%), menurun menjadi 77,21% pada 0,9%, lalu meningkat kembali pada 1% dan 1,1%. Pola tidak linear ini menunjukkan bahwa distribusi serbuk karet berpengaruh pada kemampuan aspal dalam mengisi rongga yang tersedia. Meskipun demikian, seluruh nilai VFWA memenuhi batas minimum 65% — sebuah indikator bahwa rongga antar agregat cukup terisi aspal dan membentuk selaput (film) yang melindungi agregat dari air.

VITM pada kadar 0%, 0,8%, dan 0,9% memenuhi spesifikasi (3–5%) dengan rentang 3,88–4,16%. Kadar 1% (1,78%) dan 1,1% (2,33%) tidak memenuhi karena berada di bawah batas minimum —

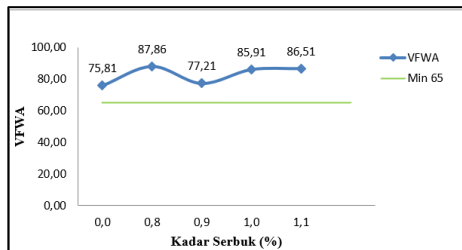
indikasi campuran terlalu padat yang berpotensi menyebabkan bleeding atau rutting pada suhu tinggi. Rongga dalam campuran yang terlalu kecil menyebabkan aspal tidak memiliki ruang ekspansi ketika suhu meningkat, sehingga aspal akan mendesak ke permukaan dan menimbulkan kilap berminyak (bleeding). VMA pada seluruh variasi memenuhi standar minimum 15%.

Stabilitas meningkat dari 3278,99 kg pada kadar 0% hingga puncak 3951,46 kg pada kadar 0,9% — kenaikan 20,5% dibanding kontrol. Setelah itu stabilitas sedikit menurun menjadi 3899,06 kg (kadar 1%) dan 3924,46 kg (kadar 1,1%). Pola ini menunjukkan bahwa kadar serbuk karet 0,9% merupakan titik optimum di mana ikatan antara serbuk karet dengan aspal terdistribusi paling merata. Semua nilai stabilitas jauh di atas batas minimum 800 kg, mengindikasikan campuran memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap beban lalu lintas.

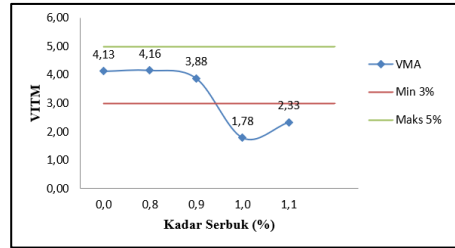
Flow memenuhi spesifikasi (2–4 mm) pada kadar 0%, 0,9%, dan 1,1%, namun melebihi batas pada 0,8% (4,37 mm) dan 1% (4,97 mm). Nilai flow yang terlalu tinggi pada kadar 1% mengindikasikan campuran cenderung lebih plastis dan rentan mengalami deformasi permanen. MQ tertinggi pada kadar 0,9% sebesar 1072,47 kg/mm, menunjukkan keseimbangan terbaik antara stabilitas dan flow. MQ rendah pada kadar 1% (679,02 kg/mm) sejalan dengan flow yang tinggi pada kadar tersebut, mengonfirmasi bahwa campuran menjadi terlalu lentur.



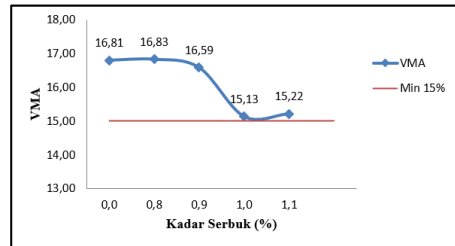
Gambar 1. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai Density



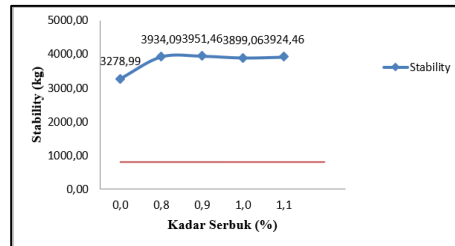
Gambar 2. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai VFWA



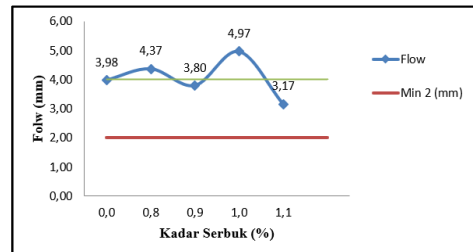
Gambar 3. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai VITM



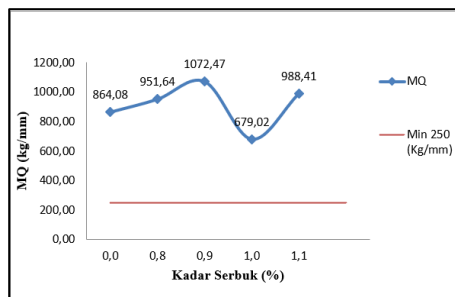
Gambar 4. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai VMA



Gambar 5. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai Stabilitas



Gambar 6. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai Flow



Gambar 7. Variasi Kadar Serbuk Karet Ban Bekas terhadap Nilai MQ

Gambar 1 menampilkan nilai density yang stabil pada kadar rendah dengan lonjakan pada kadar 1% — mengindikasikan efek pengisian rongga oleh serbuk karet. Gambar 2 menunjukkan fluktuasi VFWA yang tidak linear, namun seluruh nilai masih di atas batas minimum 65%. Gambar 3 memperjelas bahwa VITM pada kadar 1% dan 1,1% berada di bawah batas spesifikasi — sebuah temuan kritis untuk menetapkan kadar optimum. Gambar 4 memperlihatkan peningkatan stabilitas 20,5% pada kadar 0,9% dibanding kontrol, dengan seluruh variasi tetap jauh di atas batas minimum 800 kg. Gambar 5 menyoroti kadar 0,8% dan 1% yang melewati batas atas flow, sedangkan Gambar 6 menegaskan kadar 0,9% sebagai titik optimum MQ dengan keseimbangan terbaik antara kekakuan dan kelenturan.

Analisis ANOVA Satu Arah

Pengaruh variasi kadar serbuk karet terhadap tiap parameter Marshall diuji dengan ANOVA satu arah pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Nilai Ftabel dengan $db_1 = 4$ dan $db_2 = 12$ adalah 3,26. Rekapitulasi pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisis ANOVA

Parameter Marshall	Fhitung	Ftabel	Ket
Density (gr/cc)	2,81	3,26	TS
VMA (%)	1,69	3,26	TS
VFWA (%)	1,77	3,26	TS
VIM (%)	2,14	3,26	TS
Stabilitas (kg)	0,68	3,26	TS
Flow (mm)	0,71	3,26	TS
Marshall Quotient	1,16	3,26	TS

Ket: TS = Tidak Signifikan (Fhitung < Ftabel)

Sebagai ilustrasi rinci perhitungan ANOVA, Tabel 5 menampilkan hasil analisis untuk parameter density.

Tabel 5. Contoh Perhitungan ANOVA Satu Arah — Parameter Density

Sumber Variasi	DB	JK	KT	F
Perlakuan	4	0,014	0,00346	2,81
Galat	12	0,015	0,00123	—
Total	14	0,029	—	—

DB = derajat bebas; JK = jumlah kuadrat; KT = kuadrat tengah

Prosedur perhitungan yang sama diterapkan untuk parameter stabilitas, menghasilkan rekapitulasi pada Tabel 6. Stabilitas dipilih sebagai contoh kedua karena merupakan parameter kunci dalam menilai kemampuan campuran menahan beban lalu lintas.

Tabel 6. Perhitungan ANOVA Satu Arah — Parameter Stabilitas

Sumber Variasi	DB	JK	KT	F
Perlakuan	4	869.103	217.276	0,68
Galat	12	3.840.422	320.035	—
Total	14	4.709.525	—	—

Fhitung (0,68) < Ftabel (3,26) → H_0 diterima

Seluruh parameter Marshall memiliki Fhitung lebih kecil dari Ftabel (3,26), sehingga H_0 diterima. Variasi kadar serbuk karet pada rentang 0%–1,1% tidak memberikan pengaruh signifikan secara statistik terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC pada tingkat kepercayaan 95%.

Meskipun secara visual terlihat perubahan nilai pada Tabel 3, perubahan itu tidak cukup besar untuk dinyatakan signifikan secara statistik. Temuan ini memberikan klarifikasi terhadap penelitian (Indriani dkk., 2022) yang tidak dapat menghasilkan kesimpulan tegas karena tidak disertai analisis statistik mendalam dan terdapat parameter VIM yang gagal memenuhi spesifikasi. Dengan menerapkan uji ANOVA dan pengujian parameter yang lebih ketat sesuai (Bina Marga 2018 Revisi II, 2025), penelitian ini menegaskan bahwa pada rentang kadar yang rendah (0,8%–1,1%), penambahan serbuk karet memang tidak menimbulkan perbedaan nyata secara statistik — sebuah temuan yang tidak dapat disimpulkan oleh studi sebelumnya.

Sebagai contoh perhitungan, untuk parameter density diperoleh nilai jumlah kuadrat total (JKTotal) = 0,029, jumlah kuadrat perlakuan (JKPerlakuan) = 0,014, dan jumlah kuadrat galat (JKGalat) = 0,015. Kuadrat tengah perlakuan (KTPerlakuan) = 0,00346, sedangkan KTGalat = 0,00123, sehingga Fhitung = $0,00346 / 0,00123 = 2,81$. Nilai ini tetap lebih kecil dari Ftabel = 3,26, sehingga H_0 diterima untuk parameter density. Prosedur yang sama diterapkan untuk parameter VMA (Fhitung = 1,69), VFWA (1,77), VIM (2,14), stabilitas (0,68), flow (0,71), dan MQ (1,16) — seluruhnya tidak signifikan.

Nilai Fhitung yang rendah untuk parameter stabilitas (0,68) dan flow (0,71) mengindikasikan bahwa variasi antarperlakuan justru lebih kecil dibandingkan variasi galat dalam perlakuan, artinya data antarsampel triplo cenderung bervariasi lebih besar dari perbedaan antarkadar serbuk karet. Hal ini konsisten dengan temuan [13] yang menegaskan bahwa pada pengujian laboratorium material berbasis aspal, tingkat variabilitas intra-sampel sering kali cukup besar sehingga membutuhkan rentang variasi perlakuan yang lebih lebar agar efek statistik dapat terlihat jelas. Dalam konteks penelitian ini, rentang kadar 0,8%–1,1% yang sempit hanya mencakup selisih 0,3% — terlalu sempit untuk menghasilkan perbedaan yang signifikan pada karakteristik Marshall.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Temuan sejalan dengan (Gunawan dkk., 2022) yang menemukan kadar 10% sebagai campuran terbaik dengan stabilitas meningkat, sementara kadar 20% dan 30% menurunkan stabilitas. Demikian pula (Rai dkk., 2017) menemukan komposisi serbuk ban bekas 10% memberikan Marshall Quotient terbaik yang memenuhi standar SNI 03-1737-1989. Perbedaan utama penelitian ini adalah penggunaan kadar yang lebih rendah (0,8%–1,1%) dan penerapan ANOVA yang membuktikan perbedaan antarvariasi pada rentang rendah tidak signifikan secara statistik. Penelitian (Lagaligo dkk., 2022) pada karet alam juga menunjukkan kontribusi karet terhadap peningkatan stabilitas, kuat tarik, dan ketahanan deformasi campuran beton aspal.

Peran serbuk karet ban bekas dalam memperbaiki sifat Marshall terkait dengan elastisitas karet yang meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan terhadap retakan. Kandungan sulfur, zinc, dan kalsium yang tinggi bertindak sebagai agen vulkanisasi alami yang memperkuat ikatan aspal-agregat (Gunawan dkk., 2022). Penelitian lain seperti (Lebang dan Lopian, 2021) juga menunjukkan bahwa penambahan karet alam meningkatkan stabilitas campuran aspal beton lapis aus. Studi [12] menegaskan pentingnya variabel suhu pemadatan dan durasi perendaman dalam menjaga durabilitas campuran beton aspal.

Perbedaan kinerja flow antara penelitian ini dengan (Indriani dkk., 2022) layak dicermati. Pada penelitian terdahulu, nilai flow menurun tajam dari 4,62 mm menjadi 2,15 mm seiring peningkatan kadar serbuk, dan nilai VIM gagal memenuhi spesifikasi pada kadar 0,9% (8,457%). Sebaliknya, penelitian ini memperoleh nilai flow yang lebih konsisten (3,17–4,97 mm) dan VITM yang memenuhi spesifikasi pada kadar 0%, 0,8%, dan 0,9%. Konsistensi ini dimungkinkan oleh pengendalian gradasi agregat yang lebih ketat sesuai *Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan* (Spesifikasi Bina Marga, 2025) serta prosedur pencampuran yang distandarisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan data baru, tetapi juga mendemonstrasikan bahwa kualitas pengendalian eksperimen adalah faktor penting dalam memperoleh hasil Marshall yang valid.

Dari sisi implementasi lapangan, kadar optimum 0,9% berarti untuk setiap 64,68 gram aspal dalam satu benda uji dibutuhkan 0,58 gram serbuk karet ban bekas. Jika diekstrapolasi ke skala produksi AMP (Asphalt Mixing Plant) dengan kapasitas 60 ton/jam, maka penggunaan 0,9% serbuk karet dari berat aspal setara dengan substitusi sekitar 29 kg serbuk karet per jam produksi — jumlah yang dapat diserap dari rantai pasok bengkel lokal tanpa memerlukan infrastruktur daur ulang yang rumit. Hal ini menjadikan temuan

penelitian ini bukan hanya signifikan secara akademis, tetapi juga layak secara operasional untuk diterapkan pada proyek pemeliharaan jalan di wilayah Riau dan sekitarnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan serbuk karet ban bekas dengan variasi kadar 0,8%, 0,9%, 1%, dan 1,1% dari berat aspal pada campuran AC-WC menghasilkan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,39% dan kadar optimal serbuk karet sebesar 0,9%, yang memberikan karakteristik Marshall terbaik berupa density 2,37 gr/cm³, VMA 16,59%, VFWA 77,21%, VITM 3,88%, stabilitas 3951,46 kg (meningkat 20,5% dibandingkan kontrol), flow 3,80 mm, dan Marshall Quotient 1072,47 kg/mm — seluruhnya memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Kadar 1% dan 1,1% tidak memenuhi persyaratan VITM karena campuran menjadi terlalu padat. Berdasarkan uji ANOVA satu arah dengan tingkat kepercayaan 95%, variasi kadar serbuk karet pada rentang 0%–1,1% tidak memberikan pengaruh signifikan secara statistik terhadap seluruh parameter Marshall ($F_{hitung} < F_{tabel} = 3,26$). Penelitian ini memberikan klarifikasi terhadap penelitian Indriani dkk. yang sebelumnya tidak dapat menghasilkan kesimpulan yang jelas; hal tersebut wajar karena tanpa analisis statistik mendalam seperti uji ANOVA dan pengujian yang lebih ketat sesuai standar spesifikasi, sulit untuk menetapkan kadar yang paling efektif. Saran untuk penelitian lanjutan adalah melakukan pengujian ketahanan tambahan seperti kuat tarik tidak langsung, ketahanan deformasi, dan durabilitas dengan perendaman lebih lama, serta mengkaji kombinasi serbuk karet ban bekas dengan jenis aspal modifikasi lainnya untuk memperoleh kinerja yang lebih optimal.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putri, L.D., Wiyono, S. & Puri, A. (2016). Kajian Kadar Aspal Hasil Ekstraksi Penghamparan dan Mix Design Pada Campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (ACWC) Gradasi Halus. *Proceedings ACES (Annual Civil Engineering Seminar)*. Vol. 1, 117-123.
- [2] Saleh, S. M., Anggraini, R., & Aquina, H. (2014). Karakteristik Campuran Aspal Porus dengan Substitusi Styrofoam pada Aspal Penetrasi 60/70. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(3), 241-250. <https://doi.org/10.5614/jts.2014.21.3.7>
- [3] Gunawan, H., Surbakti, M. S., & Siregar, N. (2022). Pengaruh Penambahan Serbuk Limbah Ban Karet terhadap Karakteristik Marshall Campuran AC-WC. *Jurnal Teknik Sipil USU*, 11(1), 45–56.

- [4] Sa'dillah, M., & Leliana, A. (2020). Karakteristik Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC) dengan Penambahan Bahan Pengisi Abu Terbang Batubara. *Prosiding SENTIKUIN (Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur)*, 3, 1–8.
- [5] Indriani, R., Soehardi, F., & Lubis, F. (2022). Pengaruh Penambahan Serbuk Karet Ban Bekas sebagai Bahan Tambah pada Campuran AC-WC. *Jurnal Teknik Sipil Siklus*, 8(1), 1–10.
- [6] Rai, I. G. A., Widiasih, S., & Suweda, I. W. (2017). Pengaruh Komposisi Serbuk Ban Bekas sebagai Zat Aditif terhadap Kekuatan Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). *Jurnal Spektran*, 5(2), 143–150.
- [7] Machsus, M., Mawardi, A. F., Khoiri, M., Basuki, R., & Akbar, F. H. (2020). Analisa Pengaruh Variasi Temperatur Pematatan Campuran Laston Lapis Antara (AC-BC) dengan Menggunakan Aspal Modifikasi. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 107–116. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v18i1.6215>
- [8] Direktorat Jenderal Bina Marga. (2025). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- [9] Suryo, E. A., Suroso, S., Zaika, Y., & Ato'urrahman, M. (2016). Pengaruh Kepadatan dan Kadar Air Tanah Pasir terhadap Nilai Resistivitas pada Model Fisik dengan Metode Geolistrik. *Rekayasa Sipil*, 10(3), 178–186. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2016.010.02.02>
- [10] Lagaligo, D., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2022). Pengaruh Temperatur Pematatan pada Campuran Beton Aspal (AC-WC) dengan Bahan Tambah Karet Alam terhadap Ketahanan Deformasi dan Kuat Tarik Tidak Langsung. *Konstruksi*, 1(11), 23–36.
- [11] Lebang, N. L., & Lopian, N. M. Y. (2021). Analisa Stabilitas Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC) dan Karet Alam sebagai Material Perkerasan Jalan. *Pharmacognosy Magazine*, 75(17), 399–405.
- [12] Tahir, A., & Setiawan, A. (2009). Kinerja Durabilitas Campuran Beton Aspal Ditinjau dari Faktor Variasi Suhu Pematatan dan Lama Perendaman. *Jurnal SMARTEK*, 7(1), 45–62.
- [13] Zainul Arifin, M., Djakfar, L., & Martina, G. (2008). Pengaruh Kandungan Air Hujan terhadap Kinerja Campuran Aspal Beton. *Rekayasa Sipil*, 2(1), 1–23.
- [14] Meilani, M., & Kurnia, R. (2019). Kajian Parameter Marshall Campuran Hangat Laston (HRS-WC) Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 5(4), 6–33.
- [15] Saleh, S. M., Anggraini, R., & Aquina, H. (2014). Karakteristik Campuran Aspal Porus dengan Substitusi Styrofoam pada Aspal Penetrasi 60/70. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(3), 241–250. <https://doi.org/10.5614/jts.2014.21.3.7>
- [16] Abdullah, Z. Z., Wesli, W., & Akbar, S. J. (2017). Penggunaan Abu Batu Bara sebagai Filler pada Campuran Aspal Beton AC-BC. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 121–130. <https://doi.org/10.29103/tj.v6i2.95>