

Indirect Tensile Strength Campuran AC-WC dengan Substitusi Aspal dan Serbuk Limbah Ban Karet

Article History:

Received
16 Juli 2026
Revised
19 Juli 2026
Accepted
20 Juli 2026

BARKAH WAHYU WIDIANTO^{1*}, OKA PURWANTI¹,
SOFYAN TRIANA¹, IKHSAN NANDA PRATAMA²

¹Dosen Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional
Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional
Bandung, Indonesia

*Corresponding email: barkah@itenas.ac.id

ABSTRAK

Perkerasan lentur di daerah tropis menghadapi risiko kerusakan akibat air (*moisture-induced damage*) yang lazim dievaluasi melalui pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* dan *Tensile Strength Ratio (TSR)*. Substitusi sebagian aspal dengan serbuk limbah ban karet (*crumb rubber*) berpotensi memperbaiki kinerja campuran sekaligus mengurangi timbunan limbah ban bekas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja ITS campuran AC-WC yang menggunakan aspal Pen 60/70 yang disubstitusi dengan *crumb rubber* sebesar 0%, 3%, dan 6% terhadap berat aspal. Pengujian karakteristik aspal dan Marshall digunakan untuk memilih kadar rubber yang layak dan menetapkan Kadar Aspal Optimum (KAO); pengujian ITS kemudian dilakukan pada benda uji dengan KAO dalam kondisi terkondisi dan tidak terkondisi mengacu pada ASTM D4867. Kadar rubber 6% ditolak karena melanggar syarat daktilitas dan kelarutan aspal modifikasi. KAO diperoleh 6,375% (0% rubber) dan 6,500% (3% rubber). Nilai ITS tidak terkondisi hampir setara pada kedua campuran (1.083 vs 1.078 kPa), namun ITS terkondisi campuran 3% rubber (907 kPa) lebih rendah secara signifikan dibandingkan dengan kontrol (986 kPa), sehingga TSR menurun dari 91,01% menjadi 84,13%. Meskipun kedua nilai TSR memenuhi syarat Bina Marga 2024 ($\geq 80\%$), penambahan *crumb rubber* pada kondisi produksi penelitian ini tidak meningkatkan ketahanan lembab campuran AC-WC.

Kata kunci: AC-WC, *crumb rubber*, *indirect tensile strength*, substitusi aspal, *tensile strength ratio*

ABSTRACT

Flexible pavements in tropical climates face a significant risk of moisture-induced damage, commonly assessed through *Indirect Tensile Strength (ITS)* and *Tensile Strength Ratio (TSR)* tests. Partial substitution of bitumen with waste tyre crumb rubber offers a means to improve mixture performance while reducing the accumulation of used tyre waste. This study evaluates the ITS performance of AC-WC mixtures using Pen 60/70 bitumen substituted with crumb rubber at 0%, 3%, and 6% by weight of bitumen. Bitumen characterisation and Marshall testing were used to screen feasible rubber contents and to determine the Optimum Bitumen Content (OBC); ITS testing followed on OBC specimens under conditioned and unconditioned states in accordance with ASTM D4867. The 6% rubber content was rejected due to failure to meet modified-bitumen ductility and solubility requirements. OBC values were 6.375% (0% rubber) and 6.500% (3% rubber). Unconditioned ITS was practically identical for both mixtures (1,083 vs 1,078 kPa), while conditioned ITS at 3% rubber (907 kPa) was significantly lower than the control (986 kPa), reducing TSR from 91.01% to 84.13%. Although both TSR values satisfy the Bina Marga 2024 minimum requirement ($\geq 80\%$), crumb rubber substitution under the mixing conditions used in this study did not enhance the moisture resistance of the AC-WC mixture.

Keywords: AC-WC, *crumb rubber*, *indirect tensile strength*, bitumen substitution, *tensile strength ratio*

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



PENDAHULUAN

Transportasi merupakan salah satu penopang perkembangan sosial dan ekonomi Indonesia sehingga infrastruktur jalan raya perlu direncanakan dengan standar teknis yang memadai. Perkerasan jalan di Indonesia dihadapkan pada tuntutan pelayanan lalu lintas yang tinggi serta beban iklim tropis dengan curah hujan dan temperatur permukaan yang tinggi, sehingga campuran beraspal harus memiliki stabilitas, durabilitas, dan ketahanan terhadap air yang baik [1], [2], [3]. Salah satu bentuk perkerasan lentur yang umum digunakan pada lapis permukaan adalah *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) yang tercakup dalam spesifikasi umum Bina Marga 2024 [4], [5]. AC-WC merupakan lapisan yang berhubungan langsung dengan roda kendaraan sehingga harus kedap air, tahan cuaca, dan memiliki kekesatan yang memadai [2], [6], [7].

Sejalan dengan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor, volume ban bekas juga meningkat. Ban bekas terdiri atas kombinasi karet alam, karet sintetis (*styrene-butadiene rubber*/SBR), karbon hitam, minyak proses, sulfur, dan bahan aditif lainnya sehingga sulit terurai secara alami dan menjadi persoalan lingkungan yang serius [8], [9]. Salah satu strategi pemanfaatannya adalah dengan menggiling ban bekas menjadi serbuk halus (*crumb rubber*, CR) untuk digunakan sebagai bahan modifikasi aspal (*rubberised asphalt*) [10], [11]. Pada suhu pencampuran 160–220 °C, fraksi aromatik pada aspal terdifusi ke rantai polimer karet dan menyebabkan *swelling* partikel karet, sehingga terbentuk matriks viskoelastik yang cenderung lebih tahan deformasi permanen dan tetap lentur pada temperatur rendah [4], [12].

Sejumlah studi di Indonesia telah melaporkan penggunaan serbuk ban bekas sebagai bahan tambah aspal AC-WC dengan hasil kadar optimum yang bervariasi. Penelitian [6] melaporkan kadar optimum 4% menghasilkan keseimbangan parameter Marshall paling baik; [13] memperoleh 6% sebagai kadar yang paling optimal dari rentang 0%–8%; [8] menyimpulkan 2% sebagai kadar terbaik untuk durabilitas dan fleksibilitas; [12], [14] mendapatkan 4% pada rentang 0%–5%; dan [15] menguji kadar 0,8%–1,1% dengan hasil sebagian besar tidak memenuhi VIM/VFA sehingga menyarankan pengujian lanjutan. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa hasil optimum sangat bergantung pada

karakteristik material, ukuran partikel karet, kondisi pencampuran, dan spesifikasi yang digunakan sebagai acuan.

Selain karakteristik Marshall, kinerja ketahanan lembab juga menjadi aspek penting untuk perkerasan lentur di daerah tropis. Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) yang dilengkapi rasio ITS terkondisi terhadap tidak terkondisi (*Tensile Strength Ratio*, TSR) merupakan metode yang lazim digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap kerusakan akibat air, sebagaimana diatur pada ASTM D4867 [16], [17]. Namun demikian, kajian yang membahas pengaruh kombinasi variasi kadar *crumb rubber* terhadap karakteristik Marshall dan sekaligus terhadap kinerja TSR pada campuran AC-WC dengan aspal Pen 60/70 masih terbatas, khususnya jika mengacu pada spesifikasi Bina Marga 2024 [11], [18].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja *Indirect Tensile Strength* (ITS) campuran AC-WC yang menggunakan aspal Pen 60/70 dengan substitusi *crumb rubber* sebesar 0%, 3%, dan 6% terhadap berat aspal. Pengujian karakteristik aspal dan Marshall dimanfaatkan sebagai tahap penyaringan untuk memilih kadar *rubber* yang layak dan menetapkan Kadar Aspal Optimum (KAO) sebagai basis pembuatan benda uji ITS. Fokus utama penelitian diletakkan pada nilai ITS terkondisi, ITS tidak terkondisi, dan TSR sebagai indikator ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air.

METODE

Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal Pen 60/70 produk Shell yang diperoleh dari distributor di Kabupaten Bogor, agregat kasar dan halus dari daerah Lagadar, *filler*, serta serbuk limbah ban karet (*crumb rubber*) yang berasal dari CV. Krakatau Media, Malang. Serbuk karet yang digunakan merupakan fraksi lolos saringan No. 100 sehingga cenderung tergolong ukuran halus. Karakteristik aspal mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 Revisi 2 karena Spesifikasi Bina Marga 2024 tidak lagi mencantumkan ketentuan detail untuk aspal Pen 60/70 yang digunakan dalam penelitian ini, sedangkan karakteristik agregat dan campuran mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2024 [4].

Modifikasi Aspal dengan *Crumb Rubber*

Substitusi serbuk ban karet dilakukan pada tiga variasi kadar, yaitu 0%, 3%, dan 6% terhadap berat aspal. Proses pencampuran (*mixing*) aspal dengan *crumb rubber* dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Institut Teknologi Nasional Bandung. Kondisi pencampuran yang dapat dijalankan pada penelitian ini adalah kecepatan pengadukan 500 rpm, durasi pencampuran 60 menit, dan temperatur 180 °C. Kecepatan pengadukan ini berada di bawah rentang yang umumnya direkomendasikan pada studi produksi *rubberised bitumen* (secara khas ≥ 3000 rpm untuk *high-shear mixer*) [19].

Pengujian Karakteristik Aspal dan Agregat

Pengujian karakteristik aspal Pen 60/70 (baik tanpa maupun dengan modifikasi *crumb rubber*) meliputi penetrasi (SNI 06-2456-1991), viskositas kinematis pada 135 °C (AASHTO T201), titik lembek (SNI 06-2434-1991), daktilitas (SNI 06-2432-1991), kelarutan dalam trikloroetilena (AASHTO T44), berat jenis (SNI 06-2441-1991), titik nyala (SNI 06-2433-1991), dan kehilangan berat setelah pemanasan (SNI 06-2441-1991) [10]. Pengujian agregat meliputi berat jenis agregat kasar dan halus (SNI 1969-2008), keausan Los Angeles (SNI 2417-2008), *soundness* (SNI 3407-2008), pemeriksaan *filler*, serta gradasi campuran mengikuti amplop AC-WC pada Spesifikasi Bina Marga 2024 [4], [20].

Pembuatan Benda Uji dan Pengujian Marshall

Kadar Aspal Acuan (KAA) dihitung berdasarkan gradasi target campuran AC-WC. Untuk gradasi rencana yang digunakan, diperoleh KAA sebesar 5,81% yang dibulatkan menjadi 6,0%. Benda uji Marshall dibuat berbentuk silinder dengan diameter ~101,6 mm dan tinggi ~63,5 mm pada lima variasi kadar aspal, yaitu KAA-1,0%; KAA-0,5%; KAA; KAA+0,5%; dan KAA+1,0% (yakni 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; dan 7,0%), masing-masing dibuat tiga benda uji untuk kadar rubber 0% dan 3%. Pengujian Marshall mengacu pada SNI 06-2489-1991 dengan pemadatan 75 tumbukan tiap sisi dan perendaman benda uji dalam *water bath* 60 ± 1 °C selama 30–40 menit sebelum ditekan. Parameter Marshall yang dihitung meliputi VMA, VIM, VFA, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ).

Berdasarkan hubungan setiap parameter Marshall terhadap kadar aspal, ditentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) sebagai kadar aspal pada rentang yang memenuhi seluruh

syarat pada spesifikasi campuran laston (AC-WC) menurut Bina Marga 2024 [8], [21].

Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)

Pengujian ITS mengacu pada ASTM D4867 [22]. Benda uji ITS dibuat dengan kadar aspal yang sama dengan KAO masing-masing campuran (kadar *rubber* 0% dan 3%), berjumlah tiga benda uji per kondisi. Benda uji tidak terkondisi (*unconditioned*) direndam dalam *water bath* 25 ± 1 °C selama 20 menit sebelum diuji. Benda uji terkondisi (*conditioned*) direndam dalam *water bath* 60 ± 1 °C selama 24 jam, kemudian dipindahkan ke *water bath* 25 ± 1 °C selama 1 jam sebelum diuji. Nilai ITS tidak terkondisi (S_{td}), ITS terkondisi (S_{tm}), dan *Tensile Strength Ratio* (TSR) dihitung dengan **Persamaan 1–3** berikut, dengan P adalah beban maksimum (kN), h adalah tebal benda uji sebelum pengujian, h' tebal setelah pengondisian, dan d adalah diameter benda uji (mm).

$$S_{td} = 2P/(\pi \times h \times d) \quad (1)$$

$$S_{tm} = 2P/(\pi \times h' \times d) \quad (2)$$

$$TSR = (S_{tm}/S_{td}) \times 100\% \quad (3)$$

Kriteria penerimaan minimum TSR untuk campuran laston menurut Bina Marga 2024 adalah 80% [20], [21].

Analisis Statistik

Pengaruh kadar rubber dan kadar aspal terhadap parameter Marshall diuji menggunakan ANOVA dua arah. Untuk pengujian ITS, perbedaan antara kondisi terkondisi dan tidak terkondisi pada kadar *rubber* yang sama diuji menggunakan *paired sample t-test*, sedangkan perbedaan antarkadar *rubber* (0% vs 3%) diuji menggunakan *independent sample t-test*. Taraf signifikansi yang digunakan adalah $\alpha = 0,05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Aspal dengan Substitusi *Crumb Rubber*

Hasil pengujian karakteristik aspal Pen 60/70 tanpa dan dengan substitusi *crumb rubber* disajikan pada **Tabel 1**. Aspal kontrol (0% *rubber*) memenuhi seluruh persyaratan Bina Marga 2010 Revisi 2 untuk aspal Pen 60/70. Aspal dengan substitusi 3% dan 6% dievaluasi berdasarkan kriteria aspal modifikasi elastomer sintesis (Tipe II C) pada acuan yang sama.

Tabel 1. Karakteristik Aspal pada Berbagai Kadar *Crumb Rubber*

Parameter (satuan)	0%	3%	6%
Penetrasi 25 °C (0,1 mm)	64,8	52,4 5	48,6 5
Viskositas 135 °C (cSt)	440	540	870
Titik lembek (°C)	50,5	56,5	58,0
Daktilitas 25 °C (cm)	180	101, 5	54,8
Kelarutan TCE (%)	99,1	90,6	85,7 5
Berat jenis (–)	1,026	1,04 0	1,06 1
Titik nyala (°C)	320	258	269
Kehilangan berat TFOT (%)	0,209	0,01 0	0,00 4
Indeks penetrasi (–)	–0,44 7	0,42 3	0,55 4

Sebagaimana terlihat pada **Tabel 1**, penambahan *crumb rubber* meningkatkan viskositas, titik lembek, berat jenis, dan indeks penetrasi, serta menurunkan kehilangan berat setelah pemanasan (TFOT). Peningkatan viskositas dari 440 cSt (0%) menjadi 540 cSt (3%) dan 870 cSt (6%), serta kenaikan titik lembek dari 50,5 °C menjadi 56,5 °C dan 58,0 °C, menunjukkan bahwa keberadaan partikel karet yang terdispersi menghambat aliran aspal dan memperbaiki stabilitas termal pada temperatur tinggi. Fenomena ini konsisten dengan pembentukan matriks viskoelastik akibat difusi fraksi aromatik aspal ke rantai polimer karet [1], [5], [14].

Sebaliknya, penetrasi menurun dari 64,8 dmm (0%) menjadi 52,45 dmm (3%) dan 48,65 dmm (6%), daktilitas menurun tajam dari 180 cm menjadi 101,5 cm dan 54,8 cm, dan kelarutan dalam trikloroetilena menurun dari 99,1% menjadi 90,6% dan 85,75%. Nilai kelarutan pada kadar 3% dan 6% berada di bawah persyaratan minimum aspal modifikasi elastomer sintetis ($\geq 99\%$) menurut Bina Marga 2010 Revisi 2, sedangkan daktilitas pada kadar 6% juga berada di bawah persyaratan minimum 100 cm [2]. Rendahnya kelarutan menunjukkan bahwa sebagian serbuk karet tidak terlarut sempurna dalam aspal, konsisten dengan sifat karbon hitam yang tidak larut dan dispersi partikel karet yang belum optimum.

Kondisi pencampuran pada penelitian ini (500 rpm, 60 menit, 180 °C) berada di bawah kecepatan geser yang umumnya direkomendasikan pada produksi *rubberised* bitumen skala laboratorium menggunakan *high-shear mixer* [19]. Kecepatan geser yang rendah cenderung menghasilkan dispersi partikel karet yang belum sempurna, sehingga

berkontribusi pada rendahnya kelarutan dan penurunan daktilitas yang teramati, terutama pada kadar 6%. Oleh karena itu, hasil karakteristik aspal pada penelitian ini sebaiknya diinterpretasikan dalam konteks keterbatasan peralatan tersebut, dan pengembangan lebih lanjut disarankan menggunakan *high-shear mixer*.

Berdasarkan *trade-off* tersebut, kadar *rubber* 6% dinilai kurang layak karena melanggar dua kriteria aspal modifikasi (daktilitas dan kelarutan), sehingga tahap pembuatan campuran AC-WC selanjutnya difokuskan pada kadar *rubber* 0% dan 3%.

Karakteristik Marshall dan Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan gradasi rencana yang digunakan, diperoleh Kadar Aspal Acuan (KAA) sebesar 5,81% yang dibulatkan menjadi 6,0%. Rekapitulasi hasil pengujian Marshall untuk lima variasi kadar aspal (5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0%) pada kadar *rubber* 0% dan 3% menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur, yaitu VIM dan VMA menurun seiring naiknya kadar aspal, sedangkan VFA meningkat. Nilai stabilitas mencapai puncak pada kisaran 5,5%–6,5%, kemudian sedikit menurun pada kadar 7,0%.

Berdasarkan grafik parameter Marshall terhadap kadar aspal, rentang kadar aspal yang memenuhi semua persyaratan Bina Marga 2024 untuk campuran AC-WC diperoleh sebesar 6,00%–6,75% pada kadar *rubber* 0% dan 6,10%–6,90% pada kadar *rubber* 3%, sehingga KAO ditetapkan sebesar 6,375% dan 6,50% secara berturut-turut (**Tabel 2**). Nilai KAO yang sedikit lebih tinggi pada campuran dengan *rubber* konsisten dengan sifat absorpsi aromatik aspal oleh partikel karet, sehingga membutuhkan aspal lebih banyak untuk menghasilkan selimut film yang memadai [1].

Tabel 2. Rekapitulasi Volume Lalu Lintas Hari Puncak

Kadar <i>Rubber</i>	Rentang Kadar Aspal yang Memenuhi (%)	KAO (%)
0%	6,00 – 6,75	6,37 5
3%	6,10 – 6,90	6,50 0

Analisis *two-way* ANOVA (**Tabel 3**) menunjukkan bahwa kadar aspal memberikan

pengaruh yang signifikan terhadap seluruh parameter volumetrik dan mekanis Marshall (VMA, VIM, VFA, stabilitas, dan MQ) dengan $p < 0,05$. Kadar rubber memberikan pengaruh signifikan terhadap VMA, stabilitas, *flow*, dan MQ, namun tidak signifikan terhadap VIM dan VFA. Interaksi kadar *rubber* $\times$ kadar aspal signifikan hanya pada stabilitas dan MQ.

Tabel 3. Ringkasan Two-Way ANOVA Parameter Marshall

Parameter	Kadar Rubber	Kadar Aspal	Interaksi
VMA	0,042*	<0,001*	0,112
VIM	0,228	<0,001*	0,100
VFA	0,702	<0,001*	0,230
Stabilitas	<0,001*	<0,001*	0,045*
Flow	0,003*	0,154	0,151
Marshall Quotient	0,049*	<0,001*	0,024*

Keterangan: nilai yang dicantumkan adalah p-value; * menunjukkan $p < 0,05$.

Efek utama yang paling relevan secara praktis adalah pada stabilitas: penambahan *rubber* 3% meningkatkan stabilitas Marshall pada seluruh rentang kadar aspal yang diuji, dengan nilai puncak pada kadar aspal 5,5% sebesar sekitar 2.113 kg (3%) dibandingkan 1.527 kg (0%). Hasil ini konsisten dengan peningkatan viskositas dan titik lembek aspal yang meningkatkan kekakuan matriks pengikat. Pengaruh rubber terhadap VIM dan VFA yang tidak signifikan menunjukkan bahwa struktur rongga campuran lebih dominan dikendalikan oleh kadar aspal daripada oleh substitusi rubber pada kadar 3%. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Hijriah dkk. yang menyimpulkan bahwa rongga campuran cenderung dikontrol oleh kadar aspal [9], [13].

Kinerja Indirect Tensile Strength (ITS) dan TSR

Hasil pengujian ITS pada benda uji dengan kadar aspal optimum disajikan pada **Tabel 4**. Untuk kadar *rubber* 0%, rata-rata ITS tidak terkondisi sebesar 1.083,07 kPa dan ITS terkondisi sebesar 985,66 kPa, menghasilkan TSR 91,01%. Untuk kadar *rubber* 3%, rata-rata ITS tidak terkondisi sebesar 1.078,29 kPa dan ITS terkondisi sebesar 907,20 kPa, menghasilkan TSR 84,13%.

Analisis statistik (**Tabel 5**) menunjukkan bahwa perbedaan ITS antara kondisi terkondisi dan tidak terkondisi signifikan pada kedua kadar *rubber* (*paired t-test*; $p = 0,009$ pada 0% dan $p = 0,033$ pada 3%). Ini mengonfirmasi bahwa proses pengkondisian

air panas menyebabkan penurunan kekuatan tarik yang nyata. Selisih penurunan yang lebih besar pada campuran dengan 3% *rubber* ($\Delta = 171,1$ kPa) dibandingkan dengan tanpa *rubber* ($\Delta = 97,4$ kPa) menunjukkan bahwa campuran dengan *crumb rubber* pada kondisi produksi penelitian ini justru lebih sensitif terhadap pengaruh air.

Tabel 4. Hasil ITS dan TSR pada Kadar Aspal Optimum

Kadar Rubber	ITS tidak terkondisi (S_{td} , kPa)	ITS terkondisi (S_{tm} , kPa)	TSR (%)
0% (KAO 6,375%)	1.083,07	985,66	91,01
3% (KAO 6,500%)	1.078,29	907,20	84,13
Syarat Bina Marga 2024 [2]	–	–	≥ 80

Perbandingan antar-kadar *rubber* pada kondisi terkondisi (**Tabel 5**) menunjukkan perbedaan yang signifikan (*independent t-test*; $p = 0,010$), yakni ITS terkondisi campuran 3% *rubber* lebih rendah daripada 0% *rubber*. Sebaliknya, pada kondisi tidak terkondisi tidak terdapat perbedaan signifikan ($p = 0,881$). Nilai TSR pada 0% *rubber* (91,01%) juga lebih tinggi daripada 3% *rubber* (84,13%) dengan perbedaan yang tidak signifikan pada taraf $\alpha = 0,05$ ($p = 0,070$).

Tabel 5. Ringkasan Uji Statistik ITS dan TSR ($\alpha = 0,05$)

Perbandingan	t-hitung	p-value
Terkondisi vs Tidak terkondisi (0% <i>rubber</i> ; <i>paired</i>)	10,588	0,009*
Terkondisi vs Tidak terkondisi (3% <i>rubber</i> ; <i>paired</i>)	5,376	0,033*
Terkondisi: 0% vs 3% (<i>independent</i>)	4,557	0,010*
Tidak terkondisi: 0% vs 3% (<i>independent</i>)	0,159	0,881
TSR: 0% vs 3% (<i>independent</i>)	2,455	0,070

Keterangan: * signifikan pada $\alpha = 0,05$.

Meskipun TSR campuran 3% *rubber* (84,13%) tetap memenuhi persyaratan minimum Bina Marga 2024 sebesar 80% [11], [20], hasil ini memperlihatkan bahwa penambahan *crumb rubber* pada kondisi produksi penelitian ini tidak meningkatkan ketahanan lembab campuran AC-WC, bahkan menurunkan margin TSR sekitar 6,9 poin persentase relatif terhadap kontrol. Temuan ini berbeda dengan sejumlah laporan literatur yang menyatakan bahwa *rubberised asphalt* umumnya meningkatkan resistansi terhadap *moisture-induced damage* [14], [23]. Perbedaan

tersebut kemungkinan besar berkaitan dengan dispersi *crumb rubber* yang belum optimum akibat kecepatan geser yang rendah.

Aspek positif yang tetap dapat diidentifikasi adalah bahwa penurunan kekuatan tarik akibat pengkondisian tidak menyebabkan campuran gagal memenuhi kriteria minimum dan nilai stabilitas Marshall serta MQ pada campuran 3% rubber lebih tinggi daripada campuran kontrol. Dengan demikian, kadar 3% dapat dianggap sebagai kadar substitusi yang layak secara teknis, dengan catatan bahwa peningkatan ketahanan lembab tidak dapat diklaim tanpa pengoptimalan proses pencampuran.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik aspal, karakteristik Marshall, dan *Indirect Tensile Strength* pada campuran AC-WC dengan substitusi serbuk limbah ban karet (*crumb rubber*) sebesar 0%, 3%, dan 6% terhadap berat aspal Pen 60/70, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai ITS tidak terkondisi campuran dengan kadar rubber 3% (1.078,29 kPa) tidak berbeda signifikan dari campuran kontrol 0% rubber (1.083,07 kPa) pada taraf $\alpha = 0,05$. Sebaliknya, ITS pada kondisi campuran 3% rubber (907,20 kPa) lebih rendah secara signifikan ($p = 0,010$) dibandingkan dengan kontrol (985,66 kPa). Hal ini menunjukkan bahwa substitusi 3% rubber tidak memperbaiki kekuatan tarik awal campuran AC-WC, namun menurunkan kekuatan tarik setelah pengkondisian air.
2. Nilai *Tensile Strength Ratio* (TSR) sebesar 91,01% (0% rubber) dan 84,13% (3% rubber). Keduanya memenuhi syarat minimum Bina Marga 2024 sebesar 80%. Substitusi 3% rubber menurunkan margin TSR sekitar 6,9 poin persentase dan meningkatkan selisih ITS antarkondisi, sehingga klaim peningkatan ketahanan lembab tidak didukung oleh data pada kondisi produksi (500 rpm, 60 menit, 180 °C) yang digunakan.
3. Substitusi *crumb rubber* meningkatkan viskositas, titik lembek, berat jenis, dan indeks penetrasi aspal, namun menurunkan penetrasi, daktilitas, kelarutan dalam TCE, dan kehilangan berat. Pada kadar 6%, daktilitas (54,8 cm)

dan kelarutan (85,75%) tidak memenuhi syarat aspal modifikasi elastomer sintetis Bina Marga 2010 Revisi 2, sehingga kadar tersebut tidak dilanjutkan pada tahap pembuatan campuran AC-WC.

4. Kadar Aspal Optimum berdasarkan pengujian Marshall diperoleh sebesar 6,375% untuk kadar rubber 0% dan 6,500% untuk kadar rubber 3%. Substitusi 3% rubber meningkatkan stabilitas Marshall secara signifikan ($p < 0,001$) tanpa mengubah VIM dan VFA secara signifikan; peningkatan ini konsisten dengan naiknya viskositas dan titik lembek aspal.
5. Substitusi 3% *crumb rubber* dapat dianggap layak secara teknis pada aspek kekuatan mekanis dan tetap memenuhi kriteria TSR, namun tidak dapat diklaim sebagai peningkatan ketahanan lembab, karena kekuatan tarik setelah *conditioning* masih mampu mempertahankan sebagian besar kekuatan tarik pada kondisi kering. Penelitian lanjutan dengan *high-shear mixer* (kecepatan ≥ 3.000 rpm) dan variasi ukuran partikel rubber disarankan untuk memverifikasi apakah dispersi yang lebih baik akan meningkatkan TSR di atas nilai kontrol.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Weimintoro, R. K. Ahmad, A. Farid, and N. S. Salsabila, "Pengaruh Penambahan Limbah Karet Ban Sebagai Substitusi Sebagian Kadar Aspal Terhadap Stabilitas AC-BC Dengan Metode Marshall Test," *Rekayasa J. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 25–30, 2022, [Online]. Available: http://ejournal.unira.ac.id/index.php/jurnal_rekayasa_teknik_sipil/article/view/1558
- [2] E. Y. Adiman, T. Iduwin, and A. Setiawan, "Pengembangan Metode Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Pada Campuran Aspal," vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2019, [Online]. Available: <http://jurnal.abulyatama.ac.id/index.php/kandidat>
- [3] G. D. Firdaus and B. W. Widiyanto, "Evaluasi Modulus Elastisitas, Sisa Umur Layan, dan Overlay Pada Perkerasan Lentur Menggunakan Program Elmod 6," *Pros. FTSP Ser. 7 Semin. Nas. dan Desiminasi Tugas Akhir*, pp. 181–185, 2024.
- [4] D. Az-Zahra and S. Sukirman, "Studi

- Banding Nilai Parameter Marshall Perkerasan AC-WC Menggunakan Spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 1 dan KP 14 Tahun 2021," *Semin. Nas. dan Disem. Tugas Akhir 2023*, pp. 591–596, 2023.
- [5] R. T. Bethary and D. E. Intari, "Modulus Resilien Campuran Beraspal Modifikasi Polimer AC-WC Menggunakan Filler Gypsum," *J. Transp.*, vol. 21, no. 3, pp. 165–172, 2021.
- [6] Suherman, "Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lapis Antara (AC-BC) Yang Menggunakan Material Hasil Daur Ulang (RAP) AC Lapis Antara (AC-Binder Course, AC- BC) Dan AC Lapis Pondasi (AC-Base) Perencanaan Campuran Beton Aspal Lapis," *Sains Teknol. dan Ind.*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58, 2012.
- [7] M. Herfacrul Rafi and B. W. Widiyanto, "Kajian Stabilitas Marshall Ac-Base Perkerasan Landasan Pacu Bandara Menggunakan Spesifikasi Teknis Kp 14 Tahun 2021," *Ftsp*, no. STABILITAS MARSHALL AC-BASE PERKERASAN LANDASAN PACU BANDARA, pp. 164–169, 2024.
- [8] W. W. Farlin Rosyad, Redho Muhammad Sakti, Irham, "ANALISIS PENGARUH SUBSTITUSI BAN BEKAS TERHADAP DURABILITAS DAN FLEKSIBILITAS ASPAL AC-WC," *Rang Tek. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 263–266, 2024.
- [9] S. Melyan, L. D. Putri, and H. Rahmat, "Pemanfaatan Serbuk Karet Ban Bekas Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Ac-Wc Untuk Meningkatkan Karakteristik Marshall," *J. Tek.*, vol. 20, no. 1, pp. 37–44, 2026.
- [10] M. Bilema, C. W. Yuen, M. Alharthai, Z. H. Al-Saffar, A. Al-Sabaei, and N. I. M. Yusoff, "A Review of Rubberised Asphalt for Flexible Pavement Applications: Production, Content, Performance, Motivations and Future Directions," *Sustain.*, vol. 15, no. 19, 2023, doi: 10.3390/su151914481.
- [11] N. S. Mashaan, A. H. Ali, M. R. Karim, and M. Abdelaziz, "A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement," *Sci. World J.*, vol. 2014, no. i, 2014, doi: 10.1155/2014/214612.
- [12] E. M. Basuki and B. W. Widiyanto, "Perbandingan Umur Layan terhadap Perubahan Nilai Parameter Desain pada Perkerasan Kaku di Apron Bandar Udara," *J. Berk. Forum Stud. Transp. antar Perguru. Tinggi*, vol. 2, no. 3, 2024.
- [13] M. A. Amrin, A. Gaus, and M. Darwis, "Studi Kuat Tarik Tidak Langsung Pada Campuran Asphalt Concrete Menggunakan Asbuton," *J. Sipil Sains*, vol. 7, no. 14, pp. 1–12, 2017, [Online]. Available: <http://ejournal.unkhair.ac.id/index.php/sipils/article/view/499>
- [14] A. A. Tiara Kusuma Rini, Wahyudi Pratama, "PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH KARET BAN TERHADAP KUAT TEKAN MARSHALL PADA CAMPURAN BETON ASPAL," pp. 79–102.
- [15] R. Ferbiansyah, A. M. Indriani, and G. Utomo, "Analisis Durabilitas Campuran AC-WC Menggunakan Asphalt Buton Pen 60 / 70 dan Asphalt PG76 Perbandingan 40 : 60," no. November, pp. 16–17, 2023.
- [16] M. Aboutalebi Esfahani and M. Namavar Jahromi, "Optimum parafibre length according to mechanical properties in hot mix asphalt," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 3, pp. 683–700, 2020, doi: 10.1080/14680629.2018.1527240.
- [17] B. W. Widiyanto, O. Purwanti, S. Triana, and N. Fauziyah, "Penentuan Modulus Resilien Berdasarkan Indirect Tensile Strength (ITS) pada Campuran AC-WC Menggunakan Aspal PG-76 dengan Gradasi KP 14 Tahun 2021," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 11, no. 02, pp. 117–126, 2025.
- [18] B. W. Widiyanto, raden christophorus Audiwahyu, and E. M. Basuki, "Model Penurunan Umur Layan terhadap Perubahan Nilai Parameter Desain Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku Runway Bandar Udara," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 09, no. 02, pp. 80–90, 2022, doi: 10.26760/rekaracana.v2i2.1.
- [19] A. Almusawi, B. Sengoz, and A. Topal, "Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, p. 121140, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121140.
- [20] D. Sarwono, F. Pungky Pramesti, and F. M. Nugroho, "Studi Karakteristik Campuran Asphalt Concrete Wearing Course Dengan Asbuton Emulsi Sebagai Bahan Pengikat," *e-Jurnal MATRIKS Tek. SIPIL*, p. 1349, 2017.
- [21] Y. T. Rante and Susilowati, "Analisis Campuran Panas Aspal Beton (LASTON AC- WC) dengan Batas Gradasi Menerus Agregat Campuran No. IV (Quarry Ex . Kali Mio, Desa Mio, NTT)," *Bul. Profesi Ins.*, vol. 7, no. 2, pp. 71–80, 2024.

- [22] M. Naser, M. Abdel-Jaber, R. Al-Shamayleh, R. Ibrahim, N. Louzi, and T. AlKhrissat, "Improving the Mechanical Properties of Recycled Asphalt Pavement Mixtures Using Steel Slag and Silica Fume as a Filler," *Buildings*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/buildings13010132.
- [23] B. Guo, X. Pei, M. Xu, and T. Li, "Analyzing Rainfall Threshold for Shallow Landslides Using Physically Based Modeling in Rasuwa District, Nepal," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/w14244074.