



Analisis Karakteristik *Marshall* pada Campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)* dengan Aspal Pen 60/70 Campur Serbuk Ban Karet

Fransiska Dona Artha¹, Gaffar Ali Akbar², Risdiyanto³, Nur Ayu Diana^{4*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia, Email (dona@janabadra.ac.id)

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia, Email (gaffarali@gmail.com)

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia, Email (risdiyanto@janabadra.ac.id)

⁴Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia, Email (nurayu@janabadra.ac.id)

STATUS ARTIKEL

Dikirim 24 April 2026

Direvisi 29 April 2026

Diterima 13 Mei 2026

Kata Kunci:

AC-WC, Marshall, Serbuk ban karet

ABSTRAK

Lapisan Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) merupakan bagian perkerasan yang secara langsung menanggung beban kendaraan, sehingga dituntut memiliki tingkat stabilitas dan ketahanan yang tinggi. Salah satu pendekatan untuk meningkatkan performa campuran sekaligus menerapkan prinsip konstruksi berkelanjutan adalah penggunaan limbah serbuk ban karet sebagai bahan aditif pada aspal. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) dan kadar karet optimum (KKO), serta mengkaji pengaruh variasi penambahan serbuk ban terhadap parameter Marshall. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan pendekatan Marshall berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Variasi kadar aspal yang digunakan dalam penentuan KAO meliputi 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; dan 7%. Setelah nilai KAO diperoleh, dilakukan penambahan serbuk ban karet menggunakan metode pencampuran basah dengan variasi 0%; 2%; 4%; 6%; dan 8% terhadap berat aspal. Parameter yang dievaluasi meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VITM, VFWA, dan VMA. Hasil menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban karet mampu meningkatkan nilai stabilitas dan MQ, dengan kondisi optimum pada kadar 4%, yaitu stabilitas sebesar 1394 kg dan MQ sebesar 449,68 kg/mm, atau mengalami peningkatan sekitar 24,6% dibandingkan campuran tanpa penambahan karet. Namun, pada kadar 8% terjadi penurunan VITM menjadi 2,78% yang berada di bawah batas spesifikasi. Kadar serbuk ban karet optimum sebesar 4% memberikan peningkatan signifikan terhadap karakteristik Marshall dan memenuhi spesifikasi teknis, sehingga berpotensi diterapkan sebagai alternatif campuran AC-WC yang lebih kuat dan berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

Berikut ringkasan dari teks tersebut:

Pemanfaatan serbuk ban karet (*crumb rubber*) sebagai bahan modifikasi aspal menjadi solusi inovatif yang tidak hanya meningkatkan performa campuran (elastisitas, ketahanan deformasi, dan viskositas), tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari limbah ban. Campuran AC-WC yang berfungsi sebagai lapisan perkerasan yang secara langsung menahan beban lalu lintas harus memiliki sifat mekanik dan karakteristik volumetrik yang baik untuk mencegah kerusakan seperti rutting dan retak. Penelitian terdahulu menjelaskan bahwa serbuk ban karet mampu menambah nilai stabilitas dan kekakuan, tetapi memengaruhi parameter volumetrik serta berisiko menimbulkan retak jika kadarnya berlebih. Oleh karena itu, dalam penelitian ini serbuk ban karet yang digunakan merupakan material yang lolos saringan No.16 dengan metode pencampuran basah pada variasi kadar 0–8% untuk menentukan KAO, KKO, dan menganalisis pengaruhnya terhadap karakteristik Marshall yang diaplikasikan pada campuran AC-WC dengan menggunakan aspal penetrasi 60/70.

2. METODE

2.1 Metode Penelitian

Pada Penelitian ini menerapkan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan *Marshall mix design* untuk mengevaluasi karakteristik campuran AC-WC yang dimodifikasi menggunakan serbuk ban karet. Variabel terikat ada pada karakteristik *Marshall* dan variabel bebasnya adalah penambahan serbuk ban karet pada campuran AC-WC untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik fisik dan mekanik, termasuk nilai stabilitas serta kelelahan campuran. Cara ini dipilih karena masih menjadi standar desain campuran beraspal panas di Indonesia sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 serta umum digunakan dalam evaluasi campuran aspal modifikasi (Bina Marga, 2018; Heriadi et al., 2023). Tahapan penelitian mencakup penyiapan material, pengujian karakteristik fisik bahan, pembuatan serta pengujian campuran, hingga analisis data guna memperoleh kadar aspal optimum (KAO) dan menilai kinerja campuran yang dimodifikasi.

2.2 Material Penelitian

Aspal dengan penetrasi 60/70 digunakan sebagai bahan pengikat utama dalam campuran. Karakteristiknya diuji melalui parameter penetrasi, titik lembek, daktilitas, titik nyala, kelarutan, dan berat jenis dengan mengacu pada standar pengujian Bina Marga (2018). Aspal dengan Pen 60/70 dipilih karena merupakan binder yang umum digunakan pada konstruksi jalan nasional di Indonesia (Syahputra et al., 2019).

Agregat terdiri dari agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah dengan gradasi ukuran tertentu, sedangkan agregat halus berasal dari pasir alam yang lolos ayakan No. 8 dan tertahan pada ayakan No. 200, serta dilengkapi dengan bahan pengisi (*filler*).

Gradasi campuran dirancang berdasarkan batas tengah spesifikasi AC-WC sesuai ketentuan Bina Marga tahun 2018. Pemilihan gradasi tengah dilakukan untuk meminimalkan deviasi terhadap batas atas dan bawah spesifikasi (Hadiwardoyo et al., 2019). Pengujian agregat mencakup pemeriksaan berat jenis, daya serap, keausan dengan metode Los Angeles, serta analisis gradasi melalui pengayakan.

Serbuk karet diperoleh dari ban bekas yang telah melalui proses penggilingan hingga berbentuk butiran halus, dan disaring sesuai dengan ukuran yang diinginkan. Penambahan dilakukan terhadap berat aspal dengan metode pencampuran basah (*wet process*), yaitu serbuk karet (*crumb rubber*) dicampurkan terlebih dahulu ke dalam aspal yang telah dipanaskan sebelum kemudian digabungkan dengan agregat (Singh et al., 2022). Metode ini dilaporkan mampu meningkatkan interaksi kimia dan fisik antara karet dan binder dibandingkan metode kering (*dry process*) (Zhao et al., 2023). Variasi kadar serbuk ban karet yang digunakan adalah 0% (sebagai kontrol), 2%, 4%, 6%, dan 8%, dengan persentase yang dihitung terhadap berat aspal.

2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan sistematis yang meliputi pengujian karakteristik material, perencanaan campuran dan penentuan kadar aspal optimum (KAO), pelaksanaan uji Marshall untuk memperoleh nilai KAO, pembuatan campuran dengan penambahan serbuk ban karet, pengujian marshall setelah diperoleh KAO, dan analisis data.

Pengujian Karakteristik Marshall

Pengujian awal dilakukan untuk memastikan seluruh material memenuhi spesifikasi teknis, terdiri dari pemeriksaan karakteristik aspal, analisis saringan agregat, dan pemeriksaan berat jenis agregat. Tahapan ini bertujuan untuk menjamin bahwa variasi hasil pengujian Marshall murni disebabkan oleh perubahan kadar aspal dan serbuk karet, bukan karena ketidaksesuaian material dasar (Liu et al., 2021). Persyaratan terkait sifat-sifat campuran sesuai ketentuan Bina Marga tahun 2018 ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Kriteria Karakteristik *Marshall* pada Aspal Beton AC-WC

No	Karakteristik Campuran	Nilai
1	Stabilitas	Minimum 800 kg
2	Flow	2-4 mm
3	MQ	250 kg/mm
4	VITM	3-5%
5	VFWA	Minimum 65%
6	VMA	Minimum 15%

Perencanaan Campuran Dan Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Tahapan awal perencanaan campuran adalah menentukan proporsi agregat berdasarkan gradasi tengah spesifikasi AC-WC, kemudian menghitung kadar aspal perkiraan campuran, dan terakhir menentukan rentang kadar aspal sebesar $\pm 1\%$ dari nilai estimasi tersebut dengan kenaikan interval 0,5%. Kadar aspal perkiraan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1).

$$Pb = 0,035(CA) + 0,045(FA) + 0,18(F) + K \quad (2.1)$$

Keterangan:

Pb = Perkiraan kadar aspal rencana awal

CA= Persentase agregat kasar tertahan ayakan No.8 (2,36 mm)

FA= Persentase agregat halus lolos ayakan No.8 dan tertahan ayakan No.200 (0,075 mm)

F = Persentase bahan pengisi (*filler*) lolos ayakan No.200.

K = Konstanta

Setiap variasi kadar aspal dibuat minimal tiga buah sampel dengan berat keseluruhan campuran ± 1200 gram. Pemadatan dilakukan sebanyak 75 tumbukan pada masing-masing sisi memakai mesin penumbuk Marshall mengacu pada standar kondisi lalu lintas berat (Bina Marga, 2018).

Pengujian Marshall Untuk Menentukan KAO

Pengujian Marshall dilakukan sesuai prosedur standar dengan pemadatan 75 tumbukan per sisi dengan kecepatan pembebanan 50 mm/menit dan suhu pengujian 60°C. Pengujian dilakukan setelah benda uji direndam selama Parameter yang diukur meliputi stabilitas (kg), *flow* (mm), *Marshall Quotient* (MQ), *Void in The Mix* (VITM), *Void Filled with Asphalt* (VFWA), dan *Void in Mineral Aggregate* (VMA). Penentuan KAO dilakukan berdasarkan kriteria stabilitas maksimum, VITM dalam rentang 3–5%, *Flow* dalam rentang 2–4 mm, VFWA $\geq 65\%$, dan VMA $\geq 15\%$. Metode ini konsisten dengan prosedur desain Marshall klasik yang masih banyak digunakan pada penelitian campuran aspal modifikasi (Mashaan et al., 2014). Nilai KAO diperoleh dari rata-rata kadar aspal yang memenuhi seluruh kriteria tersebut (Candra & Siswanto, 2019).

Pembuatan Campuran Dengan Serbuk Ban Karet

Setelah diperoleh nilai KAO, dibuat variasi penambahan serbuk ban karet sebesar 0%,

2%, 4%, 6%, dan 8% berdasarkan banyak aspal yang digunakan. Rentang tersebut dipilih berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan kadar optimum umumnya berada pada rentang 3–6% (Heriadi et al., 2023; Hamzah et al., 2024). Proses pembuatan sampel yang melibatkan variasi kadar serbuk ban karet tersebut dilaksanakan dengan mekanisme cara basah (*wet process*).

Aspal dipanaskan hingga suhu $\pm 160^{\circ}\text{C}$, kemudian serbuk ban karet dicampurkan dan diaduk selama ± 30 menit untuk memastikan homogenitas sebelum dicampur dengan agregat panas. Metode *wet process* dipilih karena menghasilkan interaksi lebih baik antara serbuk ban karet dan binder dibanding *dry process* (Behnood & Olek, 2017; Singh et al., 2022). Pengujian Marshall dilakukan kembali pada benda uji tersebut. Parameter volumetrik dihitung menggunakan persamaan standar Marshall sesuai Bina Marga (2018). MQ digunakan sebagai indikator kekakuan relatif campuran dan kestabilan struktur terhadap beban tetap (Hamkah et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemeriksaan Aspal

Hasil pemeriksaan karakteristik aspal menunjukkan bahwa semua parameter masih berada dalam batas spesifikasi yang ditetapkan sesuai standar Bina Marga tahun 2018. Nilai penetrasi 65,5 (0,1 mm), titik lembek 52°C , daktilitas 164 cm, titik nyala 320°C , kelarutan 99,2%, dan berat jenis $1,02\text{ g/cm}^3$ menunjukkan aspal memiliki viskositas dan plastisitas yang memadai untuk aplikasi *wearing course* (Bina Marga, 2018). Hasil pemeriksaan aspal ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Aspal

	Jenis Pengujian	Persyaratan		Hasil
		Min	Maks	
1	Penetrasi 25°C , (0,1 mm)	60	70	65,5
2	Titik Lembek ($^{\circ}\text{C}$)	48	-	52
3	Daktilitas Pada 25°C , (cm)	100	-	164
4	Titik Nyala ($^{\circ}\text{C}$)	232	-	320
5	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	99	-	99,2
6	Berat Jenis	1,0	-	1,02

3.2 Desain Proporsi Campuran AC-WC

Berikut ringkasannya:

Perencanaan proporsi agregat berdasarkan pada ketentuan Bina Marga tahun 2018 dengan menggunakan nilai tengah gradasi. Susunan agregat terdiri atas agregat kasar (ukuran $\frac{3}{4}$ " hingga tertahan pada saringan No. 4), agregat halus (lolos saringan No. 4 dan tertahan pada No. 200), serta bahan pengisi atau filler (lolos saringan No. 200). Dari hasil perencanaan gradasi diperoleh proporsi agregat kasar sebesar 39%, agregat halus 54,5%, dan filler 6,5%.

Tabel 3.2 Desain Proporsi Campuran AC-WC

Ukuran Saringan		Lolos Saringan %			Tertahan Ideal Kum (%)	Tertahan Ideal masing2 (%)
(mm)	ASTM	max	min	renc. ideal		
19	$\frac{3}{4}$ "	100	100	100	0	0
12,5	$\frac{1}{2}$ "	100	90	95	5	5
9,5	$\frac{3}{8}$ "	90	77	83,5	16,5	11,5

4,75	No.4	69	53	61	39	22,5
2,36	No. 8	53	33	43	57	18
1,18	No. 16	40	21	30,5	69,5	12,5
0,6	No. 30	30	14	22	78	8,5
0,3	No. 50	22	9	15,5	84,5	6,5
0,15	No. 100	15	6	10,5	89,5	5
0,075	No. 200	9	4	6,5	93,5	4
Pan	Pan				100	6,5

3.3 Penghitungan Kadar Aspal Perkiraan

Setelah didapatkan komposisi kadar agregat, dilakukan penghitungan untuk mencari kadar aspal perkiraan menggunakan persamaan (2.1) berikut.

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%F) + K$$

$$P_b = 0,035 (39) + 0,045 (54,5) + 6,5 + 1$$

$$P_b = 5,98 \%$$

$$P_b = 6 \%$$

Perkiraan awal kadar aspal diperoleh sebesar 6%. Selanjutnya dilakukan pengujian dengan variasi kadar aspal yaitu 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; dan 7%. Variasi tersebut dimaksudkan untuk menilai karakteristik campuran pada berbagai kadar aspal, sehingga dapat ditentukan nilai KAO dengan performa terbaik.

3.4 Pemeriksaan *Marshall* untuk Menentukan KAO

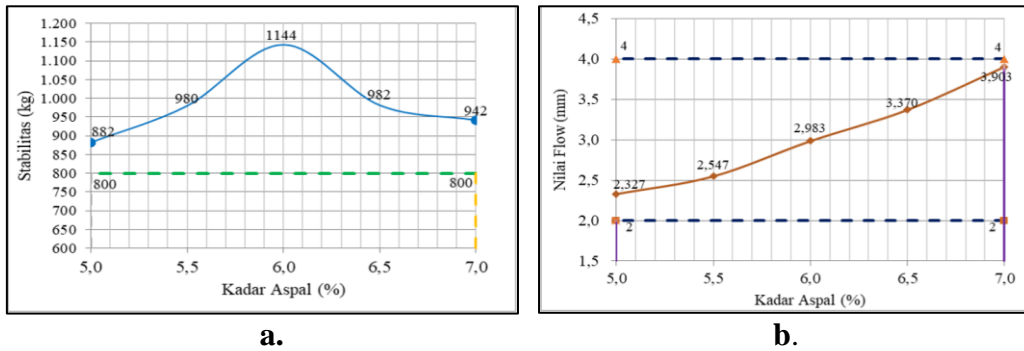
Berdasarkan hasil pemeriksaan *Marshall* diperoleh nilai – nilai karakteristik *Marshall* untuk mencari KAO, ditunjukkan pada **Tabel 3.3** di bawah ini.

Tabel 3.3 Tabulasi Pengujian *Marshall* Mencari KAO

Kadar Aspal	Stabilitas	Flow	MQ	VITM	VFWA	VMA
	(kg)	(mm)	(kg/mm)	(%)	(%)	(%)
5%	882	2,327	379,08	5,65	66,31	14,696
5,50%	980	2,547	384,82	4,84	71,66	15,03
6%	1144	2,983	383,46	4,13	76,38	15,45
6,50%	982	3,37	291,39	3,71	79,55	16,12
7%	942	3,903	241,33	2,91	84,25	16,45
	Min. 800	2 s/d 4	250	3 s/d 5	Min. 65	Min. 15

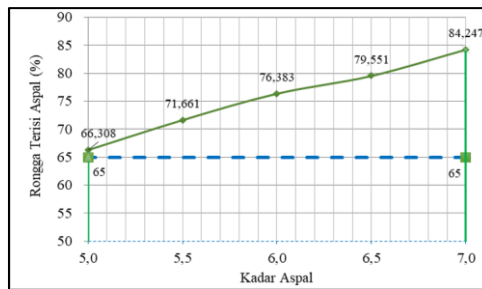
Rincian grafik hubungan antara kadar aspal dan parameter hasil pengujian *Marshall* disajikan pada Gambar 3.1 sampai Gambar 3.5. Pada **Gambar 3.1a** terlihat bahwa peningkatan kadar aspal diikuti oleh kenaikan nilai stabilitas hingga mencapai titik maksimum pada kadar optimum, kemudian mengalami penurunan. Nilai stabilitas optimum campuran AC-WC dalam penelitian ini adalah sebesar 1144 kg pada kadar aspal 6%, yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu lebih dari 800 kg.

Gambar 3.1b menunjukkan bahwa peningkatan kadar aspal diikuti oleh kenaikan nilai flow. Hal ini terjadi karena penambahan aspal memengaruhi sifat mekanis campuran beton aspal. Nilai flow terendah tercatat sebesar 2,327 mm pada kadar aspal 5%, sedangkan nilai tertinggi mencapai 3,903 mm pada kadar aspal 7%. Seluruh nilai flow yang diperoleh masih berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu 2–4 mm.



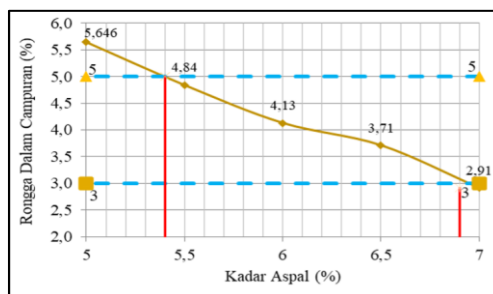
Gambar 3.1 a. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas, **b.** Kadar Aspal dengan Flow

VFWA merupakan persentase rongga dalam campuran beton aspal yang terisi oleh aspal, yang dinyatakan dalam satuan persen (%). Pada **Gambar 3.3** dapat dilihat seiring bertambahnya kadar aspal maka bertambah juga persentase VFWA. Hal ini disebabkan banyaknya aspal yang mengisi ruang kosong dari campuran hingga seluruhnya terisi. Nilai VFWA terendah sebesar 66,308% pada aspal 5%, dan tertinggi sebesar 84,247% pada aspal 7%. Nilai VFWA pada pengujian ini telah memenuhi ketentuan Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu lebih dari 65%.



Gambar 3.3 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VFWA

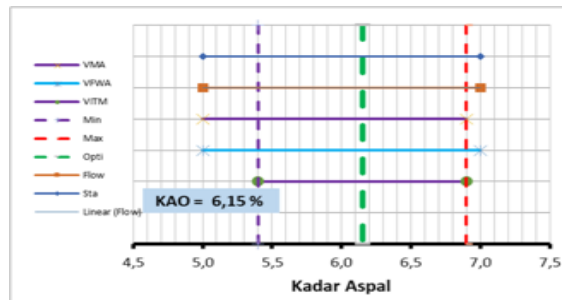
VITM merupakan persentase rongga total dalam campuran beton aspal. **Gambar 3.4** menunjukkan bertambahnya kadar aspal menyebabkan berkurangnya VITM. Hal ini dikarenakan saat kadar aspal bertambah, aspal mengalir ke dalam rongga – rongga antar partikel agregat sehingga volume ruang kosong menjadi lebih kecil. Nilai VITM pada pengujian ini ada yang masuk dalam rentang spesifikasi Bina Marga, yaitu antara 3 sampai dengan 5%.



Gambar 3.4 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VITM (Rongga Dalam Campuran)

Berdasarkan hasil *Marshall* diperoleh nilai kadar aspal tertinggi sebesar 6,15% (**Gambar 3.5**). Setelah didapatkan nilai KAO, dilakukan perhitungan proporsi agregat berdasarkan nilai

KAO. Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji dengan variasi penambahan serbuk ban karet sebesar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%.



Gambar 3.5 Grafik Nilai Kadar Aspal Optimum Campuran AC-WC

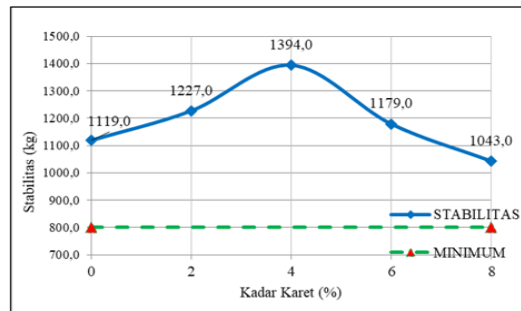
3.5 Karakteristik Marshall setelah Penambahan Serbuk Ban Karet

Pengujian dilakukan pada KAO 6,15% dengan metode pencampuran basah (*wet process*). Pada **Tabel 3.4** disajikan hasil pemeriksaan Marshall setelah KAO dan penambahan serbuk ban karet.

Tabel 3.4 Hasil Pemeriksaan Marshall setelah KAO pada Penambahan Serbuk Ban Karet

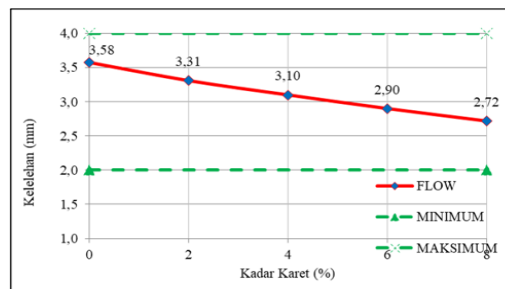
Kadar Karet	Stabilitas	Flow	MQ	VITM	VFWA	VMA
	(kg)	(mm)	(kg/mm)	(%)	(%)	(%)
0 %	1119	3,577	312,86	3,97	77,51	15,617
2 %	1227	3,310	370,69	3,67	78,91	15,36
4 %	1394	3,100	449,68	3,37	80,34	15,1
6 %	1179	2,900	406,55	3,08	81,77	14,84
8 %	1043	2,717	383,93	2,78	83,29	14,58
	Min. 800	2 - 4	250	3 - 5	Min. 65	Min. 15

Berdasarkan hasil stabilitas pada **Gambar 3.6**, semakin besar penambahan kadar karet, maka nilai stabilitas campuran cenderung semakin meningkat. Nilai stabilitas tertinggi tercatat sebesar 1394 kg, kemudian mengalami penurunan pada kadar karet 6%. Penambahan kadar karet yang berlebihan membuat campuran menjadi lebih getas, mengurangi kemampuannya untuk menahan tekanan, dan menurunkan nilai stabilitas. Hal ini sesuai dengan penelitian Khairani dkk. (2018), di mana pada kadar parutan karet 4% dan 5%, nilai stabilitas justru menurun hingga berada di bawah batas spesifikasi minimum. Hal ini terjadi karena penambahan parutan ban yang semakin besar menyebabkan aspal tidak mampu melapisi agregat secara optimal. Nilai stabilitas terus mengalami peningkatan hingga mencapai kadar 6% tanpa menunjukkan penurunan, karena tekstur *crumb rubber* yang lebih kasar membuat aspal menjadi lebih keras (Al Faritziehijriah dkk., 2021).



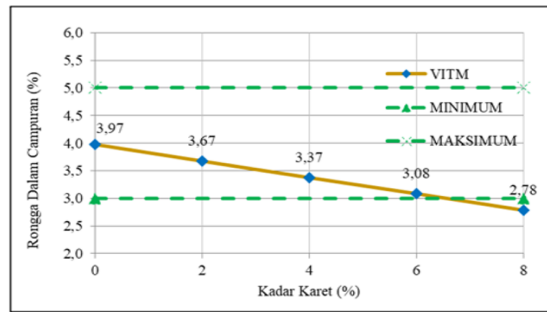
Gambar 3.6 Grafik Hubungan Kadar Karet dengan Stabilitas

Data pada **Gambar 3.7** menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban karet dalam jumlah yang lebih besar mengakibatkan penurunan nilai kelelehan (*flow*) secara signifikan. Kelelehan terkecil sebesar 2,72 mm yaitu pada penambahan kadar karet 8%. Penambahan kadar karet menyebabkan perubahan sifat mekanis campuran beton aspal. Penambahan karet memberikan efek penguatan pada aspal sehingga mengurangi kemampuan campuran untuk mengalami deformasi plastis ketika menerima beban. Nilai kelelehan yang terlalu rendah mengindikasikan bahwa campuran menjadi terlalu kaku, sehingga berpotensi lebih mudah mengalami retak akibat beban berulang, terutama pada suhu rendah atau lalu lintas berat. Hal ini sesuai dengan penelitian Al Faritziehijriah et al. (2021), di mana nilai *flow* yang naik pada saat penambahan kadar karet 2% dan turun hingga penambahan kadar karet 6% yang disebabkan karena penambahan kadar karet membuat campuran lebih kaku.



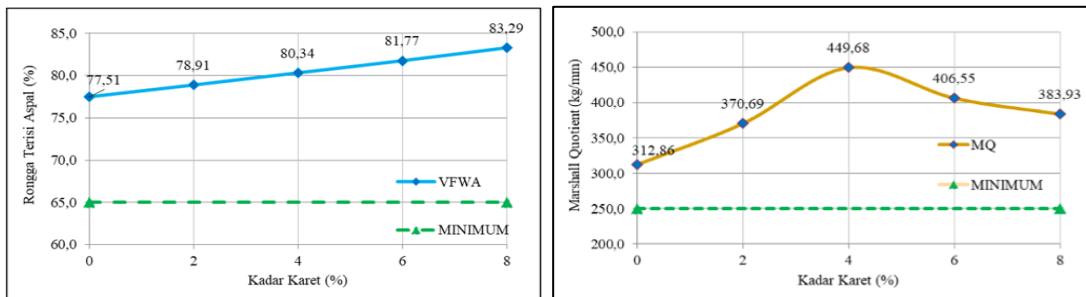
Gambar 3.7 Grafik Hubungan Kadar Karet dengan Kelelehan

Gambar 3.8 menunjukkan bahwa semakin tinggi penambahan kadar karet maka semakin turun nilai VITM. Penambahan karet pada campuran beton aspal mengubah struktur mikro campuran. Karet cenderung mengisi celah di antara partikel agregat halus, sehingga menurunkan jumlah rongga udara (*void*) dalam campuran. Karet juga bersifat elastis, yang memungkinkan campuran menjadi lebih rapat saat dipadatkan. Ketika kadar karet dalam campuran meningkat, lebih banyak ruang antar agregat yang sebelumnya kosong (*voids*) diisi oleh partikel karet. Hal ini menyebabkan nilai VITM menurun secara bertahap. Nilai VITM yang tidak memenuhi batas minimum terjadi pada penambahan serbuk ban karet sebesar 8%, yaitu 2,78%, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kadar 4% sebesar 3,97%. Hal ini sesuai dengan penelitian Iqbal (2023), di mana nilai VITM mengalami penurunan walaupun tidak signifikan di mana peningkatan serbuk ban karet memudahkan proses pengisian rongga pada campuran beton aspal. Pada penelitian Faisal et al. (2014) menjelaskan bahwa terjadi penurunan nilai VITM setiap penambahan serbuk ban karet.



Gambar 3.8 Grafik Hubungan Kadar Karet dengan VITM (Rongga Dalam Campuran)

Berdasarkan hasil pengujian *Void Filled with Asphalt*, terlihat bahwa peningkatan kadar karet diikuti oleh kenaikan nilai VFWA (**Gambar 3.9a**). Nilai VFWA tertinggi pada penambahan karet variasi 8% sebesar 83,29%, dan terendah pada variasi 0% yaitu sebesar 77,51%. Ketika karet dimasukkan ke dalam campuran, karet berperan menjadi bahan pengisi elastis yang membantu binder aspal mengisi rongga-rongga dalam agregat dengan lebih efektif. Selain itu, karet juga meningkatkan viskositas binder, menjadikannya lebih kental dan mampu menempel dengan lebih baik pada permukaan agregat. Peningkatan nilai VFWA ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih padat serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh air dan proses oksidasi. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Oktaviastuti et al. (2020), yaitu penambahan serbuk ban karet menyebabkan rongga terisi aspal semakin meningkat. Penelitian Iqbal (2023), mendapatkan hasil yang serupa yaitu penambahan kadar serbuk ban karet meningkatkan nilai VFWA.



Gambar 3.9a. Grafik Hubungan Kadar Karet dengan VFMA (Rongga Terisi Aspal), **b.** Kadar Karet dengan *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran. Parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai kualitas campuran aspal agar mampu menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi yang berlebihan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai MQ meningkat seiring bertambahnya kadar serbuk ban karet, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan dan ketahanan campuran. Namun, pada kadar karet optimum, nilai MQ justru turun, mengindikasikan bahwa kelebihan kadar karet dapat mengurangi fleksibilitas campuran. **Gambar 3.9b** menunjukkan MQ tertinggi 449,68 kg/mm pada serbuk karet 4%, sedangkan nilai terendah sebesar 312,86 kg/mm pada kadar karet 0%. Penambahan serbuk ban karet pada proporsi yang sesuai dapat memperbaiki kinerja campuran aspal, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas.

4. KESIMPULAN

Campuran AC-WC tanpa modifikasi memiliki Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 6,15%. Penambahan serbuk ban karet secara signifikan meningkatkan kinerja campuran, dengan kondisi optimum pada kadar 4% yang menghasilkan stabilitas tertinggi (1394 kg) dan peningkatan kekakuan tanpa deformasi berlebih. Namun, penambahan hingga 8% menurunkan VITM di bawah batas spesifikasi sehingga berpotensi menurunkan durabilitas. Secara keseluruhan, penggunaan serbuk ban karet efektif meningkatkan ketahanan struktural campuran AC-WC selama masih dalam kadar optimum.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmagid, A. A. A., & Pei Feng, C. (2019). Evaluating the Effect of Rice-Husk Ash and Crumb-Rubber Powder on the High-Temperature Performance of Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002962](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002962)
- Al Faritziehijriah, H., Fitriana Umari, Z., & Panjaitan, R. (2021). Analisis Kadar Optimum Serbuk Karet Ban Dalam Bekas pada Campuran Aspal. *TAPAK*, 11(1), 29–35. <http://u.lipi.go.id/1320332466>
- Ardiansya, M., Harianto, & Sahara. (2018). STRATEGY TO INCREASE THE COMPETITIVENESS OF INDONESIA TIRE INDUSTRY IN THE INTERNATIONAL MARKET. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 85(1), 73–80. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2018-12.09>
- Azhari, D. (2018). Analisis Pengaruh Penggunaan Crumb rubber Sebagai Bahan Penambah Aspal Dengan Filler Abu Cangkang Sawit Untuk Campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Faisal, Shaleh, S. M., & Isya, M. (2014). Karakteristik Marshall Campuran Aspal Beton AC-BC Menggunakan Material Agregat Basalt dengan Aspal Pen. 60/70 dan Tambahan Parutan Ban Dalam Bekas Kendaraan Roda 4. *Jurnal Teknik Sipil*, 3, 38–48.
- Hainin, M. R., Warid, M. N. M., Izzul, R., Ruzaini, M. K., & Mohd Ibrahim, M. Y. (2014). Investigations of rubber dipping by-product on bitumen properties. *Advanced Materials Research*, 911, 449–453. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.911.449>
- Hidayat, K., Pristyawati, T., & Safarizki, H. A. (2023). A Change in the Indeks of Retained Strength in the AC-WC Mixture with the Additional Waste Rubber from Used Tires (Crumb Rubber). *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 7(1), 10–18. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v7i1.16911>
- Iqbal. (2023). Pengaruh Penambahan Serbuk Ban Karet terhadap Karakteristik Campuran Hot Rolled Sheet dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap. Universitas Islam Indonesia.
- Khairani, C. DE, Saleh, S. M., & Sugiarto. (2018). Uji Marshall pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) dengan Tambahan Parutan Ban Bekas. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(3), 559–570.
- Nugroho, S. K., Setyawan, A., & Budiarto, A. (2023). Structural Analysis and Service Life Prediction of Rubberized Thin Surfacing Hot Mix Asphalt. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 55(5), 538–547. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2023.55.5.3>
- Oktaviastuti, B., Nurmalasari, R., & Damayanti, D. F. (2020). Urgensi Technical Skill Bagi Tenaga Kerja Konstruksi dalam Era Industri 4.0. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Madura*, 5(Desember), 7–10. <http://www.pu.go.id>.
- Pendidikan, P., Sda, D. P., & Konstruksi, D. (n.d.). *Prinsip Dasar Sistem Teknologi BIM dan Implementasinya di Indonesia*.
- Tang, N., Huang, W., & Xiao, F. (2016). Chemical and rheological investigation of high-cured crumb rubber-modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 123, 847–854.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.131>

Zhao, Z., Xiao, F., Toraldo, E., Crispino, M., & Ketabdari, M. (2023). Effect of *crumb rubber* and reclaimed asphalt pavement on viscoelastic property of asphalt mixture. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139422. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139422>