

STUDI PERBANDINGAN KARAKTERISTIK MARSHALL PADA CAMPURAN AC-WC CAMPUR SERBUK BAN KARET DENGAN METODE PENCAMPURAN KERING DAN BASAH

Giri Widhiatmoko

Jurusan Teknik Sipil
Universitas Islam Indonesia
Jalan Kaliurang Km 14.5, Sleman,
Yogyakarta
225104605@uii.ac.id

Muhamad Abdul Hadi

Jurusan Teknik Sipil
Universitas Islam Indonesia
Jalan Kaliurang Km 14.5, Sleman,
Yogyakarta
muhamad.abdul.hadi@uii.ac.id

Abstract

Infrastructure growth in Indonesia has driven innovation in asphalt concrete mixes, one of which is through the addition of rubber tire powder using dry and wet mixing methods. This study compares the Marshall characteristics of the two methods. The methods used in this study are dry and wet mixing methods using #8 rubber tire powder. The results show that the effectiveness of rubber powder is greatly influenced by its content and mixing method. The wet mixing method demonstrated more stable and homogeneous performance at a content of 2–4%, while the dry method was optimal at a content of 50–60%. However, at high contents, some parameters did not meet technical specifications. Therefore, proper control of content and mixing methods is necessary to achieve optimal mixture results.

Keywords: *dry mix, wet mix, marshall, crumb rubber*

Abstrak

Pertumbuhan infrastruktur di Indonesia mendorong inovasi pada campuran beton aspal, salah satunya melalui penambahan serbuk ban karet menggunakan metode pencampuran kering dan basah. Penelitian ini membandingkan karakteristik Marshall dari kedua metode. Metode pada penelitian ini menggunakan metode pencampuran kering dan basah dengan menggunakan serbuk ban karet ukuran #8. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas serbuk karet sangat dipengaruhi oleh kadar dan metode pencampurannya. Metode pencampuran basah menunjukkan performa lebih stabil dan homogen pada kadar 2–4%, sedangkan metode kering optimal pada kadar 50–60%. Namun, pada kadar tinggi, beberapa parameter tidak memenuhi spesifikasi teknis. Oleh karena itu, diperlukan kontrol kadar dan metode yang tepat untuk hasil campuran yang optimal.

Kata-kata kunci: campuran kering, campuran basah, Marshall, serbuk karet

PENDAHULUAN

Jalan merupakan jalur yang berada di atas permukaan tanah yang dimanfaatkan untuk memfasilitasi lalu lintas orang, hewan, serta kendaraan yang membawa barang dari satu lokasi ke lokasi lain secara mudah dan cepat. Indonesia saat ini sedang dalam fase tumbuh di berbagai bidang seperti pendidikan, industri, dan sektor utama lainnya yang membutuhkan sarana transportasi yang tepat untuk mendorong fase pertumbuhan. Salah satunya membuat jalan dengan campuran aspal yaitu kombinasi antara agregat dan aspal. Dalam campuran ini aspal berfungsi sebagai pengikat antar partikel agregat, sementara agregat sebagai penguat, selain itu sifat mekanis campuran aspal berasal dari friksi yang dihasilkan dari *interlocking*

gradasi dan kohesi dari sifat aspal yang digunakan (Azhari, 2018). Untuk lebih meningkatkan perkerasan agar lebih kuat dan efisien dalam menghadapi tantangan dimasa depan akibat perkembangan beberapa sektor maka dibutuhkan modifikasi pada bahan – bahan perkerasan yaitu pada agregat dan aspal. Pada pencampuran modifikasi atau melakukan bahan tambah pada campuran dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode pencampuran kering dan metode pencampuran basah.

Campuran kering merupakan metode pencampuran bahan tambahan dengan aspal tanpa air dan cenderung lebih cepat diaplikasikan di lapangan. Meski praktis, penelitian menunjukkan hasil stabilitas dan modulus resilien yang lebih rendah dibanding campuran basah (Suroso, 2008). Penggunaan serbuk ban bekas juga menurunkan *specific gravity* dan stabilitas (Martina et al., 2019). Namun, modifikasi campuran kering dengan polimer EVA dapat meningkatkan performa mekanis, meski masih terbatas dibanding campuran basah (Daniel et al., 2023).

Campuran basah menawarkan keunggulan dalam hal stabilitas dan daya tahan jangka panjang karena proses pencampuran yang lebih homogen. Penelitian Hasrullah et al. (2023) menjelaskan bahwa metode basah lebih efektif dalam menghasilkan campuran yang homogen antara aspal dan biji plastik. Azmi et al. (2022) melakukan penelitian penambahan limbah karet ban menghasilkan peningkatan nilai VITM, VMA, dan Stabilitas. Dibalik dari peningkatan beberapa hasil dari campuran basah, campuran basah sering memerlukan waktu lebih lama untuk diaplikasikan dan biasanya membutuhkan teknik pengerjaan khusus.

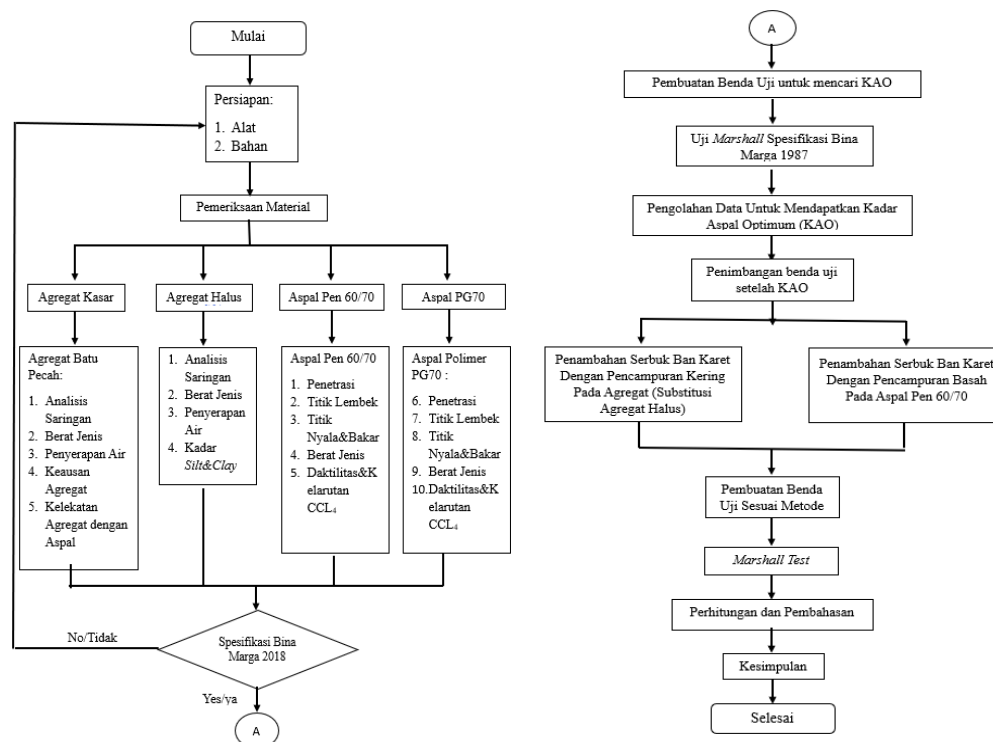
Serbuk ban karet digunakan sebagai bahan tambah untuk meningkatkan elastisitas (Azmi et al., 2022), daya tahan, dan ketahanan retak pada campuran perkerasan jalan. Penelitian menunjukkan bahwa bahan ini dapat mengurangi kerusakan akibat cuaca dan lalu lintas (Sugiyanto, 2009), serta memperbaiki sifat reologi hingga tiga kali lebih tahan dibanding aspal biasa (Azhari, 2018). Dalam metode kering, serbuk dicampur langsung ke agregat, sedangkan pada metode basah, dicampur ke aspal cair pada suhu tinggi agar tercampur merata.

Berdasarkan penjelasan tersebut dapat dirumuskan bahwa pencampuran bahan tambah dengan metode yang berbeda menghasilkan karakteristik campuran yang berbeda juga. Untuk mengetahui perbedaan karakteristik Marshall pada campuran beton aspal dengan metode pencampuran bahan tambah basah dan kering, maka dilakukan penelitian Studi Perbandingan Karakteristik Marshall pada Campuran AC-WC Campur Serbuk Ban Karet dengan Metode Pencampuran Kering dan Basah.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan yaitu metode melaksanakan serangkaian kegiatan percobaan untuk mendapatkan data. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya Universitas Islam Indonesia. Tahapan dalam penelitian ini meliputi pencarian studi pustaka, pengumpulan sumber/referensi, pengujian karakteristik bahan seperti agregat dan aspal,

serta bahan tambahan yang digunakan, yaitu serbuk karet ban bekas. Dalam penelitian (Putra et al., 2023) yang dikutip oleh Widhiatmoko dan Hadi (2024), menjelaskan bahwa penelitian menggunakan serbuk ban yang lolos ayakan No. 8, dan disarankan untuk menggunakan saringan yang lebih halus agar campuran aspal dengan karet menjadi lebih homogen. Penelitian ini menggunakan bahan tambahan serbuk ban karet ayakan saringan No. 8 untuk campuran kering yang dicampurkan pada agregat halus, dan dicampurkan dengan aspal. Secara detail, tahapan penelitian yang dilaksanakan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

Serat limbah ban karet, yang sering disebut sebagai serbuk ban bekas dan dikenal dengan istilah “*tire crumb*” atau “*crumb rubber*,” adalah produk yang ramah lingkungan karena berasal dari ban bekas. Produk ini tidak larut dalam tanah atau air tanah. Selain mengurangi jumlah limbah karet yang dibuang ke lingkungan, pemanfaatan kembali limbah produk karet tertentu juga dapat menurunkan harga karet, yang merupakan salah satu komponen penting dalam menentukan harga produk jadi yang dihasilkan (Azhari, 2018) Adapun ukutan dari serbuk karet dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. Kasar atau besar (3/8 dan 1/4 inch)
2. Sedang (mesh #10-30 atau 0,023 – 0,079 inch)
3. Baik (mesh #40-80 atau 0,007 – 0,016 inch)
4. Sangat Halus (mesh #100-200 atau 0,003 – 0,006 inch)

Dalam menentukan proporsi agregat, digunakan nilai tengah dari batas atas dan bawah dari perencanaan gradasi agregat ada pada Spesifikasi Bina Marga 2018, setelah itu perhitungan komposisi kadar aspal yang tepat dapat dirancang menggunakan rumus kadar aspal perkiraan. kadar aspal perkiraan dengan menggunakan Persamaan (1).

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%Filler) + F \quad (1)$$

dengan :

P_b = Kadar aspal perkiraan (%)

CA = *Coarse aggregate* (agregat kasar)

FA = *Fine aggregate* (agregat halus)

F = Konstanta 0,5% - 1,0% untuk laston

Marshall Test adalah pengujian yang wajib dilakukan untuk campuran aspal, bertujuan untuk mengevaluasi dan memastikan bahwa sifat aspal sesuai dengan yang diharapkan. Melalui tes Marshall, dapat ditentukan persentase kandungan aspal yang diperlukan untuk gradasi batuan yang telah direncanakan, sehingga dapat mencapai kekuatan tekan optimum dari benda uji yang direndam selama 1 jam pada suhu 60°C.

Stabilitas Marshall adalah parameter yang mengukur daya tahan campuran aspal terhadap pemecahan dan deformasi akibat beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Nilai Stabilitas dapat dihitung dengan Persamaan (2).

$$\text{Nilai stabilitas (kg)} = \text{pembacaan arloji stabilitas} \times k \times a_k \times 0,454 \quad (2)$$

Dengan :

k = kalibrasi *proving ring*

a_k = angka koreksi tinggi sampel

0,454 = angka konversi satuan lb ke kg

Void in Mineral Aggregate atau VMA adalah persentase volume ruang kosong yang terdapat di antara butiran agregat dalam campuran beton aspal yang telah dipadatkan, yang merepresentasikan volume pori di antara agregat sebelum terisi oleh aspal. Nilai VMA dapat dihitung dengan Persamaan (3).

$$VMA = \left(100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right) \quad (3)$$

Dengan :

G_{mb} = Berat jenis *bulk* dari campuran

G_{sb} = Berat jenis *bulk* dari agregat pembentuk campuran

P_s = Kadar aspal terhadap campuran beton aspal (%)

Void In The Mix atau VITM adalah gambaran volume total ruang kosong diantara partikel agregat dan bahan pengikat dalam campuran. Nilai VITM dapat dihitung dengan Persamaan (4).

$$VITM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (4)$$

Dengan :

G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran

G_{mb} = Berat jenis *bulk* dari campuran

Void Filled with Asphalt atau VFWA adalah persentase volume rongga dalam agregat mineral yang terisi oleh aspal setelah campuran beton aspal mengalami proses pemadatan. Nilai VFWA dapat dihitung dengan Persamaan (5).

$$VFWA = \left(\frac{100 \times (VMA - VITM)}{VMA} \right) \quad (5)$$

Dengan :

VMA = Rongga dalam agregat (%)

VITM = Rongga dalam campuran (%)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari perhitungan proporsi agregat pada campuran *AC-WC* didapatkan masing – masing proporsi agregat sebesar CA = 39, 00%, FA = 54,50%, dan *Filler* = 6,50%. Setelah mendapatkan proporsi agregat maka dilakukan perhitungan nilai kadar aspal perkiraan dengan menggunakan rumus pada Persamaan 1. Dengan menggunakan rumus persamaan 1 didapatkan nilai Pb untuk *AC-WC* sebesar 5,98% yang dibulatkan ke atas menjadi 6%. Setelah didapatkan nilai Pb dilakukan pembuatan benda uji dengan *range* + 1% dan – 1% setiap kenaikan dan penurunan 0,5% dari nilai tengah kadar aspal 6%. Sehingga kadar aspal yang digunakan untuk membuat sampel pencarian Kadar Aspal Optimum atau KAO campuran AC-WC antara 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%. Tabel 1 menunjukkan proporsi campuran menggunakan rencana ideal.

Tabel 1 Penentuan Proporsi Campuran Menggunakan Rencana Ideal

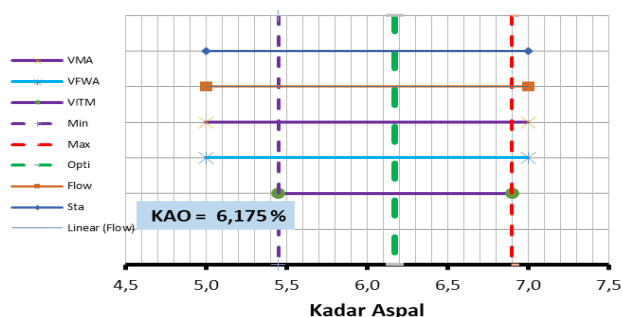
Ukuran Saringan		Lolos Saringan (%)			Tertahan Ideal Kum (%)	Tertahan Ideal masing2 (%)
(mm)	ASTM	MAX	MIN	RENC. IDEAL		
19	3/4"	100	100	100	0	0
12,5	1/2"	100	90	95	5	5
9,5	3/8"	90	77	83,5	16,5	11,5
4,75	No.4	69	53	61	39	22,5
2,36	No. 8	53	33	43	57	18
1,18	No. 16	40	21	30,5	69,5	12,5
0,6	No. 30	30	14	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

Hasil Pengujian Marshall Untuk Mencari KAO Campuran AC-WC

Tabel hasil pengujian Marshall untuk mencari KAO campuran AC-WC ditunjukkan pada Tabel 2 dan hasil penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 2 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Untuk Mencari KAO Campuran AC-WC

Kadar Aspal	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)
5 %	870	2,333	379,08	5,60	66,48	14,658
5,5 %	972	2,557	384,82	4,93	71,27	15,11
6 %	1122	2,993	383,46	4,21	76,02	15,52
6,5 %	966	3,397	291,39	3,79	79,19	16,19
7 %	924	3,910	241,33	2,99	83,87	16,53
	min 800	2 - 4	200 - 350	3 - 5	min 65	min 15



Gambar 1 Penentuan Kadar Aspal Optimum AC-WC Dari Hasil Marshall

Berdasarkan hasil perhitungan Marshall, kadar aspal optimum (KAO) diperoleh sebesar 6,175%. Sampel kemudian dibuat menggunakan dua metode pencampuran: kering dan basah. Pada metode kering, substitusi serbuk ban karet dilakukan pada agregat halus lolos saringan #8 dengan variasi 50–100%. Sementara itu, pada metode basah, serbuk ban karet ditambahkan ke aspal PEN 60/70 dengan variasi 0–8%.

Hasil Pengujian Marshall Pencampuran Kering dan Basah

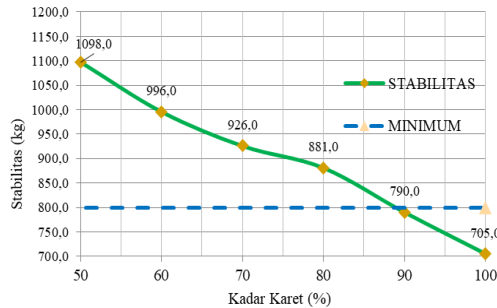
Hasil Pengujian Marshall Pencampuran Kering ditunjukkan pada Tabel 3 dan hasil Pengujian Marshall Pencampuran Basah ditunjukkan pada Tabel 4. Hubungan Kadar Karet Dengan Stabilitas Untuk Campuran Kering ditunjukkan pada Gambar 2 (a) dan Campuran Basah pada Gambar 2 (b).

Tabel 3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Pencampuran Kering

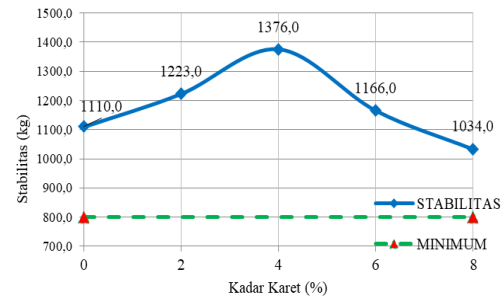
Substitusi Karet	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)
50 %	1098	3,59	305,57	3,32	79,48	14,09
60 %	996	4,35	228,97	3,52	78,46	14,28
70 %	926	4,81	192,38	3,78	77,19	14,50
80 %	881	5,33	165,29	4,66	73,11	15,29
90 %	790	5,83	135,51	5,58	69,22	16,11
90 %	705	6,27	112,50	7,14	63,35	17,49
	min 800	2 - 4	200 - 350	3 - 5	min 65	min 14

Tabel 4 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall* Pencampuran Basah

Kadar Karet	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)
0 %	1110	3,597	311,12	4,01	77,32	15,654
2 %	1223	3,317	368,74	3,76	78,48	15,43
4 %	1376	3,107	448,71	3,46	79,90	15,17
6 %	1166	2,907	401,15	3,16	81,37	14,91
8 %	1034	2,730	382,05	2,83	83,03	14,61
	min 800	2 - 4	200 - 350	3 - 5	min 65	min 15



(a)

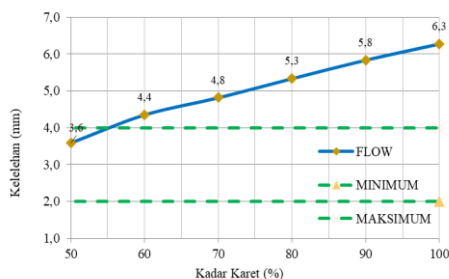


(b)

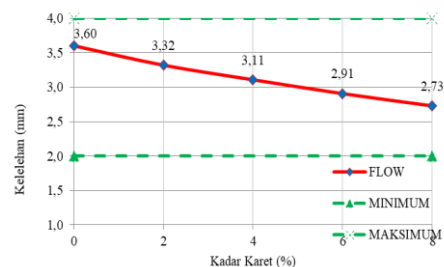
Gambar 2 Grafik Hubungan Kadar Karet Dengan Stabilitas Untuk Campuran Kering (a) dan Campuran Basah (b)

Nilai stabilitas campuran kering menunjukkan penurunan seiring peningkatan substitusi serbuk ban karet, dengan nilai tertinggi 1098 kg pada 50% dan hanya 705 kg pada 100%, di bawah standar minimum AC-WC. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya fleksibilitas dan ketebalan selimut aspal yang melemahkan ikatan antar partikel (Fadhilah, 2018).

Hasil pengujian campuran basah menunjukkan peningkatan nilai stabilitas hingga mencapai optimum sebesar 1376 kg, namun mulai menurun pada kadar karet 6%. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan karet meningkatkan stabilitas campuran hingga batas tertentu, namun kandungan berlebih justru menurunkan ketahanan terhadap beban akibat meningkatnya sifat getas. Temuan ini sejalan dengan penelitian Widhiatmoko dan Hadi (2024) yang menunjukkan pola serupa pada campuran dengan aspal PEN 60/70 dan PG70. Grafik hubungan kadar karet dengan kelelehan untuk campuran kering ditunjukkan pada Gambar 3 (a) dan campuran basah pada Gambar 3 (b).



(a)

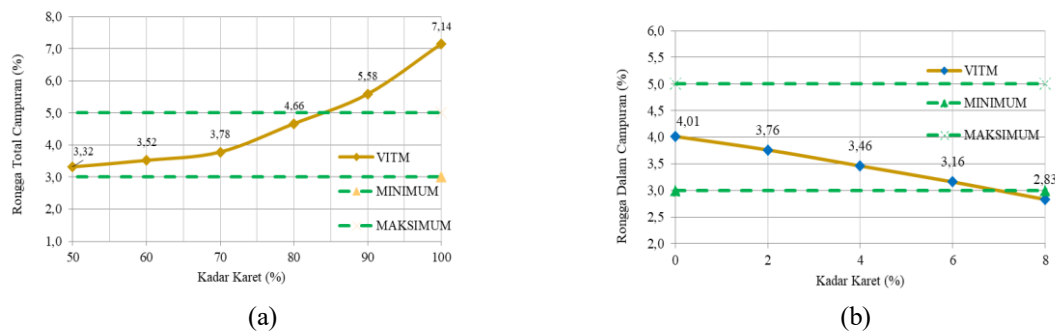


(b)

Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Karet Dengan Kelelehan Untuk Campuran Kering (a) dan Campuran Basah (b)

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan signifikan nilai kelelehan (*flow*) antara pencampuran kering dan basah. Pengujian menunjukkan bahwa pada pencampuran kering, nilai kelelehan (*flow*) meningkat seiring bertambahnya substitusi serbuk ban karet, dari 3,6 mm (50%) hingga 6,3 mm (100%). Hal ini disebabkan oleh sifat elastis karet yang mengisi rongga campuran, namun pada kadar tinggi melemahkan ikatan antar agregat dan aspal. Temuan ini sejalan dengan Putra et al. (2019).

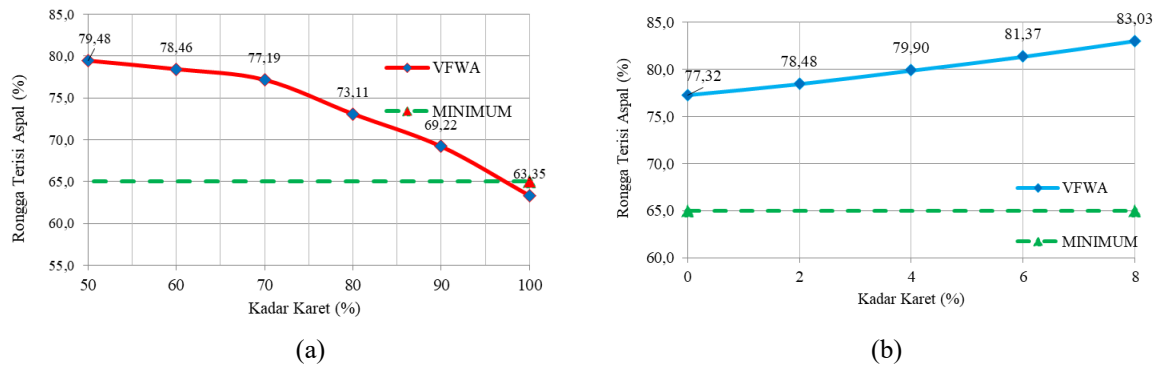
Pengujian campuran basah menunjukkan bahwa peningkatan kadar karet menyebabkan penurunan nilai kelelehan, dengan nilai terendah sebesar 2,72 mm pada kadar 8%. Penurunan ini mengindikasikan peningkatan kekakuan campuran akibat peran karet dalam memperkuat aspal dan mengurangi deformasi plastis. Temuan ini konsisten dengan penelitian AlFaritzieHijriah et al. (2021), yang mengidentifikasi penurunan nilai kelelehan pada kadar karet tinggi akibat meningkatnya kekakuan campuran. Grafik hubungan kadar karet dengan dengan VITM untuk campuran kering ditunjukkan pada Gambar 4 (a) dan campuran basah pada Gambar 4 (b).



Gambar 4 Grafik Hubungan Kadar Karet Dengan VITM Untuk Campuran Kering (a) dan Campuran Basah (b)

Hasil VITM menunjukkan perbedaan signifikan antara campuran kering dan basah. Pada campuran kering, VITM meningkat seiring naiknya substitusi karet, dari 3,32% (50%) hingga 7,14% (100%), melampaui batas spesifikasi Bina Marga (3–5%) pada kadar 85% ke atas. Kenaikan ini disebabkan oleh sifat elastis karet yang tidak mampu menyatu sempurna dan mengisi celah agregat, sehingga memperbesar rongga campuran. Penelitian serupa Khairani et al. (2018) juga mendapatkan hasil bahwa kondisi ini dapat mempercepat oksidasi campuran.

Hasil pengujian campuran basah menunjukkan bahwa peningkatan kadar serbuk ban karet cenderung menurunkan nilai VITM. Hal ini terjadi dikarenakan partikel karet yang tercampur pada aspal dapat mengisi rongga antar partikel. Nilai terendah sebesar 2,83% tercapai pada kadar karet 8%, sementara nilai tertinggi sebesar 4,01% terdapat pada kadar 0%. Penurunan nilai VITM juga sejalan dengan temuan dari Iqbal dan Fauziah (2023), yang menyatakan bahwa meskipun penurunannya tidak terlalu signifikan, peningkatan penggunaan serbuk ban karet dalam campuran beton aspal membantu mengisi rongga-rongga yang ada, sehingga mengurangi volume rongga udara secara bertahap. Grafik hubungan kadar karet dengan dengan VFWA untuk campuran kering ditunjukkan pada Gambar 5 (a) dan campuran basah pada Gambar 5 (b).



Gambar 5 Grafik Hubungan Kadar Karet Dengan VFWA Untuk Campuran Kering (a) dan Campuran Basah (b)

Dari hasil VFWA untuk pencampuran kering dan campuran basah juga memiliki perbedaan hasil dan pola yang signifikan. Pengujian menunjukkan bahwa pencampuran kering cenderung menurunkan nilai VFWA seiring peningkatan kadar serbuk ban karet. Hal ini disebabkan oleh ukuran dan sifat elastis karet yang mengisi rongga ideal bagi aspal, sehingga mengurangi efektivitas pengisian oleh aspal. Nilai VFWA tertinggi tercatat sebesar 79,48% pada substitusi 50% dan terendah 63,35% pada 100%.

Pengujian campuran basah menunjukkan bahwa peningkatan kadar karet meningkatkan nilai VFWA, dengan nilai tertinggi 83,03% pada 8% karet dan terendah 77,32% tanpa karet. Serbuk karet berperan sebagai pengisi elastis yang memperbaiki penutupan rongga oleh aspal dan meningkatkan viskositas serta daya lekat terhadap agregat.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa metode pencampuran memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja volumetrik campuran beraspal yang dimodifikasi karet, di mana pencampuran basah cenderung lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi pengisian rongga oleh aspal dibandingkan pencampuran kering. Pencampuran basah (*wet mix*) dinilai lebih stabil dibandingkan pencampuran kering karena proses pencampurannya memungkinkan interaksi kimia dan fisik yang lebih baik antara serbuk ban karet dan aspal. Dalam pencampuran basah, serbuk karet dicampurkan langsung ke dalam aspal pada suhu tinggi sebelum dicampur dengan agregat, sehingga karet dapat mengalami proses pelunakan. Proses ini meningkatkan viskositas dan elastisitas aspal, membentuk *modified binder* (aspal termodifikasi karet), yang secara signifikan meningkatkan daya lekat terhadap agregat dan kemampuan deformasi plastis campuran.

Sebaliknya, pada pencampuran kering (*dry mix*), serbuk ban karet ditambahkan langsung ke agregat sebelum aspal dituangkan. Hal ini menyebabkan karet hanya berfungsi sebagai pengisi fisik, yang tidak menyatu secara optimal dengan aspal karena tidak terjadi proses fusi termal. Akibatnya, ikatan antar komponen menjadi lemah, meningkatkan rongga udara (VITM), menurunkan stabilitas struktural, dan menyebabkan kelebihan kelelahan (*flow*) pada kadar karet yang tinggi. Dengan mempertimbangkan parameter seperti stabilitas Marshall, kelelahan, VITM, dan VFWA, serta integrasi material yang lebih baik, pendekatan pencampuran basah terbukti lebih unggul dalam menciptakan campuran perkerasan yang stabil, tahan lama, dan sesuai dengan Spesifikasi Teknis Bina Marga.

KESIMPULAN

Efektivitas penambahan serbuk ban karet dalam campuran beton aspal sangat bergantung pada kadar dan metode pencampuran yang digunakan. Kadar substitusi yang tepat dapat meningkatkan stabilitas, mengurangi rongga udara (VITM), dan memperbaiki pengisian aspal (VFWA), namun kadar yang terlalu tinggi ($\geq 85\%$) justru menurunkan kualitas mekanis dan tidak memenuhi standar Bina Marga 2018.

Penggunaan serbuk ban karet sebagai bahan substitusi dalam campuran beton aspal memberikan potensi peningkatan performa jika diaplikasikan dalam kadar yang optimal. Berdasarkan hasil analisis, untuk pencampuran kering substitusi kadar 50% hingga 60% menunjukkan keseimbangan terbaik antara stabilitas, kelelahan, dan efisiensi pengisian rongga (VITM dan VFWA). Pada pencampuran basah nilai kadar karet yang terbaik diantara 2% hingga 4% yang ditunjukkan dari nilai stabilitas dan *flow*nya. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian proporsi dan pemilihan metode pencampuran yang tepat serta pengujian laboratorium sebelum diterapkan di lapangan agar kinerja campuran tetap optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- AlFaritzieHijriah, H., Umari, Z. F. dan 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): 29-35.
- 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) (Tugas Akhir)*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Azmi, A.R.K., Farid, A. dan Salsabila, N.S. 2022. *Pengaruh Penambahan Limbah Karet Ban Sebagai Substitusi Sebagian Kadar Aspal terhadap Stabilitas AC-BC dengan Metode Marshall Test*. Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil, 7 (1): 25-30.
- Daniel, C.G., Rifqon, M., Firdaus, F.M. dan Canny, K.A. 2023. *Perbandingan Dampak Lingkungan Produksi Skala Laboratorium Campuran Aspal Modifikasi Polimer dengan Metode Campuran Basah dan Kering Menggunakan Life Cycle Assessment (LCA)*. Jurnal Jalan Jembatan, 40 (1): 17-31.
- Fadhilah, M. R. 2018. *Pengaruh Penggunaan Serbuk Ban Karet Sebagai Pengganti Agregat Halus pada Campuran Laston (AC-WC) Terhadap Kinerja Perkerasan Jalan Raya (Tugas Akhir)*. Universitas Islam Indonesia.
- Hasrullah, H., Syarif, I.A. dan Harwadi, F. 2023. *Pemanfaatan Limbah Plastik dan Fly Ash Pada Campuran Lapisan Perkerasan Jalan*. Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology, 4 (1): 14-22.
- Iqbal, I. dan Fauziah, M. 2023. *Experimental Study of The Use of Waste Rubber Tire Additives Using The Sequential Mixing Method on The Performance of Hot-Rolled Sheet-Wearing Course Mixtures*. TEKNIK: Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Rekayasa, 44 (2): 167-175.

- Khairani, C., Saleh, S. M., dan Sugiarto, S. 2018. *Uji Marshall Pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) dengan Tambahan Parutan Ban Bekas*. Jurnal Teknik Sipil, 1 (3): 559–570.
- Martina, N., Hasan, M.F.R. dan Setiawan, Y. 2019. *Pengaruh Serbuk Ban Bekas sebagai Campuran Agregat Halus pada Campuran Aspal Porous*. Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil, 24 (2): 144-152.
- Putra, M.T., Destania, H.R. dan Febryandi. 2023. *Analisis Karakteristik Marshall Campuran Aspal Modifikasi pada Asphalt Concrete–Wearing Course (AC–WC) dengan Penambahan Serbuk Ban Kendaraan*. Jurnal Teknik Sipil, 19 (2): 335-350.
- Sugiyanto, G. 2009. *Kajian Karakteristik Campuran Hot Rolled Asphalt Akibat Penambahan Limbah Serbuk Ban Bekas*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 8 (2).
- Suroso, T.W. 2009. *Pengaruh Penambahan Plastik LDPE (Low Density Poly Ethilen) dengan Cara Basah dan Cara Kering Terhadap Kinerja Campuran Beraspal*. Jurnal Jalan Jembatan, 26 (2): 1-16.
- Widhiatmoko, G. dan Hadi, M. A. 2024. *Studi Perbandingan Karakteristik Marshall Aspal PG70 dan Pen 60/70 Campur Serbuk Ban Karet pada Campuran Beton Aspal*. Proceeding Civil Engineering Research Forum, 24 (2): 2-16.

