

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Material

4.1.1 Analisa Saringan Agregat

Agregat merupakan komponen utama yang membentuk kerangka struktural sehingga beban lalu lintas dapat ditahan secara maksimal, sedangkan aspal memiliki peran yaitu sebagai bahan pengikat antarpartikel agregat memberikan kekuatan, aspal mengikat partikel-partikel tersebut (Hanggoro et al., 2024). Gradasi sebagai distribusi ukuran butir, merupakan karakteristik agregat yang sangat menentukan kinerja campuran AC-WC. Gradasi yang sesuai menghasilkan susunan agregat padat dan stabil dengan rongga udara sesuai persyaratan. Oleh karena itu, pemeriksaan gradasi melalui analisis saringan perlu dilakukan pada setiap fraksi agregat.

SNI ASTM C136:2012 sebagai dasar dalam acuan analisis saringan agregat kasar dan halus, dengan hasil dinyatakan dalam persentase berat tertahan, kumulatif tertahan, dan lolos pada setiap ukuran saringan. Data ini menjadi dasar penentuan proporsi agregat gabungan agar berada dalam amplop gradasi yang dipersyaratkan. Penelitian ini menganalisis empat fraksi agregat untuk campuran AC-WC: agregat kasar lolos $\frac{3}{4}$ inci, agregat kasar lolos $\frac{1}{2}$ inci, pasir lolos No. 4, dan abu batu lolos No. 4.

A. Agregat Kasar Lolos Saringan $\frac{3}{4}$ "

Pengujian menggunakan benda uji dengan berat awal 5.000 gram. Hasil analisis saringan selanjutnya dituangkan Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Analisa Hasil Saringan Agregat Kasar Lolos $\frac{3}{4}$ "

Ukuran Saringan (ASTM)	Bukaan (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
$\frac{3}{4}$ "	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
$\frac{1}{2}$ "	12,5	1387,25	27,82	27,82	72,18
$\frac{3}{8}$ "	9,5	570,00	11,43	39,25	60,75
No. 4	4,76	1587,50	31,84	71,09	28,91
No. 8	2,36	1275,90	25,59	96,68	3,32
No. 16	1,18	28,91	0,58	97,26	2,74
No. 30	0,60	19,21	0,39	97,65	2,35
No. 50	0,279	1,49	0,03	97,68	2,32
No. 100	0,149	1,85	0,04	97,71	2,29
No. 200	0,075	38,00	0,76	98,48	1,52
Pan	—	76,00	1,52	100,00	0,00
Total (W1)		4986,11	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Pada fraksi agregat kasar lolos $\frac{3}{4}$ inci dengan berat awal benda uji 5.000 gram, seluruh butiran tercatat lolos saringan $\frac{3}{4}$ inci sebesar 100%. Persentase terbesar tertahan pada saringan No. 4 sebesar 31,84%, kemudian saringan $\frac{1}{2}$ inci sebesar 27,82% dan saringan $\frac{3}{8}$ inci sebesar 11,43%. Persentase kumulatif tertahan hingga saringan No. 4 mencapai 71,09%. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa fraksi ini didominasi butiran berukuran kasar, terutama pada rentang $\frac{1}{2}$ inci hingga No. 4 atau 4,76 mm. Penurunan tajam jumlah material yang lolos setelah saringan No. 4, hingga hanya 3,32% pada saringan No. 8, memperlihatkan bahwa fraksi ini

berfungsi sebagai kerangka agregat kasar utama. Susunan tersebut juga mendukung terbentuknya *interlocking* antarpadatan agregat sehingga stabilitas campuran dapat dipertahankan. Menurut (Shi et al., 2020) untuk merancang struktur kerangka utama (*main skeleton*) yang ideal, di satu sisi agregat kasar harus saling mengunci (*interlocking*) untuk membentuk kerangka utama; di sisi lain, kerangka utama tersebut tidak boleh terganggu oleh jumlah agregat halus yang berlebihan.

B. Agregat Kasar Lolos Saringan ½"

Benda uji pada pengujian ini ditetapkan dengan massa awal sebesar 2.500 gram, sedangkan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Analisa Hasil Saringan Agregat Kasar Lolos ½"

Ukuran Saringan (ASTM)	Ukuran Lubang (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
¾"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
½"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
¾"	9,5	879,00	35,23	35,23	64,77
No. 4	4,76	607,70	24,36	59,59	40,42
o. 8	2,36	572,00	22,92	82,51	17,49
No. 16	1,18	348,00	13,95	96,46	3,54
No. 30	0,60	2,80	0,11	96,57	3,43
No. 50	0,279	1,90	0,08	96,65	3,35
No. 100	0,149	24,70	0,99	97,64	2,36
No. 200	0,075	19,00	0,76	99,24	0,76
Pan	—	19,00	0,76	100,00	0,00
Total (W1)		2495,10	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Pengujian terhadap agregat kasar lolos ½ inci dilakukan menggunakan benda uji dengan berat awal 2.500 gram. Hasilnya menunjukkan bahwa tidak terdapat material yang tertahan pada saringan ¾ inci maupun ½ inci. Proporsi material yang

tertahan paling tinggi terdapat pada saringan 3/8 inci dan No. 4, dengan kumulatif tertahan pada saringan No. 4 sebesar 59,59%. Kondisi tersebut menunjukkan dominasi butiran berukuran sedang dalam fraksi ini. Sebagaimana dijelaskan oleh (Siregar et al., 2023) menjelaskan bahwa komposisi campuran perlu disusun berdasarkan proporsi agregat kasar, sedang, dan halus. Dalam konteks tersebut, fraksi berukuran sedang membantu membentuk gradasi yang menerus, meningkatkan keterikatan antarbutir, dan mendukung kepadatan campuran.

C. Pasir Lolos Saringan No. 4

Pengujian dilaksanakan pada benda uji dengan berat awal 500 gram. Hasil pemeriksaan sebagaimana ditunjukkan Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Analisa Saringan Pasir Lolos No. 4

Ukuran Saringan (ASTM)	Ukuran Lubang (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 8	2,36	47,00	9,41	9,41	90,59
No. 16	1,18	102,40	20,50	29,90	70,10
No. 30	0,60	153,35	30,68	60,59	39,41
No. 50	0,279	86,10	17,23	77,82	22,18
No. 100	0,149	97,80	19,58	97,40	2,60
No. 200	0,075	8,00	1,60	99,00	1,00
Pan	—	5,00	1,00	100,00	0,00
Total (W1)		499,60	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan Tabel 4.3, seluruh material pasir dinyatakan lolos dari saringan No. 4 dan memiliki distribusi yang relatif merata pada rentang saringan No. 8 sampai

No. 100. Persentase tertinggi tercatat pada saringan No. 30 sebesar 30,68%. Distribusi ini menunjukkan bahwa pasir memiliki rentang ukuran butir yang relatif menerus dan dapat mengisi rongga di antara agregat kasar. Menurut (Shi et al., 2020) menyatakan bahwa agregat halus terutama berfungsi mengisi rongga pada kerangka yang dibentuk oleh agregat kasar. Dengan demikian, distribusi pasir yang cukup merata dapat membantu meningkatkan kepadatan susunan agregat.

D. Abu Batu Lolos Saringan No. 4

Analisis saringan dilakukan terhadap benda uji dengan massa awal sebesar 500 gram. Pengujian hasil tersebut dituangkan ke dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Analisa Saringan Abu Batu Lolos No. 4

Ukuran Saringan (ASTM)	Ukuran Lubang (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 8	2,36	111,90	22,39	22,39	77,61
No. 16	1,18	56,30	11,27	33,66	66,34
No. 30	0,60	134,80	26,98	60,64	39,36
No. 50	0,279	51,00	10,21	70,84	29,16
No. 100	0,149	64,70	12,95	83,79	16,21
No. 200	0,075	21,00	4,20	87,99	12,01
Pan	—	60,00	12,01	100,00	0,00
Total (W1)		499,70	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Abu batu menunjukkan persentase lolos saringan No. 200 sebesar 12,01%, lebih tinggi dibandingkan pasir alam. Kondisi ini merupakan karakteristik umum *stone dust* yang dihasilkan dari proses *crushing* dan memiliki kandungan fraksi halus

serta *filler* alami yang cukup besar. Material berukuran halus berperan dalam mengisi celah-celah sempit yang terdapat pada butiran antara agregat, sehingga menghasilkan ke rapatan dalam campuran. Menurut (Rahmahima et al., 2020) menyebutkan bahwa *filler* pada campuran beton aspal juga berperan dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh cuaca.

4.1.2 Pengujian Berat Jenis Agregat

Uji berat jenis ini meliputi berat jenis *bulk*, berat jenis SSD, berat jenis *apparent*, dan penyerapan untuk setiap fraksi, yaitu agregat kasar lolos ¾ inci, agregat kasar lolos ½ inci, pasir, dan abu batu. Pengujian tersebut hasilnya dituangkan ke dalam Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Hasil Penyerapan Agregat & Berat Jenis

Jenis Material	Berat Jenis <i>Bulk</i>	Berat Jenis SSD	Berat Jenis <i>Apparent</i>	Penyerapan (%)
Agregat Kasar ¾"	2,726	2,770	2,852	1,626
Agregat Kasar ½"	2,728	2,764	2,830	1,317
Agregat Halus (Pasir)	2,554	2,557	2,709	2,145
<i>Filler</i> (Abu Batu)	2,504	2,610	2,646	2,249

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Rumus umum (SNI 1969:2016 dan SNI 1970:2016):

$$BJ \text{ Bulk} = \frac{Bk}{(B - A)} \quad (4.1)$$

$$BJ \text{ SSD} = \frac{B}{(B - A)} \quad (4.2)$$

$$BJ \text{ Apparent} = \frac{Bk}{(B - A)} \quad (4.3)$$

$$\text{Penyerapan (\%)} = \frac{(B - Bk)}{Bk} \times 100\% \quad (4.4)$$

Keterangan

Bk = massa sampel dalam kondisi oven kering (gram)

B = massa sampel uji dalam kondisi jenuh dan permukaan kering atau SSD (gram)

A = massa sampel saat berada di bawah air (gram)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.5, seluruh fraksi material memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025, dengan berat jenis bulk di atas 2,5 dan penyerapan di bawah 3%. Agregat kasar $\frac{1}{2}$ " memiliki berat jenis bulk tertinggi, yaitu 2,728, disusul agregat kasar $\frac{3}{4}$ " sebesar 2,726, pasir sebesar 2,554, dan filler (abu batu) sebesar 2,504. Dari sisi penyerapan, agregat kasar $\frac{1}{2}$ " menunjukkan nilai terendah sebesar 1,317%, diikuti agregat kasar $\frac{3}{4}$ " sebesar 1,626%, pasir sebesar 2,145%, dan abu batu sebesar 2,249%. Seluruh nilai penyerapan tersebut masih berada dalam batas yang ditetapkan. Kecenderungan penyerapan yang lebih tinggi pada fraksi halus dibandingkan fraksi kasar menunjukkan bahwa material yang lebih halus memiliki pori yang lebih banyak, sehingga menyerap air lebih besar.

Penyerapan agregat memengaruhi *workability*, stabilitas, durabilitas, dan jumlah aspal efektif dalam campuran. Agregat dengan penyerapan tinggi menyerap lebih banyak aspal ke dalam porinya sehingga mengurangi aspal efektif untuk melapisi permukaan butiran. Temuan ini sejalan dengan Yuniarti et al. (Yuniarti, R., et.al 2023) yang menunjukkan bahwa porositas dan penyerapan tinggi meningkatkan kecenderungan aspal masuk lebih dalam ke pori agregat, sehingga lapisan aspal pada permukaan menjadi lebih tipis dan ikatan aspal-agregat melemah, menurunkan kapasitas dukung campuran.

Sebaliknya, agregat dengan penyerapan rendah cenderung menghasilkan ikatan antarbutir yang lebih baik, stabilitas lebih tinggi, dan durabilitas yang lebih baik terhadap air dan oksidasi. (Yuniarti et al., 2023) menjelaskan bahwa besarnya rongga pada campuran yang telah dipadatkan dipengaruhi agregat yang tidak dapat

melakukan penyerapan pada volume aspal, atau kadar efektif dalam aspal parameter yang penting ialah menentukan ketahanan campuran terhadap cuaca dan temperatur. Secara keseluruhan, seluruh agregat yang digunakan telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2025.

4.1.3 Pengujian Sifat Fisik Aspal

Sebelum dicampur dengan agregat, aspal diuji sifat fisiknya meliputi penetrasi, titik lembek, daktilitas, dan berat jenis, dengan hasil dibandingkan terhadap persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025 untuk aspal keras penetrasi 60/70.

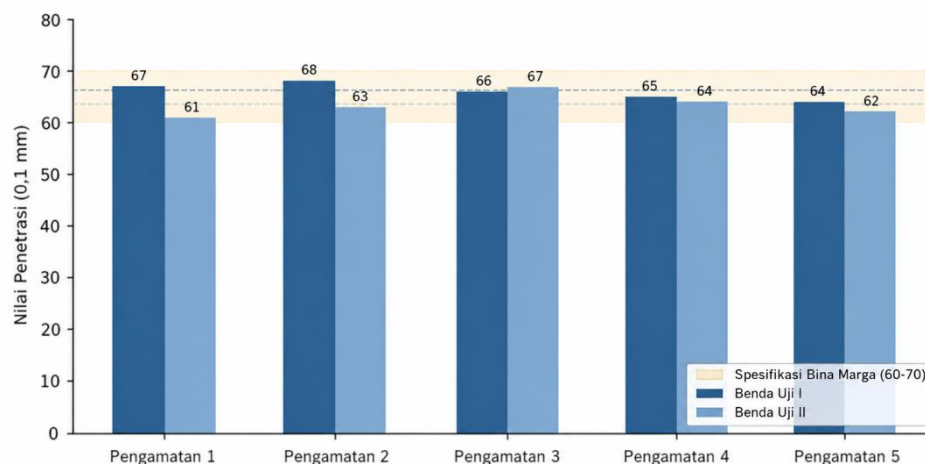
A. Hasil Uji Penetrasi Aspal

Pengujian dilakukan menggunakan jarum penetrasi yang diberikan beban seberat 100 gram selama 5 detik serta suhu mencapai 25°C. Hal ini guna menentukan tingkatan konsistensi aspal melalui uji penetrasi, sesuai dengan SNI 06-2456-2011. Penetrasi yang memiliki nilai lebih besar menunjukkan aspal yang lebih lunak.

Tabel 4. 6 Data Uji Penetrasi dengan Beban 100 Gram Selama 5 Detik suhu 25°C

Pengamatan	Benda Uji I (0,1 mm)	Benda Uji II (0,1 mm)	Satuan
1	67	61	mm
2	68	63	mm
3	66	67	mm
4	65	64	mm
5	64	62	mm
Rerata	66,0	63,4	mm
Rata-Rata Total	64,7		mm

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Nilai Penetrasi Benda Uji I dan II terhadap Spesifikasi

Nilai penetrasi ditentukan dengan mengambil rata-rata dari sejumlah pembacaan benda uji yang sama dilakukan dengan rumus:

$$\text{Rata - Rata Penetrasi Benda Uji 1} = \frac{(P1 + P2 + P3 + P4 + P5)}{5} \quad (4.5)$$

$$\text{Rata - Rata Penetrasi Benda Uji 2} = \frac{(P1 + P2 + P3 + P4 + P5)}{5} \quad (4.6)$$

$$\text{Penetrasi Benda Uji Total} = \frac{(\text{Benda Uji 1} + \text{Benda Uji 2})}{2} \quad (4.7)$$

Hasil pengujian pada dua benda uji menunjukkan nilai 64–68, dengan perbedaan yang dapat dipengaruhi oleh kondisi pengujian seperti berat beban, bentuk dan kehalusan ujung jarum, temperatur, serta lama pengujian (Nadhifah & Susanti, 2024). Berdasarkan spesifikasi umum bina marga tahun 2025, rentang syarat penetrasi aspal berada pada 60/70 sehingga nilai rata-rata 64,7 (0,1 mm) termasuk kedalam rentang tersebut dan telah memenuhi persyaratan.

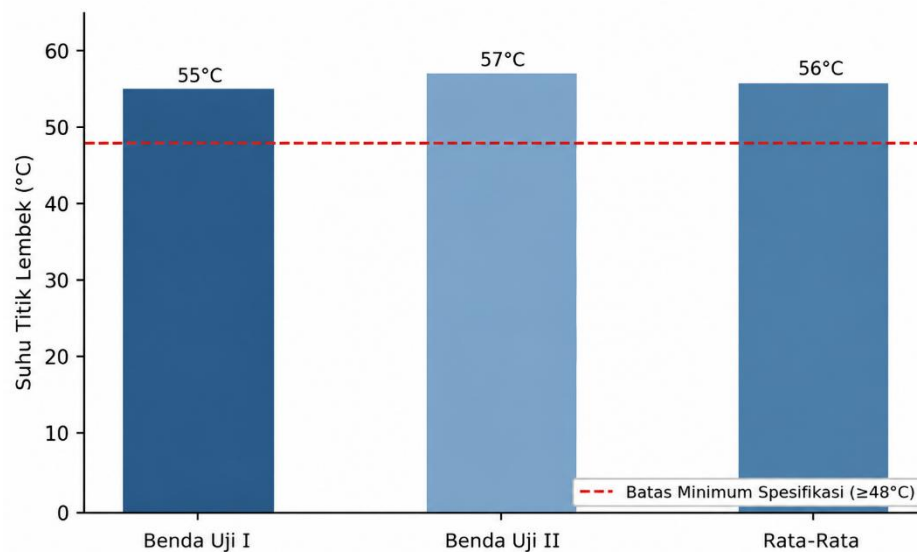
B. Pengujian Hasil Titik Lembek Aspal

Uji titik lembek ini berdasarkan SNI 06-2434-2011 menggunakan metode *Ring and Ball* (BSN, 1991). Menentukan suhu ketika aspal mulai melunak dan tidak lagi mampu menahan beban bola baja karakteristik yang menggambarkan sensitivitas bahan pengikat terhadap perubahan temperatur.

Tabel 4. 7. Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal (*Ring and Ball*)

No	Suhu Yang Diamati		Waktu (menit)		Suhu Titik Lembek (°C)	
	°C	°F	I	II	I	II
1	5	41	0:00:00	0:00:00	55	57
2	10	50	5:10:00	5:10:00		
3	15	59	7:55:00	7:55:00		
4	20	68	10:01:00	10:01:00		
5	25	77	12:16:00	12:16:00		
6	30	86	14:42:00	14:42:00		
7	35	95	17:05:00	17:05:00		
8	40	104	18:48:00	18:48:00		
9	45	113	20:57:00	20:57:00		
10	50	122	23:04:00	23:04:00		
11	55	131	25:06:00	25:06:00		
12	55	132.8	25:17:00	25:17:00		
13	57	134.6	25:45:00	25:45:00		
Rata-Rata Titik Lembek (°C)					56	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

**Gambar 4. 2.** Grafik Perbandingan Nilai Titik Lembek terhadap Spesifikasi

Hasil pengujian menunjukkan titik lemek 55°C dan 57°C (rata-rata 56°C), dengan selisih 2°C yang relatif kecil. (Caccavo et al., 2026). Menyatakan bahwa titik lemek yang lebih tinggi umumnya berkaitan dengan sensitivitas termal lebih rendah dengan kapabilitas lebih unggul dalam tindakan menahan rutting pada temperatur tinggi. Nilai rata-rata 56°C ini telah melampaui batas minimum 48°C untuk aspal penetrasi 60/70, mengindikasikan kemampuan mempertahankan

konsistensi di suhu yang tinggi dan potensi memiliki daya tahan unggul pada deformasi permanen. Hal ini konsisten dengan nilai penetrasi 64,7 yang termasuk kelas 60/70.

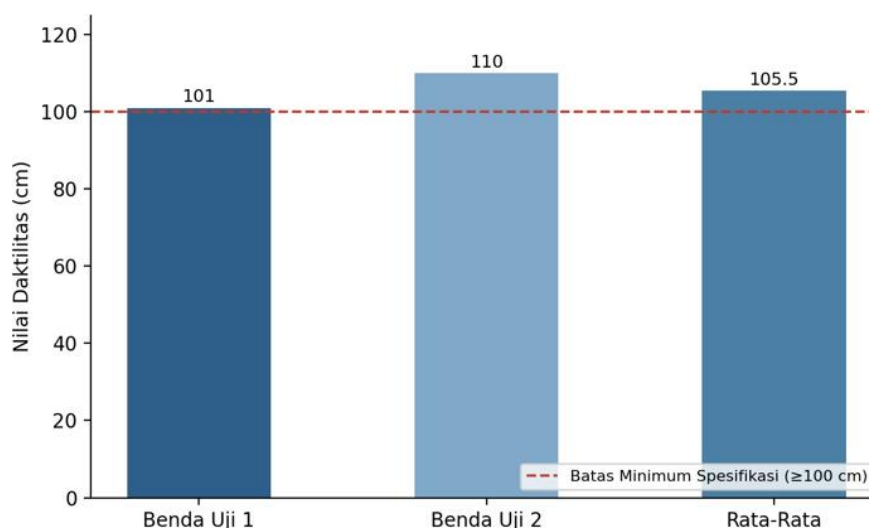
C. Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Uji daktilitas dilakukan sesuai SNI 06-2432-2011 untuk mengetahui kemampuan aspal memanjang sebelum putus ketika ditarik pada kecepatan 5 cm/menit dan temperatur 25°C. Nilai daktilitas dinyatakan sebagai jarak maksimum yang ditempuh benda uji sebelum mengalami putus.

Tabel 4. 8. Pengujian Hasil Daktilitas Aspal pada Temperatur 25°C dengan Kecepatan Penarikan 5 cm/menit

Pengamatan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Satuan
Pengamatan 1	101	110	cm
Rata-Rata	105,5		cm

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 3. Grafik Perbandingan Nilai Daktilitas terhadap Spesifikasi

Nilai daktilitas rata-rata sebesar 105,5 cm (101 cm dan 110 cm), dengan selisih 9 cm yang masih dapat diterima. SNI 2432:2011 mensyaratkan kondisi temperatur dan kecepatan penarikan terkendali. Hasil ini didukung oleh penelitian (Zillie et al., 2023) yang melaporkan nilai daktilitas 125 cm untuk aspal Pen 60/70. Kedua benda

uji berada di atas batas minimum ≥ 100 cm, menunjukkan fleksibilitas dan elastisitas aspal yang memadai untuk mempertahankan kelenturan perkerasan serta mengurangi potensi retak. Secara umum, kemampuan daktilitas ini juga berkaitan dengan kandungan fraksi maltena, terutama resin dan aromatik.

D. Pengujian Berat Jenis Aspal

Pengujian dilakukan dengan metode piknometer, yaitu membandingkan berat aspal terhadap berat air suling dengan volume yang sama dan di suhu 25 derajat. Metode ini mengacu pada SNI 06-2441-2011 tentang uji berat jenis aspal. Parameter penting dalam analisis volumetrik campuran, termasuk perhitungan VIM dan VMA.

$$BJ\ Aspal = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]} \quad (4.8)$$

Keterangan

A = berat piknometer dalam kondisi kosong (gram)

B = berat piknometer beserta air (gram)

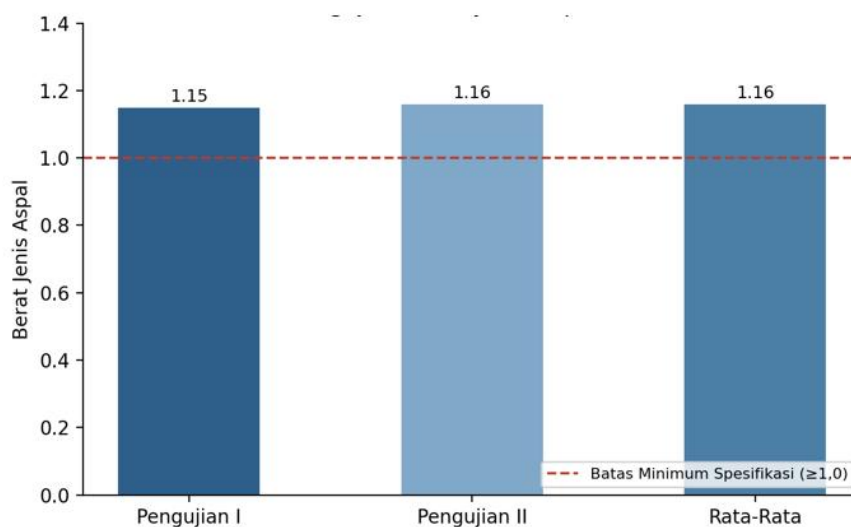
C = berat piknometer beserta aspal (gram)

D = berat piknometer beserta campuran air dan aspal (gram)

Tabel 4. 9. Hasil Uji Berat Jenis Aspal (Metode Piknometer)

Pengujian	Uji 1	Uji 2	Satuan
Berat Piknometer Kosong (A)	42,50	43,30	gram
Berat Piknometer + Air (B)	66,00	65,80	gram
Berat Piknometer + Aspal (C)	61,50	61,00	gram
Berat Piknometer + Air + Aspal (D)	68,50	68,30	gram
Berat Aspal (C – A)	19,00	17,70	gram
Isi Aspal (B – A) – (D – C)	16,50	15,20	gram
Berat Jenis Aspal	1,15	1,16	gram
Berat Jenis Aspal Rerata	1,16		gram

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

**Gambar 4. 4.** Grafik Perbandingan Nilai Berat Jenis Aspal terhadap Spesifikasi

Merujuk pada data tabel 4. 4, diketahui berat jenis 1,15 dan 1,16 (rata-rata 1,16), memenuhi batas minimum $\geq 1,0$. ASTM D70/D70M-21 juga menekankan bahwa keandalan hasil pengujian bergantung pada kompetensi personel serta kalibrasi dan pemeliharaan peralatan, sehingga kondisi alat perlu dipastikan tetap akurat.

Nilai berat jenis ini penting dalam perencanaan campuran karena digunakan dalam analisis volumetrik. Penelitian (Gardete et al., 2022) menunjukkan bahwa penentuan *bulk specific gravity* dapat memengaruhi desain volumetrik dan evaluasi

kinerja campuran aspal. Pada penelitian ini, nilai berat jenis 1,15 dan 1,16 digunakan sebagai parameter dalam menghitung VIM dan VMA pada tahap *mix design*.

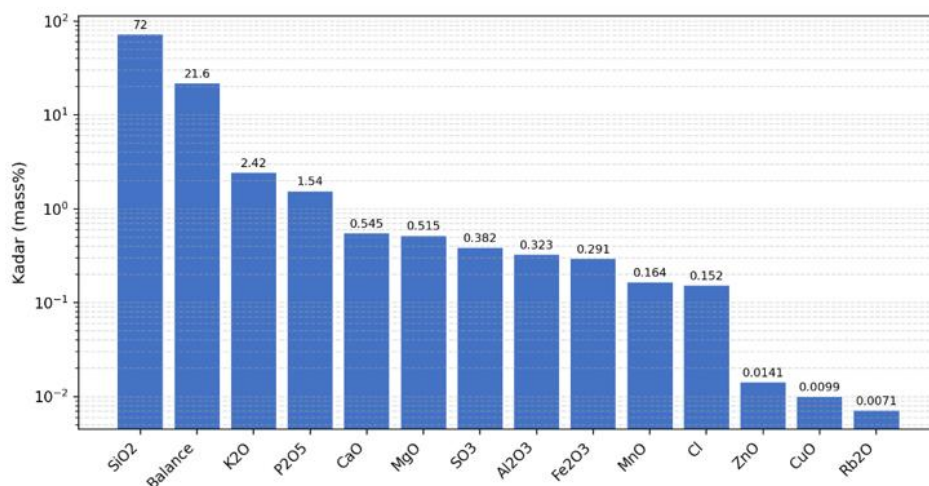
4.1.4 Hasil Pengujian Sifat Fisik RHA (RHA)

Komposisi oksida yang terkandung dalam RHA (*Rice Husk Ash/RHA*) berdasarkan uji XRF dituangkan Tabel 4.10.

Tabel 4. 10. Komposisi Oksida RHA (RHA) Hasil Uji XRF

No.	Komponen	Hasil (mass%)	Garis Elemen
1	SiO ₂	72,0	Si-KA
2	K ₂ O	2,42	K-KA
3	P ₂ O ₅	1,54	P-KA
4	CaO	0,545	Ca-KA
5	MgO	0,515	Mg-KA
6	SO ₃	0,382	S-KA
7	Al ₂ O ₃	0,323	Al-KA
8	Fe ₂ O ₃	0,291	Fe-KA
9	MnO	0,164	Mn-KA
10	Cl	0,152	Cl-KA
11	ZnO	0,0141	Zn-KA
12	CuO	0,0099	Cu-KA
13	Rb ₂ O	0,0071	Rb-KA
14	Balance	21,6	Pd-KAC

Sumber: Hasil Uji XRF, 2026



Gambar 4. 5 Grafik Komposisi Rice Husk Ash (RHA)

Karakterisasi kimia *Rice Husk Ash* (RHA) dilakukan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan perhitungan SQX pada instrumen Rigaku. Sampel berupa *oxide powder* memiliki berat 1,7351 g dan densitas 215,7420 mg/cm². Hasil analisis menunjukkan bahwa RHA didominasi *silikon dioksida* (SiO₂) sebesar 72,0%. Nilai tersebut memperlihatkan bahwa RHA tergolong material dengan kandungan silika tinggi. Kadar tersebut sejalan dengan pernyataan (Salim et al., 2025) menyatakan bahwa RHA hasil kalsinasi umumnya mengandung silika lebih dari 70%, meskipun kandungannya dipengaruhi oleh temperatur dan lama pembakaran.

Berdasarkan hasil XRF, kandungan SiO₂ sebesar 72,0% menunjukkan bahwa RHA memiliki karakteristik kimia yang mendukung penggunaannya sebagai komponen *rejuvenator* komposit RHA–WEO pada campuran AC-WC berbasis RAP. Kandungan silika tersebut berpotensi memberikan fungsi sebagai komponen mineral aktif. Dalam sistem *rejuvenator*, RHA diharapkan dapat melengkapi fungsi WEO yang bertugas memulihkan kelenturan *binder* RAP akibat penuaan, sekaligus membantu karakteristik adhesi dan ketahanan terhadap air. Hal tersebut sejalan dengan penelitian (Trevizan et al., 2023) melaporkan bahwa *silika amorf* serta struktur mikropori RHA dapat meningkatkan kompatibilitas RHA dengan aspal dan mendukung kestabilan *binder*. Dengan demikian, RHA memiliki potensi sebagai bahan pendamping WEO dalam *rejuvenator* komposit RAP.

4.1.5 Hasil Pengujian Aspal RAP

A. Analisa Saringan Agregat RAP

Material pada *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) diperoleh dari lapisan perkerasan eksisting yang dilakukan pekerjaan pembongkaran kemudian diproses melalui *stone crusher*. Pengolahan tersebut menghasilkan dua fraksi material, yaitu fraksi kasar yang tertahan pada saringan No. 4 serta fraksi halus pada RAP yang lolos saringan No. 4. Untuk analisis gradasi, RAP dipisahkan menjadi tiga fraksi, yaitu material tertahan pada saringan $>3/8$ inci, fraksi $3/8$ inci, dan fraksi lolos No. 4. Pemisahan ini memungkinkan gradasi agregat penyusun RAP diketahui secara lebih terperinci dan selanjutnya digunakan sebagai dasar penggabungan dengan agregat baru sesuai Spesifikasi Umum 2025.

1. RAP Tertahan Saringan $>3/8''$

Pengujian dilaksanakan pada benda uji dengan berat awal sebesar 5.000 gram. Data hasil pemeriksaan analisa saringan disajikan ke dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 11 Hasil Analisa Saringan Agregat RAP $> 3/8''$

Ukuran Saringan (ASTM)	Ukuran Lubang (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	3595,00	71,99	71,99	28,01
3/8"	9,5	1395,80	27,95	99,94	0,06
No. 4	4,76	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 8	2,36	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 16	1,18	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 30	0,60	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 50	0,279	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 100	0,149	0,00	0,00	99,94	0,06
No. 200	0,075	0,00	0,00	99,94	0,06
Pan	—	3,00	0,06	100,00	0,00
Total (W1)		4993,80	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4.5 memperlihatkan bahwa fraksi RAP ini sepenuhnya lolos saringan $3/4''$ (19 mm), sesuai dengan ketentuan ukuran maksimum butir RAP untuk campuran AC-WC-RAP, dengan hampir seluruh butirannya (99,94%) tertahan pada saringan $1/2''$ dan $3/8''$. Butiran terbanyak tertahan pada saringan $1/2''$, yaitu sebesar 71,99%, yang menunjukkan bahwa fraksi ini didominasi oleh bongkahan RAP berukuran kasar hasil pemecahan mesin *crusher*. Pembagian fraksi RAP berdasarkan hasil analisa saringan seperti ini sejalan dengan pendekatan yang digunakan (Naufal & Putra, 2022) pada penelitian campuran AC-WC yang berbasis material RAP, di mana agregat hasil ekstraksi RAP dipilah menjadi fraksi penyusun agregat meliputi

agregat kasar (CA), agregat halus (FA), dan material pengisi (*filler*/FF). Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan untuk gradasi gabungan dilaksanakan dengan mengacu pada ketentuan SNI ASTM C136:2012, sebagai dasar penentuan proporsi penggabungan dengan agregat baru.

2. RAP Lolos 3/8"

Pengujian dilaksanakan pada benda uji dengan berat awal 2.500 gram. Hasil pemeriksaan disajikan Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Analisa Saringan Agregat RAP Lolos 3/8"

Ukuran Saringan (ASTM)	Bukaan (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	192,00	7,71	7,71	92,29
No. 4	4,76	2298,10	92,25	99,95	0,05
No. 8	2,36	0,00	0,00	99,95	0,05
No. 16	1,18	0,00	0,00	99,95	0,05
No. 30	0,60	0,00	0,00	99,95	0,05
No.50	0,279	0,00	0,00	99,95	0,05
No. 100	0,149	0,00	0,00	99,95	0,05
No. 200	0,075	0,00	0,00	99,95	0,05
Pan	—	1,20	0,05	100,00	0,00
Total (W1)		2491,30	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4.6 memperlihatkan bahwa pada fraksi RAP tersebut tidak terdapat butiran yang tertahan pada saringan berukuran $\frac{3}{4}$ inci dan $\frac{1}{2}$ inci, sesuai dengan penamaannya sebagai RAP berukuran 3/8" sampai No. 4. Sebanyak 92,25% butiran tertahan pada saringan No. 4, yang menunjukkan bahwa fraksi ini berperan sebagai RAP berukuran menengah yang mengisi rongga antara fraksi RAP kasar ($>3/8"$)

dengan fraksi RAP halus (lolos No. 4) dalam gradasi agregat gabungan campuran daur ulang. Menurut (W. Li et al., 2022) dalam jurnal *Materials* yang menegaskan bahwa dalam gradasi campuran aspal, agregat kasar lebih berperan dalam membentuk kerangka, sedangkan agregat halus adalah mengisi rongga udara di antara kerangka tersebut, sehingga saling berkontribusi pada terbentuknya struktur gradasi gabungan yang lebih rapat dan menerus pada campuran daur ulang.

3. RAP Lolos Saringan No. 4

Pengujian dilaksanakan pada benda uji dengan berat awal 500 gram. Hasil pemeriksaan disajikan Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Analisa Saringan Agregat RAP Lolos No. 4

Ukuran Saringan (ASTM)	Ukuran Lubang (mm)	Berat Tertahan (gr)	Berat Tertahan (%)	Kumulatif Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 8	2,36	319,60	64,15	64,15	35,85
No. 16	1,18	120,10	24,11	88,26	11,74
No. 30	0,60	21,90	4,40	92,66	7,34
No. 50	0,279	23,00	4,62	97,27	2,73
No. 100	0,149	9,13	1,83	99,10	0,90
No. 200	0,075	3,10	0,62	99,72	0,28
Pan	—	1,40	0,28	100,00	0,00
Total (W1)		498,20	100,00		

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Seluruh butiran pada fraksi RAP halus lolos melalui saringan No. 4, dengan persentase tertahan terbesar terdapat pada saringan No. 8, yaitu sebesar 64,15%. Berdasarkan pada material yang lolos saringan No. 200 hanya 0,28%, menunjukkan

sedikitnya partikel sangat halus atau *filler* pada fraksi tersebut. Menurut (Liu et al., 2025) dalam jurnal *Materials* (MDPI) menjelaskan bahwa proses *crushing* dapat memecah material RAP berukuran besar menjadi butiran lebih kecil, di mana dalam proses tersebut sebagian aspal dan debu yang menempel pada permukaan gumpalan dapat terlepas sehingga agregat RAP menjadi lebih halus.

B. Berat Jenis Agregat RAP

Untuk mengetahui karakteristik fisik material sebelum digunakan dalam campuran AC-WC maka dilakukan pengujian berat jenis RAP, karena parameter ini memengaruhi perhitungan proporsi agregat, volume campuran, serta parameter volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFB. Pengujian dilakukan pada masing-masing fraksi RAP untuk keperluan perencanaan campuran.

Tabel 4. 14 Rekapitulasi Hasil Berat Jenis dan Penyerapan RAP

Fraksi RAP	Berat Jenis <i>Bulk</i>	Berat Jenis SSD	Berat Jenis <i>Apparent</i>	Penyerapan (%)
RAP > 3/8"	2,574	2,621	2,702	1,833
RAP 3/8" – No. 4	2,673	2,721	2,807	1,781
RAP Lolos No. 4	2,292	2,353	2,441	2,669

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Nilai berat jenis RAP menunjukkan perbedaan antarfraksi. Fraksi RAP 3/8"–No. 4 memiliki *bulk specific gravity* tertinggi sebesar 2,673, kemudian RAP >3/8" sebesar 2,574, sedangkan RAP lolos No. 4 memiliki nilai terendah sebesar 2,292. Rendahnya berat jenis pada fraksi halus diduga berkaitan dengan lapisan aspal lama yang lebih banyak menyelimuti permukaan agregat. Kondisi tersebut didukung oleh nilai penyerapan tertinggi pada fraksi lolos No. 4, yaitu 2,669%. Nilai berat jenis setiap fraksi kemudian digunakan untuk menghitung G_{sb} , G_{sa} dan G_{se} agregat gabungan. Menurut (Rout et al., 2023), menjelaskan bahwa keberadaan lapisan aspal lama berdensitas lebih rendah dapat menurunkan berat jenis RAP, terutama pada partikel halus. Oleh karena itu, karakterisasi berat jenis dan penyerapan setiap fraksi perlu dilakukan secara terpisah karena keberadaan debu, penggumpalan partikel, dan selimut aspal lama dapat memengaruhi nilai G_{sb} , G_{sa} , G_{se} serta estimasi volume rongga dalam campuran.

C. Ekstraksi Aspal RAP

Dilakukan ekstraksi terhadap dua sampel RAP guna menentukan kadar aspal sisa yang masih terdapat di dalamnya, menggunakan metode ekstraksi sentrifugal (SNI 03-6894-2002) dengan berat sampel awal 1.000 gram.

Tabel 4. 15 Hasil Ekstraksi Kadar Aspal RAP

Sampel	Kadar Aspal (%)
Sampel 1	4,41
Sampel 2	4,54
Rata-rata	4,475

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Rumus perhitungan kadar aspal ekstraksi:

$$\text{Berat Aspal RAP} = ((\text{Agregat } 100\% - \text{KAO}\%) \times \text{RAP } 20\%) \times 4,475\% \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Aspal RAP} &= ((100\% - 6,05\%) \times \text{RAP } 20\%) \times 4,475\% \\ &= 0,84\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Estimasi Aspal Baru } (\%) &= \text{KAO } 6,05\% - \text{Aspal RAP } 0,84\% \quad (4.10) \\ &= 5,21\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian ekstraksi, diperoleh kadar aspal residu rata-rata pada material RAP sebesar 4,475%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengikat aspal lama telah mengalami proses *aging*, namun masih dapat memberikan kontribusi terhadap komposisi campuran aspal baru. Dengan kadar RAP sebesar 20% dan KAO rencana sebesar 6,05%, kontribusi aspal dari RAP diperkirakan sebesar 0,84%. Nilai tersebut diperoleh dari hasil perkalian 20% RAP dengan kadar aspal hasil ekstraksi sebesar 4,475%. Dengan demikian, kebutuhan aspal baru diperkirakan sebesar 5,21%.

Estimasi kebutuhan aspal baru sebesar 5,21% menjadi acuan awal dalam perancangan proporsi aspal baru maupun *rejuvenator* yang akan ditambahkan pada tahap pembuatan benda uji Marshall. Penambahan *rejuvenator* diperlukan untuk memperbaiki sifat *binder* RAP yang telah mengalami penuaan dan kehilangan sebagian fleksibilitasnya. Menurut (Eltwati et al., 2022) menyatakan bahwa kinerja retak *binder* yang telah mengalami penuaan menjadi buruk, sehingga penggunaan RAP dalam perkerasan perlu didukung oleh upaya untuk memperbaiki sifat *binder* tersebut. Hal ini mendukung penggunaan *rejuvenator* dalam penelitian ini untuk membantu mengembalikan sifat *binder* RAP yang telah mengalami penuaan.

4.2 Komposisi Jobmix Formula ACWC

4.2.1 Komposisi Jobmix Formula ACWC Konvensional

Setelah pengujian analisis saringan dilakukan, setiap fraksi agregat selanjutnya dicampurkan melalui proses *blending* untuk mendapatkan gradasi agregat gabungan yang memenuhi rentang spesifikasi AC-WC. Penyesuaian dilakukan dengan menentukan proporsi masing-masing fraksi, meliputi agregat kasar, agregat

halus, pasir, dan *filler*, kemudian menghitung persentase lolos setiap ukuran saringan. Hasil gradasi gabungan digunakan sebagai dasar penyusunan *Job Mix Formula* (JMF). Menurut (Othman, 2021), menyatakan bahwa gradasi memengaruhi susunan partikel, kemudahan pemadatan, stabilitas, serta ketahanan terhadap deformasi permanen. Meskipun metode *trial and error* dapat digunakan untuk memperoleh gradasi yang sesuai, evaluasi terhadap struktur agregat tetap diperlukan agar campuran tidak mengalami segregasi dan tetap mudah dipadatkan. Pada campuran AC-WC konvensional, proses *blending* dapat dilakukan terhadap empat fraksi utama, yaitu agregat kasar lolos $\frac{3}{4}$ inci, agregat kasar lolos $\frac{1}{2}$ inci, pasir, dan abu batu. Proporsi setiap fraksi disesuaikan secara bertahap sampai kurva gradasi gabungan berada dalam amplop gradasi AC-WC dan menghasilkan struktur agregat yang stabil.

A. Proporsi dan Gradasi Agregat Gabungan

Berdasarkan metode *trial and error*, diperoleh proporsi setiap fraksi agregat dengan komposisi sebagai berikut: fraksi agregat kasar yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ inci ditetapkan sebesar 18%, agregat kasar lolos $\frac{1}{2}$ " sebesar 34%, pasir sebesar 12%, dan abu batu sebesar 36% terhadap total berat agregat. Persentase kombinasi pada setiap ukuran saringan dihitung dengan mengalikan persentase lolos masing-masing fraksi dengan proporsi campurannya, kemudian dijumlahkan, sebagaimana dirumuskan berikut:

$$P_{kombinasi} = (P_1 \times a) + (P_2 \times b) + (P_3 \times c) + (P_4 \times d) \quad (4.11)$$

Keterangan:

- P_1, P_2, P_3, P_4 = Persentase material yang lolos pada saringan agregat berukuran $\frac{3}{4}$ inci, $\frac{1}{2}$ inci, pasir, dan abu batu(%)
- a, b, c, d = proporsi masing-masing fraksi terhadap total agregat (18%, 34%, 12%, 36%)

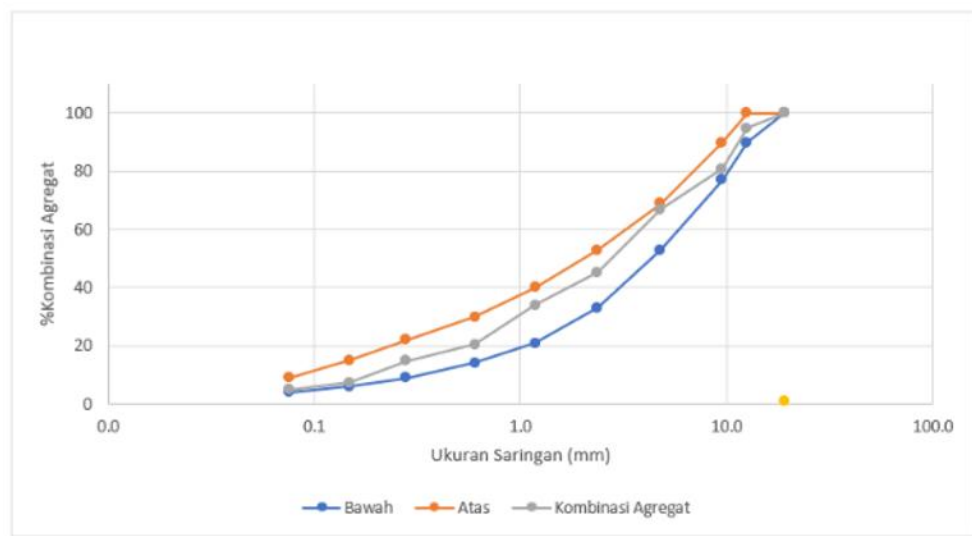
Berikut tabel 4.8 menyajikan rekapitulasi perhitungan gradasi agregat kombinasi beserta kesesuaiannya terhadap rentang spesifikasi di AC-WC.

Tabel 4. 16 Gradasi Agregat Gabungan AC-WC dan Perbandingan terhadap Spesifikasi

Ukuran Saringan (ASTM)	Bukaan (mm)	Agregat 3/4" (%)	Agregat 1/2" (%)	Pasir (%)	Abu Batu (%)	Kombinasi (%)	Spek. Bawah (%)	Spek. Atas (%)	Keterangan
3/4"	19,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	OK
1/2"	12,5	72,18	100,00	100,00	100,00	94,99	90	100	OK
3/8"	9,5	60,75	64,77	100,00	100,00	80,96	77	90	OK
No. 4	4,76	28,91	40,42	100,00	100,00	66,94	53	69	OK
No. 8	2,36	3,32	17,49	90,59	77,61	45,35	33	53	OK
No.16	1,18	2,74	3,54	70,10	66,34	33,99	21	40	OK
No.30	0,60	2,35	3,43	39,41	39,36	20,49	14	30	OK
No.50	0,279	2,32	3,35	22,18	29,16	14,72	9	22	OK
No. 100	0,149	2,29	2,36	2,60	16,21	7,36	6	15	OK
No. 200	0,075	1,52	0,76	1,00	12,01	4,98	4	9	OK

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berikut gambar Kurva Amplop Gradasi Agregat (JMF) ACWC Aspal Konvensional:



Gambar 4. 6 Kurva Amplop JMF ACWC Aspal Konvensional

Berdasarkan Tabel 4.16 dan Gambar 4.8, penggabungan keempat fraksi agregat menghasilkan titik gradasi yang seluruhnya berada di antara batas atas dan batas bawah persyaratan campuran AC-WC pada setiap ukuran saringan. Selain itu, kurva gradasi hasil kombinasi tidak melintasi garis batas spesifikasi, sehingga gradasi agregat gabungan dinyatakan memenuhi (OK) dan layak digunakan sebagai dasar penentuan JMF. (Y. Zhang et al., 2024) menjelaskan bahwa desain campuran aspal secara tradisional dilakukan melalui proses *trial and error* untuk mengoptimalkan gradasi agregat dan kadar aspal. Proses tersebut memerlukan beberapa kombinasi dan evaluasi karena perubahan gradasi dapat memengaruhi sifat volumetrik dan kinerja mekanis campuran. Oleh sebab itu, meskipun gradasi kombinasi pada penelitian ini telah memenuhi amplop spesifikasi, kelayakannya tetap perlu dikonfirmasi melalui pengujian Marshall dan parameter kinerja campuran lainnya.

B. Perhitungan Kadar Aspal Perkiraan (P_b)

Sebelum benda uji Marshall dibuat, kadar aspal perkiraan awal (Perkiraan Bitumen/ P_b) ditentukan menggunakan persamaan dari *The Asphalt Institute* (1997) sebagai dasar penetapan rentang kadar aspal:

$$P_b = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\%Filler) + K \quad (4.12)$$

Keterangan:

- P_b = estimasi kadar aspal awal (%)
- CA = persentase agregat kasar yang tertahan pada saringan No. 8.
- FA = persentase agregat halus yang melewati saringan No. 8 dan tertahan pada saringan No. 200 (%).
- $Filler$ = persentase material pengisi (*filler*) yang melewati saringan No. 200 (%).
- K = nilai konstanta dalam rentang 0,15–0,20 yang ditetapkan berdasarkan persentase material yang melewati saringan No. 200. (0,15 untuk 11-15%, 0,18 untuk 6-10%, dan 0,20 untuk 5% atau kurang), Untuk campuran berjenis AC

dan HRS, nilai konstanta tersebut dapat berada pada kisaran 0,5–1,0, bergantung pada tingkat penyerapan agregat.

Berdasarkan gradasi kombinasi pada Tabel 4.16, didapatkan nilai CA sebesar 54,65%, FA sebesar 40,38%, dan *Filler* sebesar 4,98%, dengan nilai konstanta K sebesar 0,18. Selain itu, dihitung pula nilai penyerapan (*absorption*) dan konstanta fraksi agregat masing-masing terhadap proporsinya terdapat campuran, berikut dituangkan di Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Penyerapan Agregat dan Nilai Konstanta

Material	Absorpsi (%)	Konstanta
Agregat 3/4"	1,626	0,29268
Agregat 1/2"	1,317	0,44782
Pasir	2,145	0,25741
Abu Batu	2,249	0,80982
Jumlah		0,9039

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Dengan CA sebesar 54,65%, FA sebesar 40,38%, *Filler* sebesar 4,98%, K sebesar 0,18, dan faktor penyerapan agregat gabungan 0,90386, diperoleh Pb sebesar 5,53%. Nilai tersebut kemudian dibulatkan menjadi 5,50% sebagai titik tengah variasi kadar aspal. Pendekatan tersebut sejalan dengan (Khatib & Saleh, 2023) yang menempatkan Pb sebagai kadar aspal awal untuk menentukan variasi pengujian.

C. Variasi Kadar Aspal Benda Uji

Benda uji campuran konvensional dibuat dengan variasi kadar aspal $\pm 2\%$ dari Pb pada interval 0,5% yaitu 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5% masing-masing dengan berat 1.200 gram, berdasarkan nilai Pb sebesar 5,50%. Tabel 4.10 menyajikan proporsi berat bahan-bahan penyusun untuk setiap variasi kadar aspal tersebut.

Tabel 4. 18 Komposisi Berat Benda Uji pada Berbagai Variasi Kadar Aspal

Kadar Aspal (%)	Berat Benda Uji (gr)	Berat Agregat (gr)	Agregat 3/4" (gr)	Agregat 1/2" (gr)	Pasir (gr)	Abu Batu (gr)	Aspal (gr)
3,5	1200,00	1158,00	208,44	393,72	138,96	416,88	42,00
4,0	1200,00	1152,00	207,36	391,68	138,24	414,72	48,00
4,5	1200,00	1146,00	206,28	389,64	137,52	412,56	54,00
5,0	1200,00	1140,00	205,20	387,60	136,80	410,40	60,00
5,5	1200,00	1134,00	204,12	385,56	136,08	408,24	66,00
6,0	1200,00	1128,00	203,04	383,52	135,36	406,08	72,00
6,5	1200,00	1122,00	201,96	381,48	134,64	403,92	78,00

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Setiap kenaikan kadar aspal akan menambah bobot campuran aspal secara langsung, sementara jumlah agregat dikurangi atau ditambah sedemikian rupa sehingga total bobot sampel tidak berubah. Proses pemadatan tiap sampel menggunakan alat Marshall bertujuan untuk mendapatkan nilai stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFB, yang selanjutnya dijadikan acuan dalam menentukan KAO berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. (Jasim & Ismael, 2021) menegaskan bahwa penentuan KAO perlu mempertimbangkan karakteristik Marshall sekaligus parameter volumetrik. Sebanyak 21 sampel uji dibuat dari tujuh variasi kadar aspal yang berbeda (tiga per variasi).

4.2.2 Komposisi Jobmix Formula ACWC RAP 20%

Dengan mengacu pada Spesifikasi Khusus Interim SKh-1.6.27, campuran AC-WC pada penelitian ini direncanakan menggunakan RAP sebesar 20% dari keseluruhan berat agregat. Ketentuan ini menjadi penting sebab *binder* yang terkandung dalam RAP sudah mengalami proses penuaan (*aging*), sehingga sifatnya menjadi lebih getas dan dapat berdampak pada fleksibilitas, tingkat kepadatan, serta kemampuan menahan retak. Menurut (Bhatt & Wu, 2025b) menjelaskan bahwa peningkatan kadar RAP dapat meningkatkan kekakuan campuran akibat oksidasi *binder* lama, sedangkan *rejuvenator* dapat membantu memulihkan fleksibilitas, meski penggunaan *rejuvenator* berlebihan dapat membuat campuran terlalu lunak dan meningkatkan risiko deformasi permanen. Oleh karena itu, kandungan RAP 20% digunakan sebagai dasar evaluasi karakteristik Marshall dan kinerja campuran dengan maupun tanpa *rejuvenator*.

Proporsi antara fraksi agregat baru dengan RAP yang dipakai dalam campuran AC-WC berkadar RAP 20% pada studi ini disajikan pada Tabel 4.1 di bawah, berdasarkan hasil perhitungan gradasi melalui metode *trial and error*.

Tabel 4. 19 Proporsi Fraksi Agregat dan RAP pada Campuran AC-WC RAP 20%

No.	Fraksi Material	Proporsi (%)
1	Agregat 3/4"	15
2	Agregat 1/2"	30
3	Pasir	5
4	Abu Batu	30
5	RAP > 3/8"	6
6	RAP 3/8" - #4	7
7	RAP Lolos No. 4	7
	Total	100

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil perhitungan gradasi melalui metode trial and error, maka susunan agregat baru yang terdiri dari agregat 3/4 inci (15%), agregat 1/2 inci (30%), pasir (5%), dan abu batu (30%) total 80% sementara 20% sisanya adalah RAP, terdiri dari RAP tertahan 3/8 inci (6%), RAP lolos 3/8 inci-tertahan No. 4 (7%), dan RAP lolos No. 4 (7%). Pembagian ini dilakukan agar pengaruh RAP terhadap gradasi gabungan dapat dikendalikan dengan lebih baik, mengingat gradasi hasil *milling* dapat berbeda dari gradasi agregat awal.

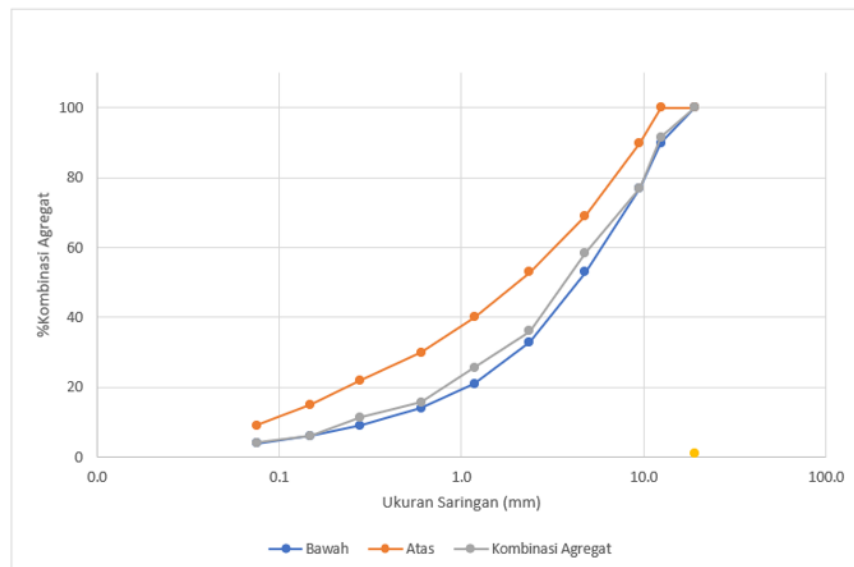
Proporsi tersebut kemudian dikombinasikan dengan hasil analisis saringan setiap fraksi untuk mendapatkan gradasi agregat gabungan. Hasil perhitungan dibandingkan dengan batas gradasi AC-WC dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, sebagaimana disajikan Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Analisis Gradasi Agregat pada Campuran AC-WC RAP 20%

Ukuran Ayakan	Ukuran Lubang (mm)	Gradasi Kombinasi Agregat + RAP (%)	Spesifikasi Bawah (%)	Spesifikasi Atas (%)	Keterangan
3/4"	19.0	100.00	100	100	Memenuhi
1/2"	12.5	91.51	90	100	Memenuhi
3/8"	9.5	77.01	77	90	Memenuhi
No.4	4.76	58.47	53	69	Memenuhi
No.8	2.36	36.07	33	53	Memenuhi
No.16	1.18	25.71	21	40	Memenuhi
No.30	0.60	15.68	14	30	Memenuhi
No.50	0.279	11.41	9	22	Memenuhi
No.100	0.149	6.12	6	15	Memenuhi
No.200	0.075	4.14	4	9	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berikut gambar Kurva Amplop Gradasi Agregat (JMF) ACWC Aspal RAP 20%:



Gambar 4. 7 Kurva Gradasi JMF ACWC Aspal RAP 20%

Seluruh persentase lolos saringan terdapat di antara kurva amplop batas atas dan batas bawah sesuai spesifikasi. Persentase lolos saringan No. 4 sebesar 58,47% menunjukkan gradasi menerus, sementara persentase lolos No. 200 sebesar 4,14% berada dalam rentang 4–9%. Setelah gradasi dinyatakan sesuai spesifikasi, digunakan KAO campuran konvensional sebesar 6,05% sebagai acuan namun nilai ini perlu disesuaikan karena 20% agregat berasal dari RAP yang masih mengandung *aged binder*, sehingga kandungan aspal RAP perlu diperhitungkan agar kadar aspal total tidak melebihi rencana.

Berdasarkan hasil pengujian, kandungan aspal dari RAP sebesar 0,84%, sehingga kebutuhan virgin asphalt untuk mencapai kadar aspal total 6,05% dihitung sebesar 5,21%. Nilai ini menjadi acuan penentuan untuk variasi pada kadar aspal baru: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, dan 6,0% (*interval* 0,5%), dengan berat total benda uji 1.200 gram. menyatakan bahwa *binder* yang terdapat dalam RAP perlu diperhitungkan sebagai bagian dari kontribusi kadar aspal, sehingga jumlah *virgin binder* harus disesuaikan. Dengan pendekatan ini, kontribusi aspal RAP sebesar 0,84% diperhitungkan dalam penetapan kebutuhan aspal baru. Komposisi kadar

aspal pada benda uji dengan kandungan RAP sebesar 20% disajikan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Komposisi Material Benda Uji Marshall pada Variasi Kadar Aspal

Material	Proporsi (%)	Kadar Aspal 4,0% (gram)	Kadar Aspal 4,5% (gram)	Kadar Aspal 5,0% (gram)	Kadar Aspal 5,5% (gram)	Kadar Aspal 6,0% (gram)
Agregat 3/4"	15	172.80	171.90	171.00	170.10	169.20
Agregat 1/2"	30	345.60	343.80	342.00	340.20	338.40
Pasir	5	57.60	57.30	57.00	56.70	56.40
Abu Batu	30	345.60	343.80	342.00	340.20	338.40
Aspal	-	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00
RAP > 3/8"	6	69.12	68.76	68.40	68.04	67.68
RAP 3/8" - #4	7	80.64	80.22	79.80	79.38	78.96
RAP Lolos No.4	7	80.64	80.22	79.80	79.38	78.96
Berat Total	100	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4.21 menunjukkan komposisi material variasi kadar aspal di setiap benda uji. Setiap variasi kadar aspal ini dibuat sebanyak tiga benda uji, sehingga totalnya 15 benda uji, dengan berat agregat yang disesuaikan agar total berat campuran tetap 1.200 gram meski kadar aspal berbeda-beda. Setiap variasi kadar aspal dibuat sebanyak tiga benda uji agar diperoleh nilai rata-rata yang lebih akurat dan representatif, dibandingkan hanya mengandalkan satu sampel per variasi.

4.2.3 Komposisi Jobmix Formula ACWC RAP 20%+RHA+WEO

Rejuvenator yang digunakan terdiri atas *Waste Engine Oil* (WEO) dan *Rice Husk Ash* (RHA). WEO digunakan karena mengandung fraksi minyak ringan yang dapat berfungsi sebagai *softening agent* bagi *binder* RAP yang telah menua. RHA berperan sebagai *filler* pendamping yang diharapkan dapat menjaga kekakuan mastik sehingga stabilitas campuran tidak turun secara berlebihan ketika kadar WEO ditingkatkan. Penggabungan kedua material tersebut dilakukan untuk mencapai keseimbangan antara parameter stabilitas dan durabilitas pada campuran AC-WC yang mengandung 20% RAP. Perancangan *Job Mix Formula* (JMF) dilakukan menggunakan benda uji bermassa 1.200 gram pada Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5,6%, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Komposisi Jobmix Formula ACWC dengan RAP 20%+RHA+WEO

Material	Persentase (%)	Berat (gram)
Agregat 3/4"	15	169,92
Agregat 1/2"	30	339,84
Pasir	5	56,64
Abu Batu	30	339,84
Aspal Baru (Pen 60/70)	5,6	67,20
RAP > 3/8"	6	67,97
RAP 3/8" - No.4	7	79,30
RAP Lolos No.4	7	79,30
Total	100	1200,00

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Agregat baru menyumbang 80% dari berat campuran, sedangkan RAP sebesar 20% dibagi menjadi tiga fraksi. Pembagian tersebut dilakukan agar gradasi gabungan tetap berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh SKh-1.6.27. Karena RAP masih mengandung residual *binder*, kadar aspal total harus memperhitungkan aspal baru dan aspal lama secara bersamaan. Menurut (Gottumukkala et al., 2021) menyatakan bahwa pemanfaatan RAP dalam campuran beraspal panas memerlukan pemahaman terhadap kuantitas dan karakteristik *reclaimed binder* yang terkandung

di dalamnya. Rekapitulasi perhitungan kadar dan berat *binder* total dituangkan di Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Perhitungan Kadar *Binder* ACWC RAP 20%+RHA+WEO

Parameter	Nilai	Satuan
Kadar Aspal Optimum (KAO) RAP	5,6	%
Kadar RAP dalam campuran	20	%
Kandungan aspal dalam agregat RAP	4,475	%
Berat aspal baru yang ditambahkan	67,20	gram
Berat aspal lama dalam RAP	10,13856	gram
Berat total <i>binder</i> (aspal baru + aspal RAP)	77,34	gram

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berat *binder* RAP dalam campuran sebesar 10,138 gram digunakan sebagai dasar penentuan dosis *rejuvenator*. Persentase RHA dan WEO dihitung terhadap berat *binder* RAP. Pendekatan sama dengan (Mehmood, Jakarni, et al., 2024), yang menyatakan bahwa dosis *rejuvenator* perlu dikaitkan dengan jumlah dan tingkat penuaan *binder*, bukan hanya berdasarkan berat agregat. Dalam penelitian ini digunakan campuran kontrol tanpa *rejuvenator* serta tiga variasi *rejuvenator*, yaitu RHA 2% + WEO 2%, RHA 2% + WEO 4%, dan RHA 2% + WEO 6%. Kadar RHA dipertahankan 2%, sedangkan kadar WEO dinaikkan untuk mengamati perubahan karakteristik Marshall. Berikut rincian variasi kadar *rejuvenator* beserta benda uji dituangkan Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Variasi Kadar *Rejuvenator* Komposit WEO dan RHA

No	Kode Benda Uji	WEO (%)	Berat WEO (gr)	RHA (%)	Berat RHA (gr)	Benda Uji Marshall	Benda Uji IKS
1	RHA0-WEO0	0	0	0	0	3	6
2	RHA2-WEO2	2	0,20	2	0,20	3	6
3	RHA2-WEO4	4	0,41	2	0,20	3	6
4	RHA2+WEO6	6	0,61	2	0,20	3	6

No	Kode Benda Uji	WEO (%)	Berat WEO (gr)	RHA (%)	Berat RHA (gr)	Benda Uji Marshall	Benda Uji IKS
Jumlah Total Benda Uji						12	24

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Sebagaimana tercantum dalam Tabel 4.24, pada masing-masing variasi *rejuvenator* digunakan tiga benda uji Marshall standar (direndam 30 menit) dan enam benda uji untuk pengujian Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Terdapat enam benda uji untuk IKS dibagi menjadi kondisi perendaman standar dan perendaman selama 24 jam sesuai prosedur immersion Marshall test. Dengan demikian, kebutuhan benda uji untuk pengujian *rejuvenator* terdiri atas sembilan benda uji Marshall dan 18 benda uji IKS. Pembagian benda uji tersebut sejalan dengan penelitian (Yao et al., 2022), menggunakan pendekatan serupa dengan membagi benda uji menjadi kelompok *unconditioned* dan *conditioned*, masing-masing dengan waktu perendaman berbeda. Kelompok terkondisi direndam selama 24 jam di suhu 60°C, sedangkan untuk kelompok pembandingan yang direndam selama 30 menit di suhu 60°C. Selanjutnya, rasio stabilitas dihitung berdasarkan nilai rata-rata stabilitas dari kedua kelompok tersebut.

4.3 Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-WC Konvensional

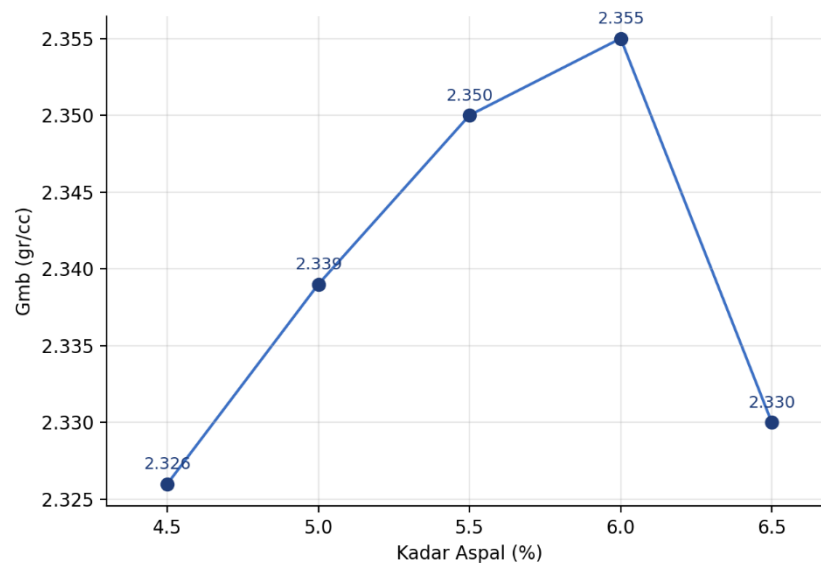
4.3.1 Berat Jenis (*Bulk*) Campuran AC-WC Konvensional

Nilai berat jenis *bulk* (Gmb) menunjukkan tingkat kepadatan benda uji setelah pemadatan Marshall, diperoleh dari perbandingan berat kering terhadap volume *bulk* (termasuk rongga udara internal). Nilai ini dipengaruhi oleh karakteristik berat jenis agregat, aspal, dan komposisi campuran semakin tinggi Gmb, umumnya semakin besar tingkat kepadatannya. Parameter ini digunakan dalam perhitungan VIM, VMA, dan VFB, sekaligus menjadi dasar evaluasi karakteristik campuran terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Hasil pengujian berat jenis *bulk* campuran AC-WC konvensional disajikan di tabel berikut ini.

Tabel 4. 25 Pengujian Berat Jenis (*Bulk*) Campuran dan Berat Jenis Maks (Gmm)

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	BJ <i>Bulk</i> Campuran (gr/cm ³)	BJ Maks. Teoritis - Gmm (gr/cm ³)
4,5	A	2.289	2.508
	B	2.371	2.508
	C	2.317	2.508
	Rata-rata	2.326	2.508
5,0	A	2.350	2.489
	B	2.333	2.489
	C	2.335	2.489
	Rata-rata	2.339	2.489
5,5	A	2.333	2.471
	B	2.363	2.471
	C	2.355	2.471
	Rata-rata	2.350	2.471
6,0	A	2.357	2.453
	B	2.354	2.453
	C	2.353	2.453
	Rata-rata	2.355	2.453
6,5	A	2.320	2.436
	B	2.332	2.436
	C	2.337	2.436
	Rata-rata	2.330	2.436

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4.8 Kadar Aspal dengan Berat Jenis *Bulk* (Gmb) Campuran

Data pada Tabel 4.25 memperlihatkan bahwa nilai Gmb naik dari 2,326 g/cm³ menjadi 2,355 g/cm³ seiring bertambahnya kadar aspal dari 4,5% ke 6,0%. Akan tetapi, ketika kadar aspal ditingkatkan lagi hingga 6,5%, nilai Gmb justru turun kembali menjadi 2,330 g/cm³. Peningkatan nilai Gmb hingga kadar tertentu mengindikasikan bahwa penambahan aspal dapat membantu proses pemadatan dan menghasilkan susunan agregat yang lebih rapat. Sebaliknya, kadar aspal yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan kepadatan campuran. Hal ini senada dengan pernyataan (Wu et al., 2021) yang mengungkapkan bahwa besarnya kadar aspal termasuk salah satu penentu utama karakteristik volumetrik serta proses pemadatan campuran aspal. Sementara itu, Gmm menurun dari 2,508 g/cm³ menjadi 2,436 g/cm³ dengan meningkatnya kadar aspal. Penurunan ini berkaitan dengan berat jenis aspal sebesar 1,041 yang lebih rendah dibandingkan Gsb agregat gabungan sebesar 2,622, serta perubahan proporsi aspal dalam campuran. Nilai Gmb dan Gmm tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan parameter volumetrik campuran, yaitu VIM, VMA, dan VFB.

4.3.2 Rongga dalam Campuran / VIM AC-WC Konvensional

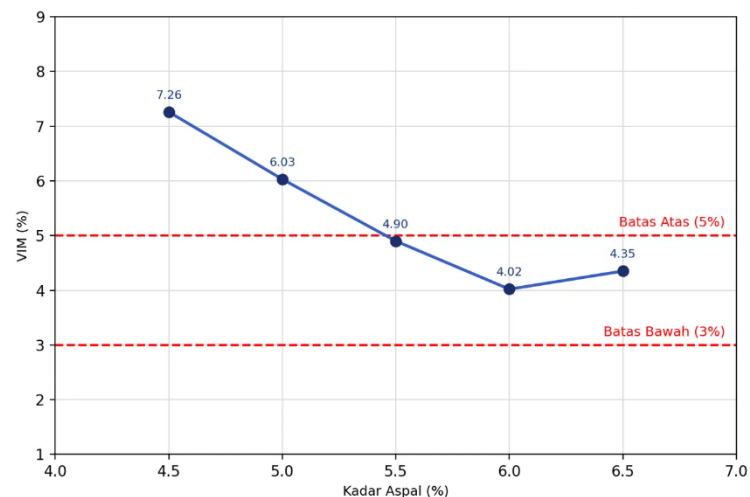
Nilai VIM menunjukkan persentase terhadap rongga udara yang tersisa pada campuran pasca-pemadatan, yang berpengaruh terhadap durabilitas, permeabilitas, dan ketahanan deformasi. VIM yang terlalu tinggi meningkatkan risiko masuknya udara dan air ke dalam campuran, yang pada akhirnya mempercepat proses oksidasi atau penuaan pada aspal, sedangkan VIM terlalu rendah meningkatkan risiko bleeding, sehingga nilai VIM perlu dikonfirmasi ulang terhadap ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 guna memastikan bahwa campuran beraspal panas jenis AC-WC konvensional memenuhi ketentuan volumetrik yang dipersyaratkan. Berikut dituangkan Tabel 4. 26.

Tabel 4. 26 Hasil Pengujian Rongga dalam Campuran (VIM)

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	VIM (%)
4,5	A	8.72
	B	5.45
	C	7.61
	Rata-rata	7.26
5,0	A	5.59
	B	6.28
	C	6.21
	Rata-rata	6.03
5,5	A	5.61
	B	4.38
	C	4.72
	Rata-rata	4.90
6,0	A	3.91
	B	4.05
	C	4.10
	Rata-rata	4.02
6,5	A	4.75

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	VIM (%)
	B	4.26
	C	4.04
	Rata-rata	4.35

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4.8 Hubungan Kadar Aspal dengan VIM

VIM ditentukan menggunakan parameter Gmm dan Gmb sesuai SNI 2489:2018. Nilai VIM campuran konvensional turun dari 7,26% (kadar 4,5%) menjadi 4,02% (kadar 6,0%), lalu naik lagi menjadi 4,35% (kadar 6,5%). Penurunan ini menunjukkan aspal mengisi rongga udara antaragregat, sementara kenaikan pada kadar 6,5% mengindikasikan efektivitas pengisian rongga mulai menurun. Dengan rentang yang disyaratkan Bina Marga 2025 untuk VIM (3–5% untuk AC-WC), kadar 4,5% dan 5,0% belum memenuhi, sedangkan 5,5%, 6,0%, dan 6,5% sudah memenuhi. Temuan ini sejalan dengan (Che et al., 2021) yang menemukan adanya hubungan antara rongga udara efektif dan permeabilitas campuran aspal serta peningkatan kerentanan terhadap kerusakan akibat kelembapan pada campuran dengan rongga udara tinggi.

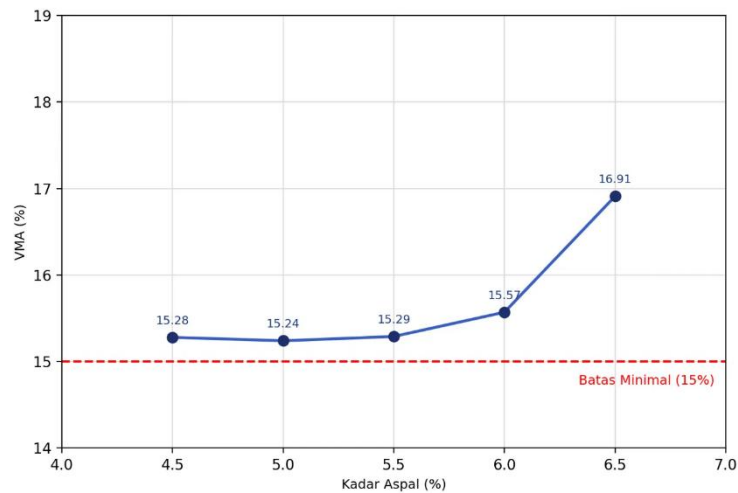
4.3.3 Rongga dalam Agregat Mineral / VMA AC-WC Konvensional

Untuk memastikan bahwa campuran AC-WC konvensional telah memenuhi persyaratan volumetrik yang ditetapkan, hasil analisis pada Tabel 4.27 harus sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2025.

Tabel 4. 27 Hasil Pengujian Rongga dalam Agregat Mineral (VMA)

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	VMA (%)
4,5	A	16.62
	B	13.63
	C	15.60
	Rata-rata	15.28
5,0	A	14.84
	B	15.46
	C	15.40
	Rata-rata	15.24
5,5	A	15.92
	B	14.82
	C	15.13
	Rata-rata	15.29
6,0	A	15.48
	B	15.60
	C	15.64
	Rata-rata	15.57
6,5	A	17.26
	B	16.83
	C	16.64
	Rata-rata	16.91

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 9 Hubungan Kadar Aspal dengan VMA

VMA merupakan volume ruang antarpartikel agregat yang mencakup ruang kosong berisi udara serta bagian aspal yang berfungsi efektif serta relatif stabil pada kadar 4,5–5,5% (15,24–15,29%), lalu meningkat menjadi 15,57% (kadar 6,0%) dan 16,91% (kadar 6,5%). Seluruh nilai ini memenuhi batas minimum 15% sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Menurut (H. Zhang et al., 2023) menempatkan VMA sebagai salah satu indeks penting dalam evaluasi struktur volumetrik dan desain gradasi campuran aspal panas, dan karena seluruh nilai VMA sudah sesuai persyaratan, parameter ini tidak menjadi faktor pembatas dalam penetapan KAO.

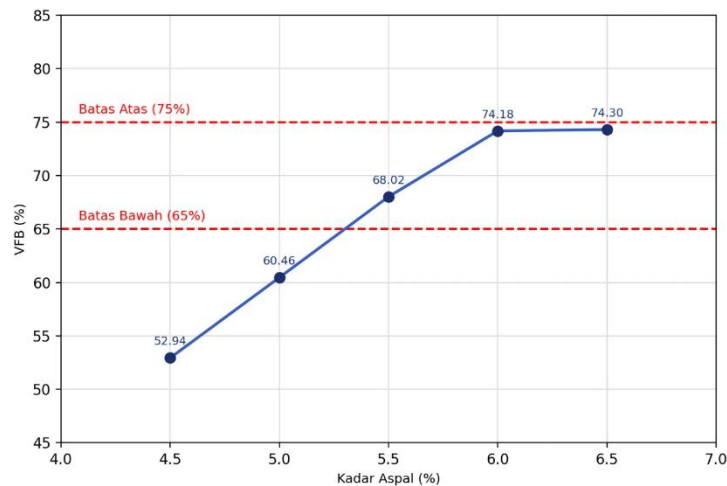
4.3.4 Rongga Terisi Aspal / VFB AC-WC Konvensional

Untuk memastikan kombinasi AC-WC konvensional memenuhi parameter volumetrik yang disyaratkan, nilai VFB hasil pengujian Tabel 4.28 harus sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

Tabel 4. 28 Pengujian Rongga Terisi Aspal (VFB)

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	VFB (%)
4,5	A	47.53
	B	60.02
	C	51.25
	Rata-rata	52.94
5,0	A	62.32
	B	59.39
	C	59.66
	Rata-rata	60.46
5,5	A	64.78
	B	70.48
	C	68.80
	Rata-rata	68.02
6,0	A	74.73
	B	74.04
	C	73.79
	Rata-rata	74.18
6,5	A	72.47
	B	74.69
	C	75.72
	Rata-rata	74.30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 10 Hubungan Kadar Aspal dengan VFB

VFB menggambarkan seberapa besar bagian ruang antaragregat (VMA) yang sudah terisi oleh aspal efektif, meningkat dari 52,94% (kadar 4,5%) menjadi 74,30% (kadar 6,5%) seiring bertambahnya aspal dan berkurangnya VIM. Kadar 4,5% dan 5,0% belum memenuhi spesifikasi VFB, sedangkan 5,5%, 6,0%, dan 6,5% sudah memenuhi. Menurut (Rahmahima et al., 2020) menjelaskan bahwa VFB merupakan volume ruang antaragregat yang ditempati oleh aspal efektif, sehingga nilainya sangat dipengaruhi oleh kadar aspal. Berdasarkan Seksi 6.3 Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, VFB AC-WC disyaratkan 65–75%, sehingga kadar 5,5%–6,5% memenuhi ketentuan tersebut.

4.3.5 Stabilitas Marshall AC-WC Konvensional

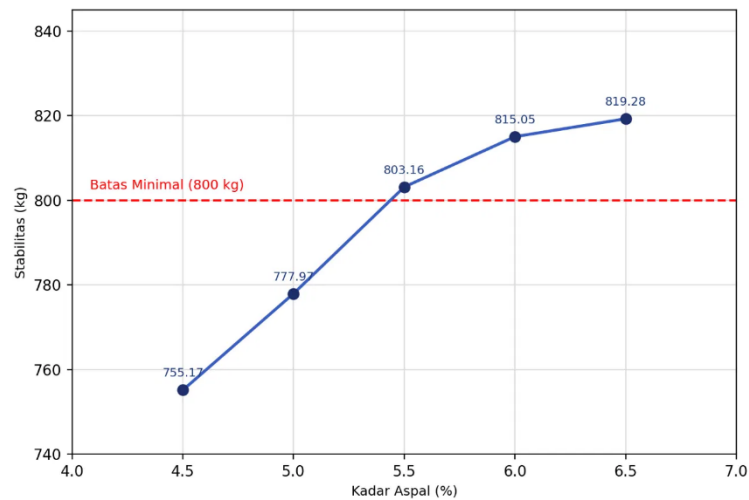
Untuk memastikan bahwa kombinasi AC-WC konvensional memenuhi standar volumetrik yang disyaratkan, nilai stabilitas marshall yang diperoleh dari hasil pengujian pada Tabel 4.29 selanjutnya dievaluasi dengan mengacu pada ketentuan yang tertuang dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

Tabel 4. 29 Hasil Pengujian Stabilitas Marshall

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	Stabilitas Dibaca (kg)	Stabilitas Disesuaikan (kg)
4,5	A	79.62	770.76
	B	77.40	749.31

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	Stabilitas Dibaca (kg)	Stabilitas Disesuaikan (kg)
	C	77.00	745.44
	Rata-rata	78.01	755.17
5,0	A	80.33	777.63
	B	79.93	773.79
	C	80.83	782.51
	Rata-rata	80.36	777.97
5,5	A	83.85	811.75
	B	83.01	803.63
	C	82.03	794.08
	Rata-rata	82.96	803.16
6,0	A	82.53	798.97
	B	84.96	822.47
	C	85.09	823.72
	Rata-rata	84.19	815.05
6,5	A	83.26	806.02
	B	85.72	829.86
	C	84.90	821.95
	Rata-rata	84.63	819.28

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 11 Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas Marshall

Stabilitas Marshall, yang menggambarkan kemampuan campuran menahan beban sebelum runtuh atau mengalami deformasi plastis, meningkat dari 755,17 kg (kadar 4,5%) menjadi 819,28 kg (kadar 6,5%) hal ini menunjukkan bahwa penambahan *binder* memperbaiki pelapisan agregat serta kohesi-adhesi antarpartikel. Hal ini sejalan dengan (Fahad, 2026) yang menjelaskan bahwa kandungan *binder* yang terlalu rendah dapat menyebabkan pelapisan agregat dan adhesi tidak optimal. Ketentuan Seksi 6.3 pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 menetapkan bahwa nilai minimum stabilitas untuk AC-WC adalah 800 kg.

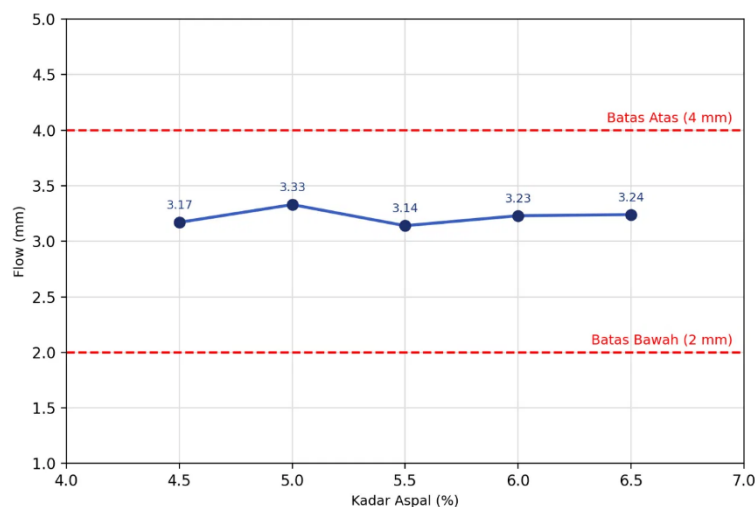
4.3.6 Kelelehan / *Flow* AC-WC Konvensional

Nilai *Flow* yang tercatat dari hasil pengujian pada Tabel 4.30 kemudian dibandingkan dengan ketentuan yang tertuang dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengetahui kesesuaian campuran AC-WC konvensional terhadap ketentuan parameter yang dipersyaratkan.

Tabel 4. 30 Hasil Pengujian Kelelehan (*Flow*)

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	<i>Flow</i> (mm)
4,5	A	2.88
	B	3.10
	C	3.52
	Rata-rata	3.17
5,0	A	2.89
	B	3.66
	C	3.45
	Rata-rata	3.33
5,5	A	2.44
	B	3.46
	C	3.52
	Rata-rata	3.14
6,0	A	3.10
	B	3.43
	C	3.15
	Rata-rata	3.23
6,5	A	3.58
	B	2.90
	C	3.25
	Rata-rata	3.24

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 12 Hubungan Kadar Aspal dengan *Flow*

Berdasarkan tabel 4.30 serta gambar 4.12, Nilai *flow* ACWC campuran konvensional berada pada rentang 3,17–3,33 mm pada kadar aspal 4,5–5,0%, kemudian turun menjadi 3,14 mm pada 5,5% dan meningkat kembali menjadi 3,23–3,24 mm pada 6,0–6,5%. Peningkatan *flow* pada kadar awal berkaitan dengan fungsi aspal sebagai pelumas antarbutir. Saat kadar aspal meningkat, partikel agregat lebih mudah bergeser sehingga deformasi vertikal meningkat (*flow*) yang terjadi sebelum benda uji mencapai keruntuhan menjadi lebih besar.

Penurunan *flow* pada kadar 5,5% menunjukkan kondisi pengisian rongga yang relatif efektif tanpa kelebihan aspal. Pada kondisi ini, *interlocking* antaragregat masih cukup kuat. Sebaliknya, peningkatan *flow* pada kadar 6,0–6,5% menunjukkan terbentuknya film aspal yang lebih tebal sehingga gesekan dan *interlocking* berkurang. Secara umum, pola tersebut konsisten dengan sifat viskoelastis aspal, yaitu kadar terlalu rendah cenderung menghasilkan campuran lebih kaku, sedangkan kadar terlalu tinggi meningkatkan plastisitas.

Merujuk Spesifikasi Umum 2025 Bina Marga Seksi 6.3, nilai *flow* AC-WC disyaratkan 2–4 mm, seluruh variasi kadar aspal yang diuji (3,14–3,33 mm) telah memenuhi persyaratan. Menurut (Awan et al., 2022) dalam jurnal *Buildings* (MDPI) menegaskan bahwa *flow* merupakan properti yang berlawanan dengan stabilitas, yang menentukan karakteristik elasto-plastis campuran aspal yaitu

kemampuan campuran untuk menyesuaikan diri terhadap pergerakan dan penurunan bertahap pada lapisan di bawahnya (*subgrade*) tanpa mengalami keretakan.

4.3.7 *Marshall Quotient* / MQ AC-WC Konvensional

Untuk mengevaluasi kesesuaian campuran AC-WC konvensional terhadap persyaratan yang berlaku, nilai *Marshall Quotient* (MQ) di dapatkan dari hasil pengujian pada Tabel 4.31 selanjutnya dievaluasi dengan mengacu pada ketentuan yang tertuang dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

Tabel 4. 31 Hasil Perhitungan *Marshall Quotient* (MQ)

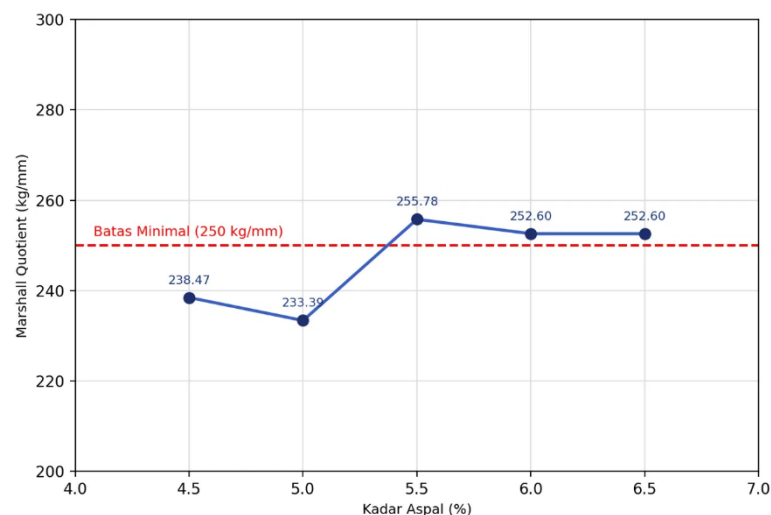
Kadar Aspal (%)	Benda Uji	Stabilitas (kg)	<i>Flow</i> (mm)	MQ (kg/mm)
4,5	A	770.76	2.88	267.63
	B	749.31	3.10	241.71
	C	745.44	3.52	211.77
	Rata-rata	755.17	3.17	238.47
5,0	A	777.63	2.89	269.07
	B	773.79	3.66	211.42
	C	782.51	3.45	226.81
	Rata-rata	777.97	3.33	233.39
5,5	A	811.75	2.44	332.69
	B	803.63	3.46	232.26
	C	794.08	3.52	225.59
	Rata-rata	803.16	3.14	255.78
6,0	A	798.97	3.10	257.73
	B	822.47	3.43	239.79
	C	823.72	3.15	261.50
	Rata-rata	815.05	3.23	252.60
6,5	A	806.02	3.58	225.14
	B	829.86	2.90	286.16

Kadar Aspal (%)	Benda Uji	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
	C	821.95	3.25	252.91
	Rata-rata	819.28	3.24	252.60

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Marshall Quotient (MQ) dihasilkan dari perhitungan perbandingan antara stabilitas dan *flow*. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan tingkat kekakuan relatif dari campuran material aspal, dan dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$MQ(kg/mm) = \frac{Stabilitas}{Flow} \quad (4.13)$$



Gambar 4. 13 Hubungan Kadar Aspal dengan *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) yang diperoleh dari hasil bagi antara stabilitas dan *flow*, dipakai sebagai tolok ukur kekakuan relatif suatu campuran, dengan nilai berkisar 233,39–255,78 kg/mm (tertinggi pada kadar 5,5%). (Tong et al., 2022) bahwa nilai MQ yang besar mengindikasikan campuran bersifat lebih kaku, sedangkan nilai rendah berkaitan dengan kecenderungan terhadap deformasi plastis. Dengan tolok ukur minimum 250 kg/mm, kadar 5,5%, 6,0%, dan 6,5% memenuhi kriteria, sedangkan 4,5% dan 5,0% belum.

4.3.8 Penentuan Nilai KAO Aspal Konvensional

Data hasil pengujian parameter Marshall untuk campuran AC-WC konvensional guna menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) ditampilkan pada Tabel 4.32, disertai dengan dievaluasi dengan mengacu pada ketentuan yang tertuang dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

Tabel 4. 32 Rekapitulasi Parameter Marshall dan Perbandingan dengan Spesifikasi Bina Marga 2025

Kadar Aspal (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
4,5	7,26	15,28	52,94	755,17	3,17	238,47
5,0	6,03	15,24	60,46	777,97	3,33	233,39
5,5	4,90	15,29	68,02	803,16	3,14	255,78
6,0	4,02	15,57	74,18	815,05	3,23	252,60
6,5	4,35	16,91	74,30	819,28	3,24	252,60
Spesifikasi	3,0 – 5,0	Min. 15,0	65 – 75	Min. 800	2,0 – 4,0	Min. 250

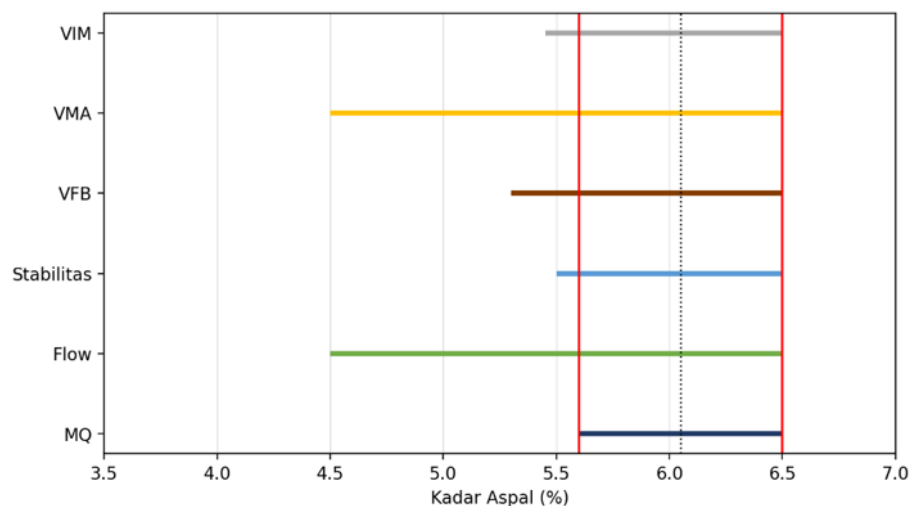
Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Penetapan KAO dilaksanakan dengan cara mencari rentang kadar aspal yang secara bersamaan memenuhi semua parameter Marshall (VIM, VMA, VFB, stabilitas, *flow*, dan MQ) secara bersamaan rentang yang saling beririsan dari seluruh parameter inilah yang menjadi dasar penetapan KAO akhir, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan dirangkum dalam Tabel 4.33.

Tabel 4. 33 Rentang Kadar Aspal yang Memenuhi Syarat per Parameter

Parameter	Rentang Memenuhi Syarat (%)	Keterangan
VIM	5,45 - 6,50	Dibatasi oleh batas atas VIM (maks. 5%)
VMA	4,50 - 6,50	Memenuhi syarat di seluruh rentang uji
VFB	5,30 - 6,50	Dibatasi oleh batas bawah VFB (min. 65%)
Stabilitas	5,50 - 6,50	Dibatasi oleh batas bawah stabilitas (min. 800 kg)
Flow	4,50 - 6,50	Memenuhi syarat di seluruh rentang uji
MQ	5,60 - 6,50	Dibatasi oleh batas bawah MQ (min. 250 kg/mm)

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 14 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berdasarkan titik potong kurva masing-masing parameter dengan batas spesifikasi, diperoleh zona tumpang tindih antara 5,60% hingga 6,50%. Nilai tengah rentang tersebut adalah 6,05%, sehingga KAO campuran AC-WC konvensional ditetapkan sebesar 6,05% sesuai (Spesifikasi Umum 2025 Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, 2025).

4.4 Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-WC Berbasis RAP 20%

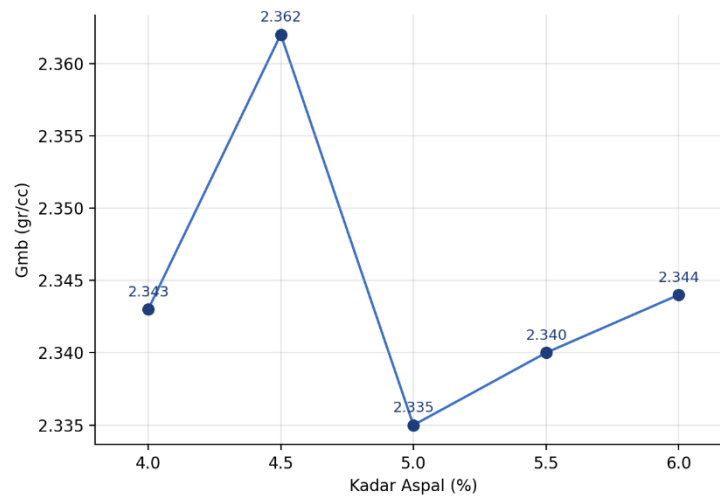
4.4.1 Berat Jenis (*Bulk*) Campuran AC-WC RAP 20%

Rasio antara berat kering spesimen dan volume totalnya (termasuk volume rongga udara internal), menjadi dasar perhitungan VIM dan VMA, sehingga validitas kedua parameter tersebut bergantung pada ketepatan nilai Gmb. Nilai rata-rata Gmb dan berat jenis maksimum teoretis (Gmm) pada setiap kadar aspal ditampilkan sebagai berikut.

Tabel 4. 34 Hasil Berat Jenis *Bulk* (Gmb) dan Berat Jenis Maksimum (Gmm)

Kadar Aspal (%)	Gmb (gr/cc)	Gmm (gr/cc)
4,0	2,343	2,509
4,5	2,362	2,491
5,0	2,335	2,473
5,5	2,340	2,455
6,0	2,344	2,438

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 15 Hubungan Kadar Aspal dengan Berat Jenis *Bulk* (Gmb) Campuran

Hasil pengujian menunjukkan nilai Gmb berkisar 2,343–2,344 g/cc, dengan perubahan yang tidak menunjukkan hubungan kuat terhadap peningkatan kadar aspal dengan penambahan aspal membantu pemadatan melalui pengisian rongga, tetapi berat jenis aspal yang lebih rendah dibanding agregat dapat menurunkan densitas pada kadar lebih tinggi. Nilai Gmm juga turun dari 2,509 g/cc (kadar 4,0%) menjadi 2,438 g/cc (kadar 6,0%). Sebagaimana dikemukakan oleh (N. Khan et al., 2023) kadar aspal turut menentukan nilai Gmb dan Gmm yang merupakan bagian dari sifat volumetrik suatu campuran. Karena spesifikasi tidak menetapkan batas langsung untuk Gmb dan Gmm, evaluasi dilakukan melalui parameter turunannya (VIM, VMA, VFB).

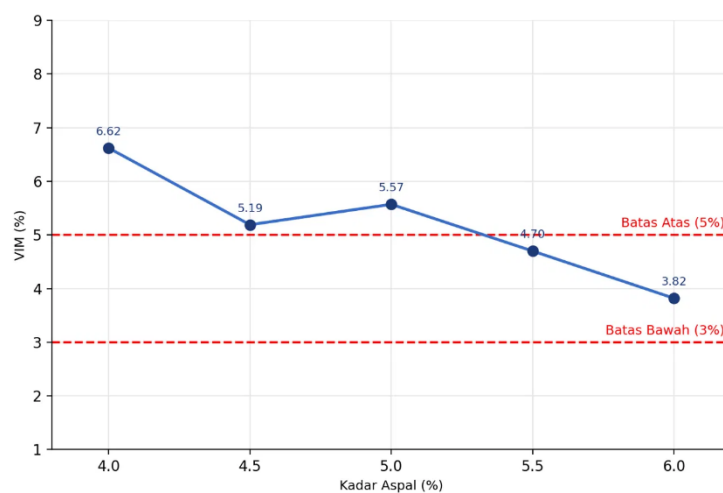
4.4.2 Rongga dalam Campuran / VIM AC-WC RAP 20%

Nilai VIM hasil pengujian Marshall pada berbagai variasi kadar aspal untuk campuran AC-WC dengan kandungan RAP sebesar 20% dituangkan pada Tabel 4.35 dan Gambar 4.16.

Tabel 4. 35 Hasil Pengujian VIM Campuran AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	VIM (%)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	6,62	3,0 - 5,0	Tidak Memenuhi
4,5	5,19	3,0 - 5,0	Tidak Memenuhi
5,0	5,57	3,0 - 5,0	Tidak Memenuhi
5,5	4,70	3,0 - 5,0	Memenuhi
6,0	3,82	3,0 - 5,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

**Gambar 4. 16** Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai VIM

Berdasarkan RAP 20%, nilai VIM menurun dari 6,62% (kadar 4,0%) menjadi 3,82% (kadar 6,0%) penurunan ini terjadi karena peningkatan aspal mengisi rongga udara. Kadar 4,0% dan 5,0% menghasilkan VIM di atas batas 3–5%, sementara 4,5% sedikit melampaui batas (5,19%), kadar 5,5% dan 6,0% sudah memenuhi persyaratan. Untuk VIM yang terlalu kecil hasilnya dapat meningkatkan risiko bleeding dan rutting. Menurut (Radziszewski et al., 2021) dalam jurnal *Open Engineering* juga menjelaskan bahwa rendahnya *air void* dapat meningkatkan kecenderungan deformasi permanen, meskipun pengaruh tersebut tetap bergantung pada jenis campuran dan kadar rongga yang tersedia.

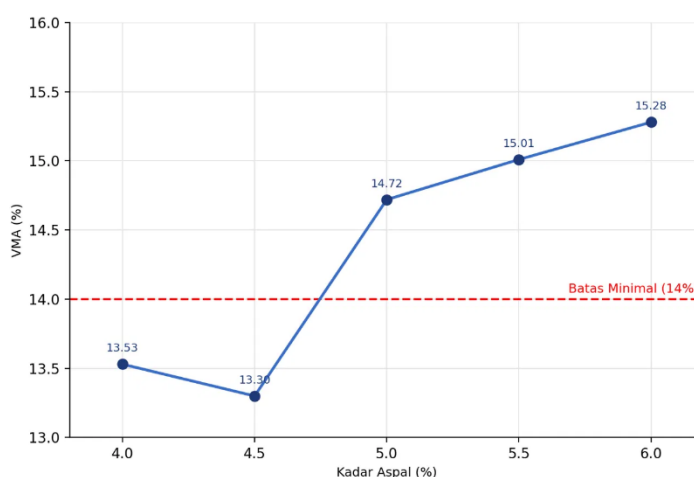
4.4.3 Rongga dalam Agregat Mineral / VMA AC-WC RAP 20%

Berdasarkan tabel 4.36 dan gambar 4.17, disajikan hasil pengujian *Void in Mineral Aggregate* (VMA) untuk campuran AC-WC dengan kandungan RAP sebesar 20%, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi kesesuaian parameter volumetrik campuran terhadap spesifikasi yang berlaku.

Tabel 4. 36 Hasil Pengujian VMA Campuran AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	VMA (%)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	13,53	Min. 14,0	Tidak Memenuhi
4,5	13,30	Min. 14,0	Tidak Memenuhi
5,0	14,72	Min. 14,0	Memenuhi
5,5	15,01	Min. 14,0	Memenuhi
6,0	15,28	Min. 14,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 17 Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai VMA

Dengan VMA campuran RAP 20% sempat turun menjadi 13,30% pada kadar aspal 4,5%, tetapi secara umum meningkat dari 13,53% pada 4,0% menjadi 15,28% pada 6,0%. Kadar 4,0% dan 4,5% belum memenuhi batas minimum 14%, sedangkan kadar 5,0–6,0% memenuhi persyaratan. (Cox et al., 2022) menjelaskan bahwa VMA dipengaruhi oleh *bulk specific gravity* agregat, gradasi, serta susunan antarbutir. VMA yang terlalu rendah dapat membatasi ruang untuk *binder* efektif,

sedangkan VMA terlalu tinggi dapat meningkatkan kebutuhan *binder* dan memengaruhi ketahanan terhadap deformasi.

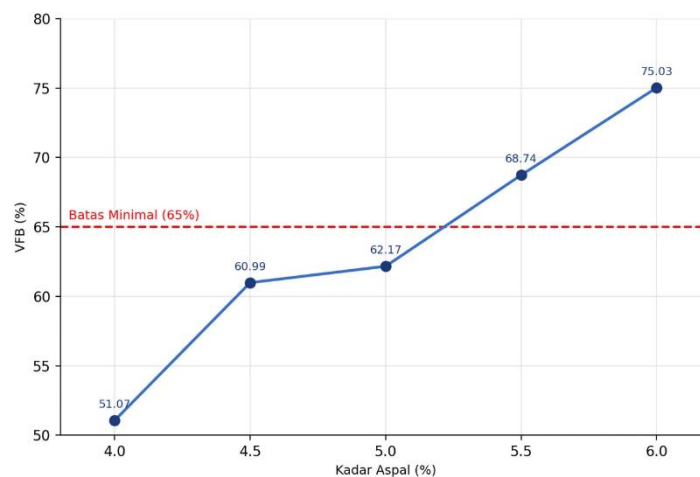
4.4.4 Rongga Terisi Aspal / VFB AC-WC RAP 20

Tabel 4.37 dan Gambar 4.18 menyajikan hasil pengujian nilai *Voids Filled with Bitumen* (VFB) untuk campuran AC-WC yang mengandung 20% RAP, beserta perbandingannya dengan kriteria spesifikasi

Tabel 4. 37 Hasil Pengujian VFB Campuran AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	VFB (%)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	51,07	Min. 65,0	Tidak Memenuhi
4,5	60,99	Min. 65,0	Tidak Memenuhi
5,0	62,17	Min. 65,0	Tidak Memenuhi
5,5	68,74	Min. 65,0	Memenuhi
6,0	75,03	Min. 65,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 18 Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai VFB

Dengan campuran pada variasi RAP 20%, VFB meningkat dari 51,07% (kadar 4,0%) menjadi 75,03% (kadar 6,0%). Kadar 4,0%, 4,5%, dan 5,0% belum memenuhi batas minimum 65%, sedangkan 5,5% dan 6,0% sudah memenuhi (masing-masing 68,74% dan 75,03%). VFB terlalu tinggi mengindikasikan campuran kaya aspal dengan risiko bleeding dan rutting, sementara VFB rendah menunjukkan rongga yang belum cukup terisi *binder*. (Ngii et al., 2022)

menyatakan bahwa peningkatan *binder* cenderung menaikkan VFB sekaligus menurunkan VIM dan VMA. Nilai VFB yang terlalu tinggi dapat menghasilkan campuran kaya bahan pengikat yang rentan terhadap *bleeding*, sedangkan nilai yang terlalu rendah mengindikasikan bahwa rongga tidak terisi cukup bahan pengikat.

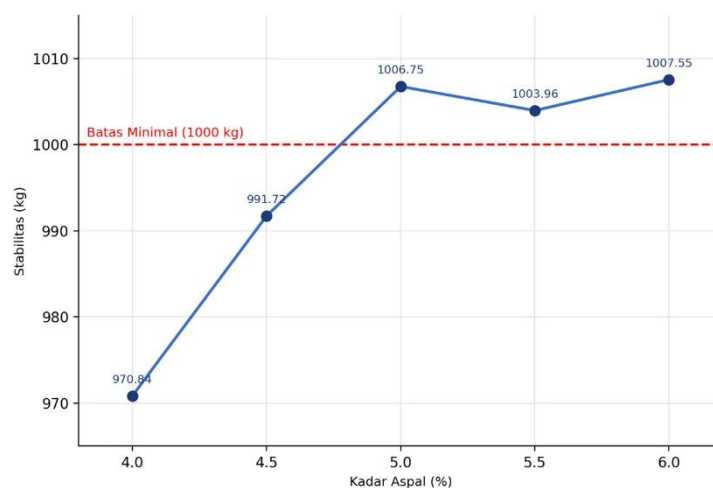
4.4.5 Stabilitas Marshall AC-WC RAP 20%

Berikut pengujian stabilitas campuran AC-WC pada kandungan RAP sebesar 20% ditampilkan pada Tabel 4.38 dan kemudian dibandingkan dengan persyaratan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Khusus Interim (SKh-1.6.27) Tahun 2019.

Tabel 4. 38 Pengujian Stabilitas Marshall Campuran AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	970,84	Min. 1000,0	Tidak Memenuhi
4,5	991,72	Min. 1000,0	Tidak Memenuhi
5,0	1006,75	Min. 1000,0	Memenuhi
5,5	1003,96	Min. 1000,0	Memenuhi
6,0	1007,55	Min. 1000,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 19 Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai Stabilitas Marshall

Nilai stabilitas pada campuran dengan kadar RAP 20% cenderung naik sejalan dengan bertambahnya kadar aspal, yakni dari 970,84 kg pada kadar 4,0% menjadi

1.007,55 kg pada kadar 6,0%, meskipun terdapat sedikit penurunan menjadi 1.003,96 kg pada kadar 5,5%. Secara teoritis, peningkatan tersebut terjadi karena aspal meningkatkan kohesi dan gesekan internal. Penurunan stabilitas yang biasanya muncul pada kadar aspal tinggi belum terlihat secara jelas hingga kadar 6,0%. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh *binder* RAP yang telah mengalami *aging* dan memiliki kekakuan lebih tinggi. Menurut (Ochoa-Ambriz et al., 2022) dalam jurnal *Applied Sciences* (MDPI), menunjukkan bahwa aged RAP *binder* memiliki sifat reologi yang lebih kaku dan dapat meningkatkan kekakuan campuran secara keseluruhan.

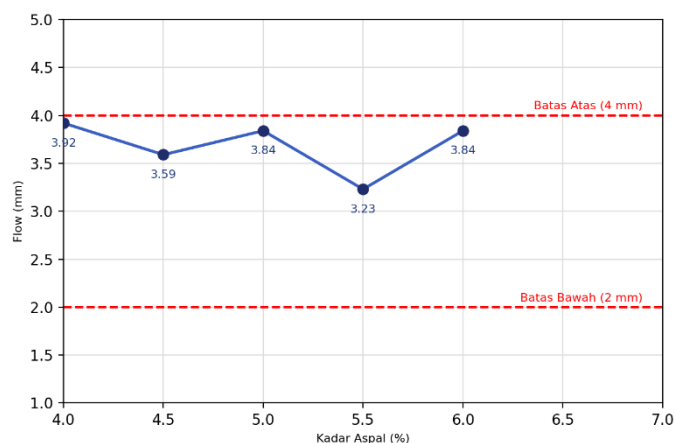
4.4.6 Kelelehan / *Flow* AC-WC RAP 20%

Nilai *flow* dari hasil pengujian campuran AC-WC berkadar RAP 20%, berikut perbandingannya terhadap persyaratan dalam spesifikasi yang berlaku, dapat dilihat pada Tabel 4.39.

Tabel 4. 39 Hasil Pengujian *Flow* Campuran AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	<i>Flow</i> (mm)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	3,92	2,0 - 4,0	Memenuhi
4,5	3,59	2,0 - 4,0	Memenuhi
5,0	3,84	2,0 - 4,0	Memenuhi
5,5	3,23	2,0 - 4,0	Memenuhi
6,0	3,84	2,0 - 4,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 20 Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai *Flow*

Berdasarkan Tabel 4.39 dan Gambar 4.20, Nilai *flow* pada campuran RAP 20% menunjukkan pola fluktuatif, yaitu 3,92 mm pada kadar 4,0%, turun menjadi 3,59 mm pada 4,5%, meningkat menjadi 3,84 mm pada 5,0%, turun menjadi 3,23 mm pada 5,5%, kemudian meningkat lagi menjadi 3,84 mm pada 6,0%. Nilai tertinggi pada kadar 4,0% berkaitan dengan distribusi *binder* yang belum merata antara aspal baru dan permukaan RAP. Pada kadar aspal 4,5%, interaksi antara *binder* baru dan RAP mulai berlangsung lebih baik sehingga menghasilkan campuran yang lebih homogen. Kondisi tersebut selanjutnya dievaluasi berdasarkan ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025 untuk *flow* AC-WC disyaratkan 2,0–4,0 mm. Seluruh variasi kadar aspal 4,0–6,0% masih berada dalam rentang tersebut.

Kadar aspal dan nilai *flow* pada campuran berbasis RAP tidak memperlihatkan hubungan yang bersifat linier, tetapi cenderung mengalami efek penyempitan pada kisaran kadar aspal tertentu, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan tajam pada kadar 5,5% (nilai *flow* terendah, yaitu 3,23 mm) dan peningkatan kembali pada kadar 5,0%. Fluktuasi tajam ini besar kemungkinan dipengaruhi oleh sifat *binder* RAP yang telah mengalami penuaan (*aging*), sehingga kekakuannya tidak sama akibat variasi tingkat oksidasi aspal lama pada tiap butiran RAP berbeda. Sehingga penambahan aspal menjadi tidak konsisten dari satu kadar aspal ke kadar aspal berikutnya, berbeda dengan campuran konvensional yang *bindernya* sama dan segar. Kenaikan *flow* pada kadar aspal 6,0% mengarah pada mekanisme kelebihan, di mana jumlah aspal total yang melapisi agregat sudah melebihi kebutuhan untuk mengisi rongga secara optimal, sehingga terbentuk lapisan aspal yang lebih tebal, menurunkan gesekan antar partikel, dan meningkatkan potensi deformasi plastis.

Penelitian (Mondal & R.N., 2022) seluruh nilai *flow* berada dalam rentang yang disyaratkan, dan karakteristik *flow* merupakan faktor krusial dalam menilai sifat mekanis campuran daur ulang. Nilai *flow* yang disyaratkan untuk *Asphalt Concrete-Wearing Course* AC-WC adalah 2,0–4,0 mm, sesuai dengan Bagian 6.3 dari Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Dengan demikian, seluruh kadar aspal yang diuji 4,0%–6,0% memenuhi persyaratan, karena nilai *flow* berada pada

rentang 3,23–3,92 mm, sehingga parameter *flow* tidak menjadi faktor pembatas dalam penentuan KAO.

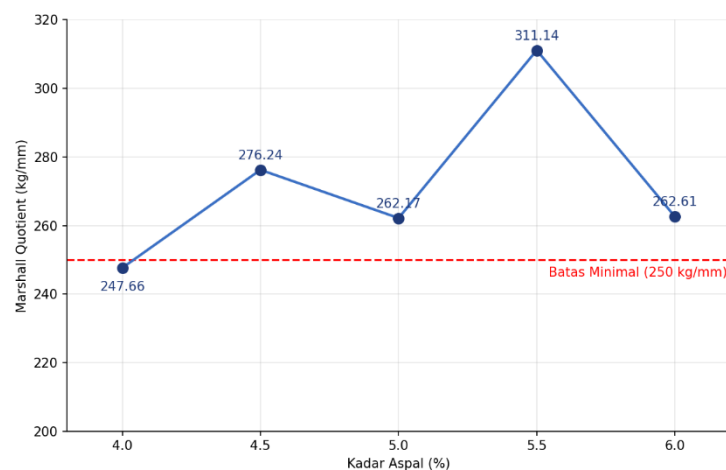
4.4.7 *Marshall Quotient* / MQ AC-WC RAP 20%

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) hasil pengujian Marshall pada setiap variasi kadar aspal dalam campuran AC-WC berkadar RAP 20% dapat dilihat pada Tabel 4.40 dan Gambar 4.21.

Tabel 4. 40 Hasil Perhitungan *Marshall Quotient* (MQ) AC-WC RAP 20%

Kadar Aspal (%)	MQ (kg/mm)	Spesifikasi	Keterangan
4,0	247,66	Min. 250,0	Tidak Memenuhi
4,5	276,24	Min. 250,0	Memenuhi
5,0	262,17	Min. 250,0	Memenuhi
5,5	311,14	Min. 250,0	Memenuhi
6,0	262,61	Min. 250,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 21 Hubungan Kadar Aspal dan Nilai *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ), yaitu perbandingan antara nilai stabilitas dengan *flow* (lelehan), merupakan ukuran kekakuan dan kemampuan campuran dalam menahan deformasi permanen. Nilai MQ campuran RAP 20% berkisar antara 247,66 hingga 311,14 kg/mm, dengan nilai tertinggi pada kadar 5,5%. Nilai tersebut merupakan hasil interaksi antara stabilitas dan *flow*. Menurut (A. Khan et al., 2023) mendefinisikan MQ sebagai rasio stabilitas terhadap *flow* dan menggunakannya

sebagai indikator ketahanan deformasi permanen. Dengan batas minimum 250 kg/mm, kadar 4,0% belum memenuhi, sedangkan kadar 4,5–6,0% telah memenuhi persyaratan.

4.4.8 Penentuan Nilai KAO Aspal RAP 20%

Kadar Aspal Optimum (KAO) beserta hasil pengujian Marshall untuk tiap variasi campuran AC-WC dengan RAP 20% dituangkan melalui Tabel 4.41, Tabel 4.42, dan Gambar 4.22.

Tabel 4. 41 Rekapitulasi Parameter Marshall Campuran AC-WC RAP 20%

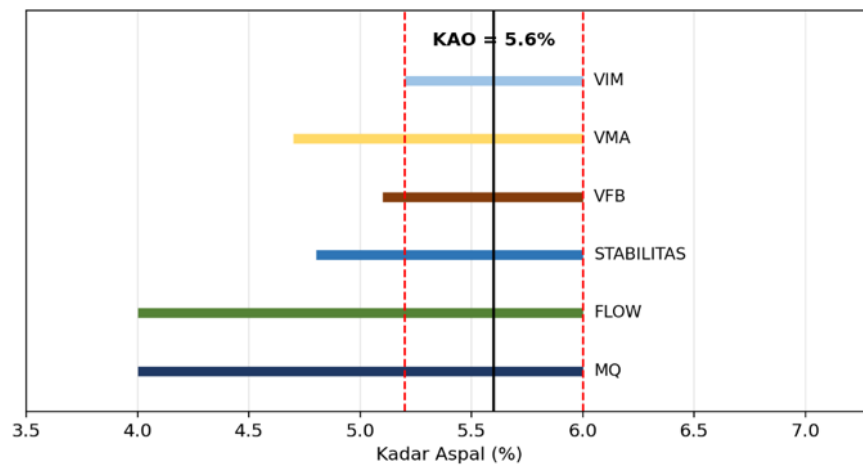
Kadar Aspal (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
4,0	6,62	13,53	51,07	970,84	3,92	247,66
4,5	5,19	13,30	60,99	991,72	3,59	276,24
5,0	5,57	14,72	62,17	1006,75	3,84	262,17
5,5	4,70	15,01	68,74	1003,96	3,23	311,14
6,0	3,82	15,28	75,03	1007,55	3,84	262,61
Spesifikasi	3,0 – 5,0	Min. 14,0	Min. 65,0	Min. 1000,0	2,0 – 4,0	Min. 250,0

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4. 42 Persyaratan dan Rentang Kadar Aspal yang Memenuhi

Parameter	Rentang Kadar Aspal Memenuhi (%)
VIM (%)	5,2 - 6,0
VMA (%)	4,7 - 6,0
VFB (%)	5,1 - 6,0
Stabilitas (kg)	4,8 - 6,0
Flow (mm)	4,0 - 6,0
MQ (kg/mm)	4,0 - 6,0

Sumber:Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 22 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Perpotongan kurva regresi masing-masing parameter Marshall dengan nilai ambang minimum atau maksimum sesuai spesifikasi dipakai sebagai dasar untuk menetapkan kisaran kadar aspal yang sesuai ketentuan. Berdasarkan hasil analisis, setiap parameter (VIM, VMA, VFB, stabilitas, *flow*, dan MQ) menghasilkan kisaran kadar aspal yang tidak seragam satu sama lain, dan setelah kisaran tersebut disandingkan untuk mendapatkan area yang saling tumpang tindih, diperoleh hasil bahwa campuran dengan kadar 20% RAP memenuhi keseluruhan parameter secara serentak pada rentang kadar aspal 5,2–6,0%. Menurut Qurratul (Ayun & Prastyanto, 2021) menjelaskan bahwa KAO dapat ditentukan lewat titik tengah dari kisaran kadar aspal yang sesuai dengan semua ketentuan spesifikasi.

4.5 Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-WC Berbasis RAP dengan *Rejuvenator* Komposit RHA-WEO

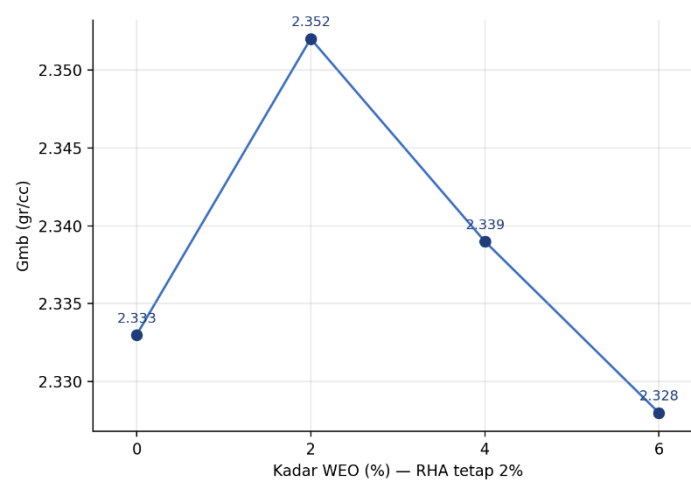
4.5.1 Berat Jenis (*Bulk*) Campuran AC-WC RAP+RHA-WEO

Pada variasi *rejuvenator* RHA-WEO, kadar aspal dan komposisi agregat dijaga tetap sebesar 5,6% sehingga perubahan berat jenis *bulk* merepresentasikan pengaruh *rejuvenator* terhadap densitas campuran. Tabel 4.43 dan Gambar 4.23 menyajikan pengujian berat jenis untuk setiap variasi kadar aspal pada kombinasi AC-WC, termasuk substitusi 20% RAP, RHA, dan WEO.

Tabel 4. 43 Pengujian Berat Jenis *Bulk* (Gmb) dan Berat Jenis Maksimum

Variasi Kadar	Gmb (gr/cc)	Gmm (gr/cc)
RHA 0% + WEO 0%	2,333	2,452
RHA 2% + WEO 2%	2,352	2,452
RHA 2% + WEO 4%	2,339	2,452
RHA 2% + WEO 6%	2,328	2,452

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

**Gambar 4. 23** Hubungan Kadar WEO dengan Berat Jenis *Bulk* (Gmb)

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Nilai Gmb tertinggi diperoleh pada RHA 2%+WEO 2% (2,352 gr/cc), sedangkan terendah pada RHA 2%+WEO 4% (2,328 gr/cc) lebih rendah dari kontrol tanpa *rejuvenator* (2,333 gr/cc). Kecenderungan ini konsisten dengan sifat WEO sebagai bahan pelunak. Pada dosis rendah (2%), WEO meningkatkan workabilitas campuran saat pemadatan sehingga agregat tersusun lebih rapat sedangkan pada dosis tinggi (6%), kelebihan oli membuat mastik aspal terlalu lunak/encer, menurunkan daya dukung antar-partikel saat pemadatan sehingga densitas akhir menurun (Dewi Sri Jayanti et al., 2025). Gmm tercatat konstan 2,452 gr/cc pada seluruh variasi karena kadar aspal total dan Gse dijaga tetap sama.

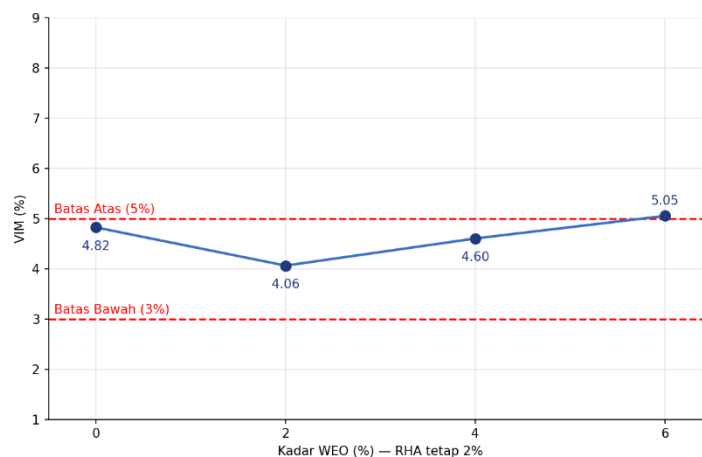
4.5.2 Rongga dalam Campuran / VIM AC-WC RAP+RHA-WEO

Nilai VIM pada masing-masing variasi kadar aspal dalam campuran AC-WC dengan RAP 20%, yang merupakan hasil pengujian Marshall, dituangkan pada Tabel 4.44 dan Gambar 4.24.

Tabel 4. 44 Pengujian VIM Campuran AC-WC RAP+RHA-WEO

Variasi Kadar	VIM (%)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	4,82	3,0 - 5,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	4,06	3,0 - 5,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	4,60	3,0 - 5,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	5,05	3,0 - 5,0	Tidak Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 24 Hubungan Kadar WEO dengan Nilai VIM

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Nilai VIM memperlihatkan pola yang berfluktuasi. Pada campuran kontrol, nilai VIM sebesar 4,82% mengalami penurunan menjadi 4,06% setelah penambahan WEO 2%. Selanjutnya, nilai tersebut meningkat hingga mencapai 5,05% pada campuran dengan RHA 2% dan WEO 6%. Penurunan VIM pada dosis WEO rendah menunjukkan bahwa penambahan *rejuvenator* dapat memperbaiki kondisi *binder* RAP sehingga pemadatan menjadi lebih efektif, sedangkan peningkatan VIM pada dosis WEO yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa

penambahan *rejuvenator* secara berlebihan dapat menurunkan tingkat kepadatan campuran, sehingga *interlocking* antaragregat menjadi kurang optimal dan rongga udara kembali meningkat. Kecenderungan ini konsisten dengan mekanisme kerja *compound rejuvenator* yang diteliti oleh. (Eltwati et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan WEO sebagai bagian dari *compound rejuvenator* mampu memulihkan karakteristik *binder* RAP dan meningkatkan sifat mekanik campuran. Berdasarkan persyaratan campuran beraspal dengan RAP yang digunakan dalam penelitian, VIM disyaratkan 3,0–5,0%. Dengan demikian, kontrol (4,82%), RHA 2% + WEO 2% (4,06%), dan RHA 2% + WEO 4% memenuhi persyaratan, sedangkan RHA 2% + WEO 6% (5,05%) tidak memenuhi karena sedikit melebihi batas atas.

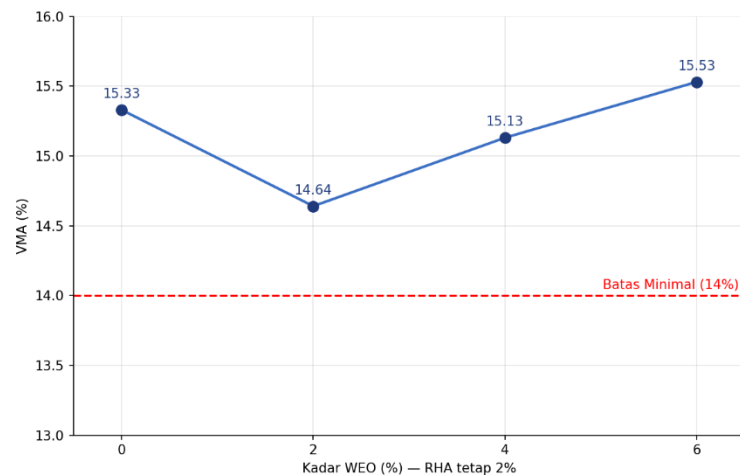
4.5.3 Rongga dalam Agregat Mineral / VMA AC-WC RAP+WEO

Nilai VMA dari hasil pengujian Marshall pada campuran AC-WC RAP+RHA-WEO dengan kandungan RAP sebesar 20%, beserta perubahannya pada setiap kadar aspal yang digunakan, dituangkan pada Tabel 4.45 dan Gambar 4.25.

Tabel 4. 45 Hasil Pengujian VMA Campuran AC-WC RAP+WEO-RHA

Variasi Kadar	VMA (%)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	15,33	Min. 14,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	14,64	Min. 14,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	15,13	Min. 14,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	15,53	Min. 14,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 25 Hubungan Kadar WEO dengan Nilai VMA

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Nilai VMA menurun dari 15,33% pada kontrol menjadi 14,64% pada WEO 2%, kemudian meningkat hingga 15,53% pada RHA 2% + WEO 6%. Pola ini menunjukkan bahwa pada dosis WEO rendah, pelunakan *binder* membantu proses pemadatan, sedangkan pada dosis lebih tinggi efek pelunakan menjadi lebih dominan sehingga susunan agregat cenderung kurang rapat dan VMA kembali meningkat. Menurut (Al-Saffar et al., 2021) menjelaskan bahwa WEO dapat melunakkan *binder* RAP yang telah mengalami penuaan, tetapi penggunaannya juga dapat memberikan pengaruh negatif terhadap karakteristik aspal apabila dosisnya tidak dikendalikan maka penggunaan WEO bersama material lain dapat membantu memperoleh kinerja yang lebih seimbang. Berdasarkan Spesifikasi Khusus Interim (SKh-1.6.27) Tahun 2019, nilai VMA minimum yang digunakan adalah 14%. Dengan demikian, seluruh variasi *rejuvenator* dengan nilai VMA 14,64–15,53% memenuhi persyaratan, sehingga VMA tidak menjadi parameter pembatas dalam penelitian ini.

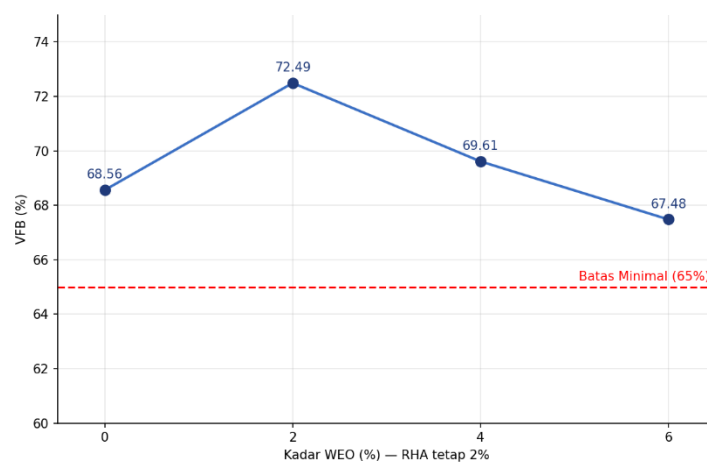
4.5.4 Rongga Terisi Aspal / VFB AC-WC RAP+WEO-RHA

Karakteristik masing-masing variasi kadar aspal pada campuran AC-WC dengan RAP 20% tercermin dari nilai VFB hasil pengujian Marshall, sebagaimana dituangkan pada Tabel 4.46 dan Gambar 4.26.

Tabel 4. 46 Hasil Pengujian VFB Campuran AC-WC RAP+RHA-WEO

Variasi Kadar	VFB (%)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	68,56	Min. 65,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	72,49	Min. 65,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	69,61	Min. 65,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	67,48	Min. 65,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

**Gambar 4. 26** Hubungan Kadar WEO dengan Nilai VFB

Nilai VFB meningkat dari 68,56% pada kontrol menjadi 72,49% pada WEO 2%, kemudian menurun hingga 67,48% pada WEO 6%. Nilai tertinggi pada WEO 2% menunjukkan bahwa pada dosis tersebut proporsi rongga agregat yang terisi aspal efektif paling besar. Pola ini berkaitan dengan perubahan VIM dan VMA, karena VFB merupakan parameter yang menggambarkan proporsi VMA yang terisi aspal. Penelitian tahun 2023 yaitu (Ogada et al., 2023) mengenai penggunaan WEO pada campuran aspal menunjukkan bahwa penambahan WEO memengaruhi parameter volumetrik campuran, termasuk VMA dan VFB, sehingga kadar WEO perlu dikendalikan untuk memperoleh karakteristik campuran yang sesuai. Berdasarkan Spesifikasi Khusus Interim (SKh-1.6.27) Tahun 2019, VFB disyaratkan minimum 65% pada acuan penelitian ini. Dengan demikian, seluruh variasi *rejuvenator* dengan VFB 67,48–72,49% memenuhi persyaratan.

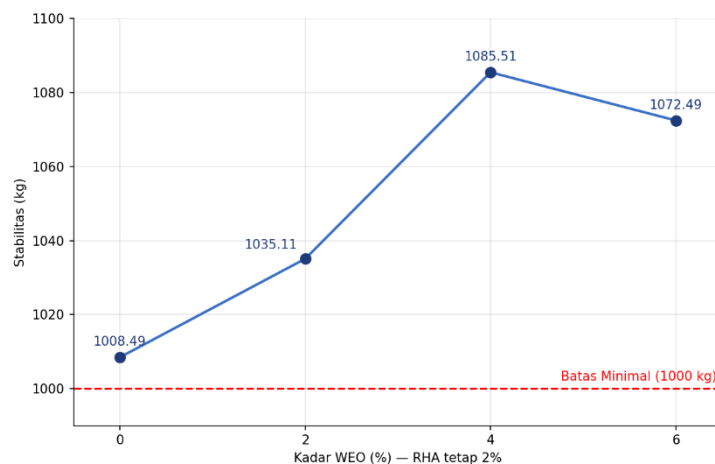
4.5.5 Stabilitas Marshall AC-WC RAP+RHA-WEO

Nilai stabilitas pada beberapa variasi kadar aspal dalam campuran AC-WC dengan RAP 20%, yang merupakan hasil pengujian Marshall, dituangkan melalui Tabel 4.47 dan Gambar 4.2.

Tabel 4. 47 Hasil Pengujian Stabilitas Marshall AC-WC RAP+WEO-RHA

Variasi Kadar	Stabilitas (kg)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	1008,49	Min. 1000,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	1035,11	Min. 1000,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	1085,51	Min. 1000,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	1072,49	Min. 1000,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 27 Hubungan Kadar WEO dengan Nilai Stabilitas Marshall

Nilai stabilitas Marshall meningkat dari 1008,49 kg pada kontrol hingga mencapai 1085,51 kg pada RHA 2% + WEO 4%, kemudian sedikit menurun menjadi 1072,49 kg pada RHA 2% + WEO 6%. Peningkatan hingga WEO 4% menunjukkan bahwa penambahan *rejuvenator* membantu memulihkan karakteristik *binder* RAP, sedangkan penurunan pada WEO 6% mengindikasikan bahwa efek pelunakan WEO mulai lebih dominan sehingga stabilitas sedikit

berkurang. El-labbad et al. (2022) dalam penelitiannya mengenai pemanfaatan *Waste Engine Oil* (WEO) sebagai bahan peremaja pada campuran yang mengandung RAP melaporkan bahwa penggunaan WEO memberikan peningkatan terhadap nilai stabilitas dan *flow* Marshall apabila dibandingkan dengan campuran kontrol. Berdasarkan Spesifikasi Khusus Interim (SKh-1.6.27) Tahun 2019, AC-WC harus memiliki stabilitas Marshall minimum sebesar 1.000 kg. Dengan demikian, seluruh variasi *rejuvenator* dengan stabilitas 1008,49–1085,51 kg telah memenuhi persyaratan.

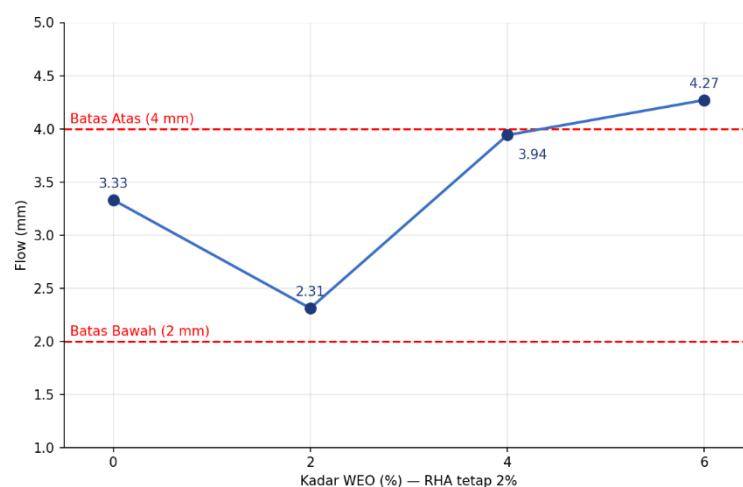
4.5.6 Kelelehan / *Flow* AC-WC RAP+RHA-WEO

Nilai *flow* hasil pengujian Marshall untuk setiap variasi kadar aspal pada campuran AC-WC berkadar RAP 20% dituangkan pada Tabel 4.48 dan Gambar 4.28.

Tabel 4. 48 Hasil Pengujian *Flow* Campuran AC-WC RAP+RHA-WEO

Variasi Kadar	<i>Flow</i> (mm)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	3,33	2,0 - 4,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	2,31	2,0 - 4,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	3,94	2,0 - 4,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	4,27	2,0 - 4,0	Tidak Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 28 Hubungan Kadar WEO dengan Nilai *Flow*

Berdasarkan Tabel 4.48 dan Gambar 4.28, nilai *flow* cenderung mengalami perubahan yang fluktuatif, tetapi tetap menunjukkan pola yang relatif konsisten seiring dengan peningkatan kadar WEO, yaitu dari 3,33 mm (Kontrol RHA 0%+WEO 0%) turun menjadi 2,31 mm (RHA 2%+WEO 2%), kemudian meningkat tajam menjadi 3,94 mm (RHA 2%+WEO 4%) dan 4,27 mm (RHA 2%+WEO 6%). Pola ini dapat dijelaskan melalui mekanisme kerja WEO sebagai bahan peremaja (*rejuvenator*) yang berinteraksi dengan RHA dalam campuran RAP.

Penurunan nilai *flow* pada penambahan RHA 2%+WEO 2% dibandingkan kontrol menunjukkan bahwa pada dosis rendah, WEO berperan efektif meremajakan *binder* RAP yang telah mengalami penuaan tanpa menimbulkan efek pelunakan berlebih. Pada kondisi ini, WEO menembus dan melunakkan kembali *binder* lama pada permukaan RAP secara terbatas, sementara RHA yang bersifat sebagai *filler* aktif membantu mengisi rongga dan meningkatkan kekakuan campuran, sehingga *interlocking* antar agregat justru menguat dan campuran mampu menahan deformasi dengan lebih baik sebelum mencapai keruntuhan.

Pada kadar WEO 4% dan 6% (dengan kadar RHA tetap sebesar 2%), terjadi peningkatan nilai *flow* yang nyata maka hal ini mengindikasikan bahwa pada dosis yang lebih tinggi tersebut, WEO mulai mendominasi karakteristik campuran dengan berperan sebagai bahan pelunak (*softening agent*). Pelunakan pada lapisan aspal yang mengikat agregat dapat meningkatkan kecenderungan campuran terhadap terjadinya deformasi plastis akibat pembebanan, karena kelebihan WEO menurunkan viskositas total bahan pengikat (*binder*). Campuran menjadi lebih plastis dan nilai *flow* melampaui rentang yang ditetapkan pada dosis tersebut, karena kemampuan RHA sebagai *filler* penguat tidak lagi memadai untuk mengimbangi efek pelunakan dari WEO.

Menurut (Madhu et al., 2025) WEO efektif digunakan sebagai bahan peremaja (*rejuvenator*) dalam campuran RAP, dan variasi jenis serta dosis *rejuvenator* memengaruhi karakteristik mekanis, termasuk nilai *flow* Marshall. Mengacu pada Spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga Tahun 2025, ketentuan nilai *flow* untuk

campuran AC-WC berkisar antara 2–4 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sampel kontrol dengan nilai *flow* sebesar 3,33 mm, serta campuran dengan penambahan WEO 2% sebesar 2,31 mm dan WEO 4%, masih berada dalam batas yang ditetapkan, sedangkan sampel RHA 2% + WEO 6% (4,27 mm) tidak memenuhi karena nilainya melampaui batas maksimum 4 mm, mengindikasikan bahwa campuran cenderung bersifat lebih plastis.

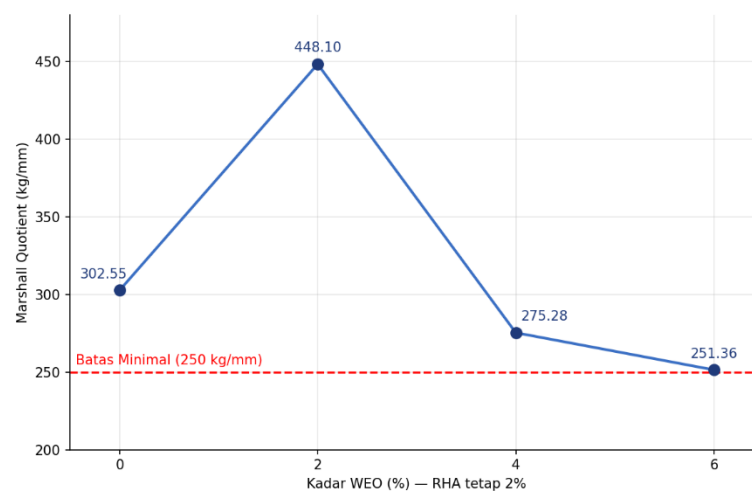
4.5.7 *Marshall Quotient* / MQ AC-WC RAP+RHA-WEO

Marshall Quotient (MQ) yang didapat dari pengujian *Marshall* terhadap campuran AC-WC berkadar RAP 20% pada tiap-tiap variasi campuran, dituangkan pada Tabel 4.49 dan Gambar 4.29.

Tabel 4. 49 Hasil *Marshall Quotient* (MQ) AC-WC RAP + RHA-WEO

Variasi Kadar	MQ (kg/mm)	Spesifikasi	Keterangan
RHA 0% + WEO 0%	302,55	Min. 250,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 2%	448,10	Min. 250,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 4%	275,28	Min. 250,0	Memenuhi
RHA 2% + WEO 6%	251,36	Min. 250,0	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 29 Hubungan Kadar WEO dengan Nilai *Marshall Quotient* (MQ)

Pada parameter *Marshall Quotient* (MQ), campuran kontrol menghasilkan nilai sebesar 302,55 kg/mm. Penambahan RHA 2% dan WEO 2% meningkatkan nilai MQ hingga mencapai 448,10 kg/mm. Sebaliknya, penggunaan WEO 6% dengan RHA 2% menghasilkan penurunan MQ menjadi 251,36 kg/mm. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kadar WEO cenderung memperkuat pengaruh pelunakan pada campuran, sehingga kekakuan campuran mengalami penurunan. (M. Z. H. Khan et al., 2024) menunjukkan bahwa perubahan kadar RAP maupun konsentrasi *binder* dapat memengaruhi karakteristik *Marshall*, termasuk MQ. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh variasi masih memenuhi batas minimum 250 kg/mm, tetapi nilai 251,36 kg/mm pada WEO 6% sudah sangat dekat dengan batas minimum. Oleh karena itu, peningkatan lebih lanjut pada kadar WEO dapat menyebabkan campuran tersebut tidak lagi memenuhi persyaratan.

4.5.8 Rekapitulasi Hasil Uji Marshall AC-WC RAP+RHA-WEO

Tabel 4.50 merangkum parameter Marshall untuk kombinasi AC-WC RAP+RHA-WEO pada berbagai tingkat kadar aspal, dengan menggunakan 20% RAP dan peremaja komposit RHA-WEO.

Tabel 4. 50 Rekapitulasi Parameter Marshall Campuran AC-WC RAP+RHA-WEO

Variasi Kadar	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
RHA 0% + WEO 0%	4,82	15,33	68,56	1008,49	3,33	302,55
RHA 2% + WEO 2%	4,06	14,64	72,49	1035,11	2,31	448,10
RHA 2% + WEO 4%	4,60	15,13	69,61	1085,51	3,94	275,28
RHA 2% + WEO 6%	5,05	15,53	67,48	1072,49	4,27	251,36
Spesifikasi	3,0 – 5,0	Min. 14,0	Min. 65,0	Min. 1000,0	2,0 – 4,0	Min. 250,0

Sumber: Hasil Analisis Pengujian 2026

Merujuk ringkasan data, campuran AC-WC RAP yang dimodifikasi menggunakan kombinasi *Rice Husk Ash* (RHA) dan *Waste Engine Oil* (WEO) secara umum memenuhi hampir semua parameter spesifikasi Marshall pada berbagai variasi kadar yang diuji. Nilai VIM berkisar antara 4,06% hingga 5,05%, yang semuanya berada dalam rentang ketentuan 3,0–5,0%, namun variasi 2% RHA + 6% WEO melebihi batas atas (5,05%), yang mengindikasikan penurunan kepadatan campuran akibat efek pelunakan berlebih dari WEO pada dosis tinggi. Nilai VFB maksimum diperoleh pada variasi 2% RHA + 2% WEO (72,49%), yang menunjukkan kondisi ideal rongga terisi aspal pada tingkat kadar tersebut. Parameter VMA dan VFB memenuhi persyaratan minimum.

Stabilitas tertinggi diperoleh pada campuran 2% RHA + 4% WEO, yaitu 1.085,51 kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa RHA dapat membantu mengimbangi efek pelunakan WEO sehingga kekakuan campuran tetap terjaga. Namun, campuran 2% RHA + 6% WEO menghasilkan *flow* sebesar 4,27 mm, yang melebihi batas maksimum 4,0 mm. Pada kondisi yang sama, MQ turun dari 448,10 kg/mm pada 2% WEO menjadi 251,36 kg/mm pada 6% WEO. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar WEO secara bertahap menurunkan kekakuan campuran. Berdasarkan keseluruhan parameter Marshall tersebut, campuran 2% RHA + 2% WEO dapat dipandang sebagai variasi yang paling optimal dibandingkan dengan variasi lainnya. Campuran ini mampu memenuhi seluruh persyaratan yang ditetapkan sekaligus menghasilkan keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas, yang tercermin dari nilai *flow* yang relatif rendah dan MQ yang paling tinggi.

Secara umum, hasil pengujian memperlihatkan adanya pengaruh peningkatan kadar WEO terhadap keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas campuran. Penggunaan WEO dalam kadar yang lebih tinggi cenderung memperbesar efek pelunakan pada *binder* yang terdapat dalam RAP, sementara penambahan RHA berperan dalam mempertahankan kestabilan campuran. Hal ini sejalan dengan temuan (Abdelrahman et al., 2024) menyatakan WEO efektif digunakan sebagai *rejuvenator* untuk memulihkan karakteristik fisik *binder* RAP, tetapi dosisnya perlu

dikendalikan agar campuran tidak menjadi terlalu lunak dan rentan terhadap deformasi. Oleh karena itu, pembuatan aspal berkelanjutan dengan tingkat kekakuan ideal yang memenuhi persyaratan teknis menuntut keseimbangan yang tepat antara WEO dan (RHA).

4.6 Hasil Pengujian Indeks Kekuatan Sisa (IKS)

4.6.1 Stabilitas Marshall Kondisi Rendaman Standar (S1)

Kondisi rendaman standar (S1) pada uji Stabilitas Marshall menghasilkan nilai stabilitas benda uji yang direndam pada suhu 60°C selama 30 menit dalam *Waterbath*. Prosedur ini merupakan standar yang dipakai untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), dengan hasil pengujian tiap variasi kadar WEO dituangkan pada Tabel 4.50 dan Gambar 4.30.

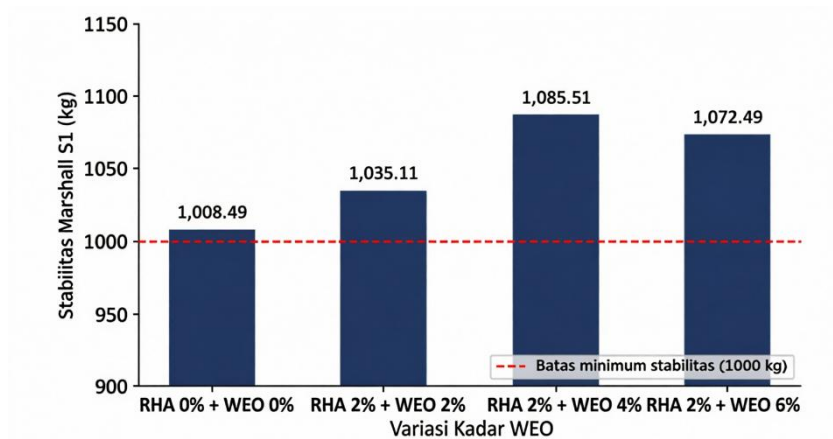
Tabel 4. 51 Hasil Pengujian Marshall Kondisi Rendaman Standar (S1)

Variasi	Benda Uji	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
RHA 0% + WEO 0%	A	5.31	15.75	66.33	1024.98	2.25	455.54
	B	4.54	15.07	69.89	1001.51	3.99	251.01
	C	4.63	15.15	69.46	998.97	3.76	265.68
	Rata-rata	4.82	15.33	68.56	1008.49	3.33	302.55
RHA 2% + WEO 2%	A	5.10	15.57	67.25	1014.34	2.03	499.67
	B	3.81	14.43	73.57	1044.70	2.01	519.75
	C	3.25	13.93	76.65	1046.30	2.89	362.04
	Rata-rata	4.06	14.64	72.49	1035.11	2.31	448.10
	A	4.66	15.18	69.32	1082.85	3.94	274.83

Variasi	Benda Uji	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
RHA 2% + WEO 4%	B	4.98	15.47	67.80	1070.52	3.91	273.79
	C	4.17	14.75	71.71	1103.15	3.98	277.17
	Rata-rata	4.60	15.13	69.61	1085.51	3.94	275.28
RHA 2% + WEO 6%	A	5.21	15.67	66.76	1083.13	4.60	235.46
	B	5.26	15.72	66.51	1103.23	4.10	269.08
	C	4.69	15.21	69.17	1031.10	4.27	251.49
	Rata-rata	5.05	15.53	67.48	1072.49	4.27	251.36

Tabel 4. 52 Hasil Pengujian Marshall Kondisi Rendaman Standar (S1)

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 30 Hubungan Kadar WEO Stabilitas Marshall Rendaman (S1)

Diolah dari data hasil tabel 4,51 diatas, nilai stabilitas (S1) meningkat dari 1.008,49 kg pada campuran tanpa WEO menjadi 1.085,51 kg pada kadar WEO 4%. Namun, nilai tersebut kemudian turun menjadi 1.072,49 kg pada kadar WEO 6%. Kenaikan nilai stabilitas sampai penambahan WEO sebesar 4% mengindikasikan

bahwa WEO berperan dalam mengembalikan sifat-sifat *binder* RAP yang sudah menua, sehingga ikatan antara *binder* dan agregat menjadi lebih optimal. Sebaliknya, penurunan pada kadar WEO 6% mengindikasikan bahwa efek pelunakan mulai lebih dominan. Hal tersebut sesuai dengan temuan (Prasad et al., 2026) yang mengungkapkan bahwa efektivitas WEO sebagai bahan peremaja dipengaruhi oleh dosis yang digunakan.

Peningkatan stabilitas dari WEO 2% hingga 4% berkaitan dengan kemampuan WEO mengembalikan sebagian fraksi ringan *binder* RAP yang hilang akibat oksidasi. Penurunan viskositas *binder* yang semula terlalu kaku kemudian meningkatkan adhesi dengan agregat. Hal ini didukung oleh temuan (Eltwati et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan *rejuvenator* WEO pada dosis yang tepat dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia *binder* RAP serta meningkatkan performa mekanis campuran. Sebaliknya, penambahan WEO sebesar 6% menunjukkan gejala *over-softening*. Hal ini sejalan dengan (Men et al., 2026) menjelaskan bahwa WEO berlebih dapat meningkatkan akumulasi komponen ringan dalam sistem aspal sehingga keseimbangan komposisi *binder* terganggu dan stabilitas campuran menurun.

Pada penelitian ini, seluruh nilai stabilitas S1 sebesar 1.008,49–1.085,51 kg telah memenuhi SKh-1.6.27 Bina Marga, yaitu minimum 1.000 kg. Di sisi lain, peningkatan kadar WEO menyebabkan nilai *flow* mengalami kenaikan, dari 3,33 mm pada kadar WEO 0% menjadi 4,27 mm pada kadar WEO 6%. Nilai tersebut telah melampaui batas maksimum yang dipersyaratkan, yaitu 4,0 mm, sehingga campuran dengan WEO 6% dinyatakan tidak memenuhi kriteria. Kondisi ini mengindikasikan meningkatnya sifat plastis campuran akibat penambahan WEO dalam kadar yang relatif tinggi. Nilai MQ juga menurun dari 302,55 kg/mm menjadi 251,36 kg/mm, tetapi masih memenuhi batas minimum 250 kg/mm. Naiknya nilai *flow* dan menurunnya nilai MQ pada WEO 6% juga merupakan akibat langsung dari efek pelunakan tersebut. *Binder* yang terlalu lunak membuat campuran lebih mudah bergeser dan berubah bentuk saat menerima beban, sehingga nilai *flow* meningkat. Di sisi lain, karena *binder* kehilangan kekakuannya, campuran juga menjadi kurang padat dibandingkan dengan tingkat deformasinya,

sehingga nilai MQ menurun. Hal ini menunjukkan bahwa dosis *rejuvenator* perlu diatur secara tepat untuk melunakkan *binder* yang telah menua, tetapi tidak berlebihan hingga membuat campuran terlalu lunak dan berisiko mengalami deformasi permanen (rutting) saat digunakan di lapangan.

4.6.1 Stabilitas Marshall Kondisi Rendaman 24 Jam (S2)

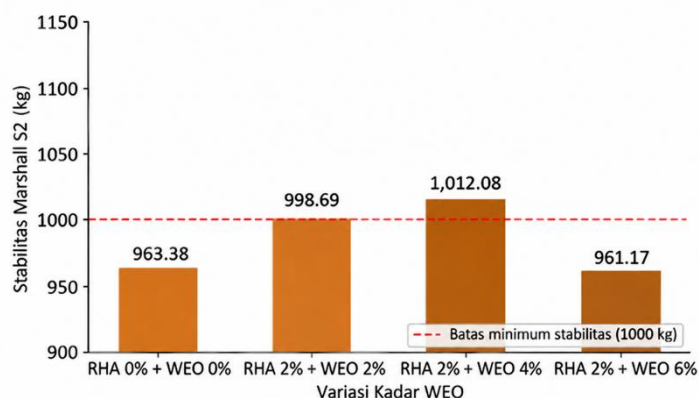
Pengujian stabilitas Marshall pada kondisi rendaman 24 jam (S2) dilakukan dengan merendam benda uji dalam *Waterbath* bersuhu 60°C selama 24 jam. Perlakuan ini bertujuan mengevaluasi respons campuran beraspal terhadap paparan air dan kondisi pembebanan dalam durasi yang lebih panjang. Hasil pengujian S2 disajikan pada Tabel 4.51 dan Gambar 4.31.

Tabel 4. 53 Hasil Pengujian Marshall Kondisi Rendaman 24 Jam (S2)

Variasi	Benda Uji	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
RHA 0% + WEO 0%	A	5.18	15.64	66.88	954.31	3.31	288.31
	B	4.06	14.64	72.30	958.09	3.36	285.14
	C	5.61	16.03	64.99	977.75	3.33	293.62
	Rata-rata	4.95	15.44	68.06	963.38	3.33	289.02
RHA 2% + WEO 2%	A	3.87	14.48	73.27	1021.08	2.72	375.40
	B	3.42	14.08	75.70	1017.40	3.98	255.63
	C	1.67	12.52	86.65	957.59	4.20	228.00
	Rata-rata	2.99	13.69	78.54	998.69	3.63	274.87
RHA 2% +	A	3.64	14.28	74.48	1005.92	3.68	273.35
	B	5.33	15.77	66.23	1013.36	2.90	349.43

WEO 4%	C	4.14	14.72	71.85	1016.96	4.29	237.05
	Rata-rata	4.37	14.92	70.85	1012.08	3.62	279.32
RHA 2% + WEO 6%	A	5.43	15.86	65.79	961.74	4.81	199.95
	B	5.77	16.17	64.30	967.46	5.62	172.15
	C	4.44	14.99	70.35	954.31	5.00	190.86
	Rata-rata	5.21	15.67	66.82	961.17	5.14	186.88

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 31 Hubungan WEO dengan Stabilitas Marshal Rendaman 24 Jam (S2)

Mengacu pada Tabel 4.51 dan Gambar 4.31, pada perlakuan perendaman selama 24 jam dengan suhu 60°C, nilai stabilitas S2 memperlihatkan kecenderungan yang sama. Merujuk pada Tabel 4.51 dan Gambar 4.31, nilai S2 mengalami kenaikan dari 963,38 kg (tanpa WEO) menjadi 1.012,08 kg pada penambahan WEO 4%, lalu mengalami penurunan menjadi 961,17 kg pada kadar WEO 6%. Nilai S2 pada seluruh variasi lebih rendah dibandingkan S1. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perendaman yang lebih lama mengakibatkan berkurangnya kekuatan campuran, yang diduga terkait dengan dampak air pada ikatan antara aspal dan agregat, termasuk peluang munculnya *stripping* serta melemahnya kohesi pada *binder*. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian (Liao

et al., 2023) yang mengemukakan bahwa penggunaan bahan peremaja dapat memengaruhi kerentanan campuran RAP terhadap kelembapan sehingga kadar penggunaannya perlu dikendalikan.

Secara pola naik turun pada stabilitas S2 sejalan dengan kondisi S1, yaitu didorong oleh mekanisme rejuvenasi *binder* RAP pada WEO hingga 4% yang kemudian berbalik menjadi *overdosis rejuvenator (over-softening)* pada WEO 6%. Namun, pada kondisi S2, Perendaman campuran selama 24 jam pada temperatur 60°C turut berpengaruh terhadap respons campuran ketika berinteraksi dengan air, sehingga variasi kadar WEO berkontribusi terhadap terbentuknya kecenderungan tersebut. Pada dosis rendah hingga optimum, WEO memulihkan sifat adhesif *binder* RAP yang telah menua sehingga ikatan *binder* dengan agregat lebih tahan terhadap infiltrasi air selama perendaman, sehingga stabilitas meningkat. Sebaliknya, pada dosis 6%, kelebihan WEO yang tidak sepenuhnya berdifusi ke dalam *binder* selama waktu pencampuran cenderung tertinggal sebagai lapisan pelumas pada antarmuka *binder* dengan agregat sehingga kondisi ini tidak hanya melunakkan *binder (over-softening)* tetapi juga melemahkan ikatan adhesifnya, sehingga air lebih mudah menembus dan merusak ikatan tersebut selama perendaman 24 jam.

Merujuk pada persyaratan dalam Spesifikasi Khusus Interim (SKh-1.6.27) Tahun 2019, stabilitas *Marshall* minimum campuran Laston-RAP adalah 1.000 kg; jika digunakan sebagai pembanding indikatif, hanya WEO 4% yang mencapai nilai tersebut pada kondisi S2, sedangkan WEO 0%, 2%, dan 6% masih di bawahnya. Namun, batas 1.000 kg tersebut merupakan persyaratan stabilitas *Marshall* standar dan bukan kriteria khusus stabilitas setelah perendaman 24 jam. Oleh karena itu, ketahanan terhadap pengaruh air lebih tepat dinilai menggunakan Indeks Kekuatan Sisa (IKS), yaitu perbandingan nilai stabilitas campuran setelah proses perendaman dengan stabilitas pada kondisi pengujian standar.

4.6.2 Nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS)

Indeks Kekuatan Sisa (IKS) merupakan besaran yang menggambarkan rasio antara nilai stabilitas *Marshall* dari sampel yang mengalami perendaman selama 24 jam

(S2) terhadap nilai stabilitas *Marshall* pada sampel dengan perendaman standar (S1). Parameter ini berfungsi untuk mengetahui sejauh mana suatu campuran mampu mempertahankan kekuatannya ketika terpapar air dalam waktu perendaman yang lebih lama. Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung nilai IKS adalah sebagai berikut.

$$IKS = \frac{S2}{S1} \times 100\% \quad (4.13)$$

Keterangan

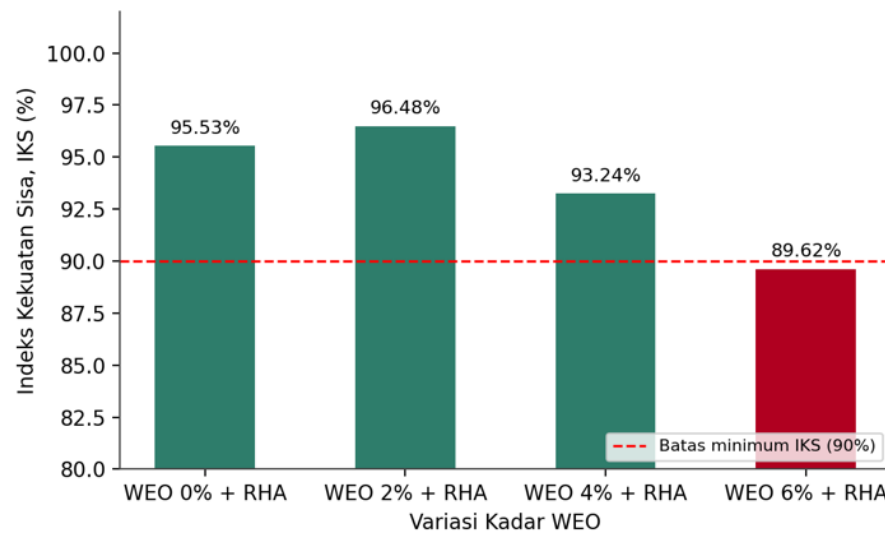
S1= besarnya stabilitas *Marshall* pada benda uji yang direndam pada kondisi baku, yakni pada suhu 60°C dengan durasi 30 menit (satuan kg).

S2= besarnya stabilitas *Marshall* pada benda uji yang direndam pada suhu 60°C dengan durasi lebih panjang, yakni selama 24 jam (satuan kg).

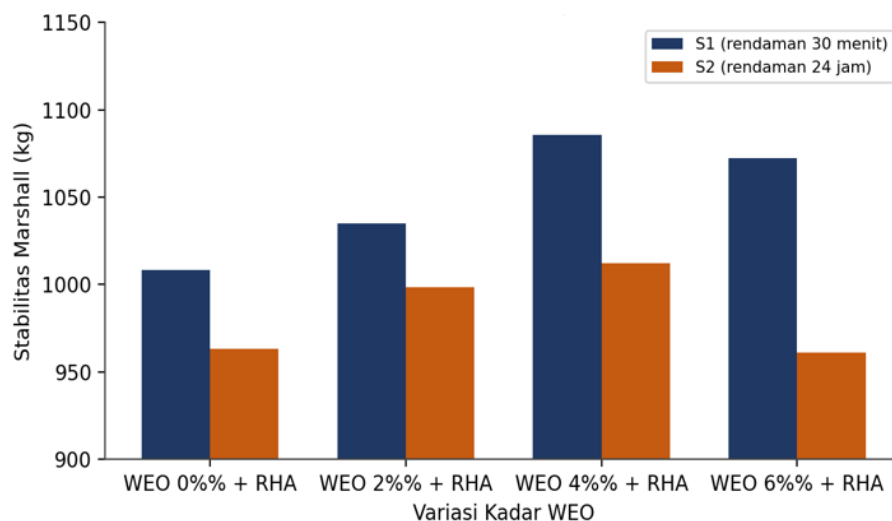
Tabel 4. 54. Rekapitulasi Stabilitas *Marshall* S1, S2, Nilai IKS

Variasi	S1 (kg)	S2 (kg)	IKS (%)	Syarat (IKS $\geq$ 90%)
RHA 0% + WEO 0%	1008.49	963.38	95.53	MEMENUHI
RHA 2% + WEO 2%	1035.11	998.69	96.48	MEMENUHI
RHA 2% + WEO 4%	1085.51	1012.08	93.24	MEMENUHI
RHA 2% + WEO 6%	1072.49	961.17	89.62	TIDAK MEMENUHI

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4. 32 Hubungan Kadar WEO terhadap Nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS)



Gambar 4.33. Perbandingan Marshall Rendaman Standar (S1) dan 24 Jam (S2)

Mengacu pada hasil yang tercantum dalam Tabel 4.52 serta Gambar 4.33, nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) yang dihasilkan pada masing-masing variasi campuran adalah 95,53% untuk kadar WEO 0%, kemudian meningkat menjadi 96,48% pada kadar WEO 2%, dan menurun menjadi 93,24% pada kadar WEO 4%, sehingga seluruhnya memenuhi persyaratan minimum 90%, sedangkan WEO 6% hanya mencapai 89,62% dan tidak memenuhi persyaratan. Nilai IKS tertinggi pada WEO 2% menunjukkan bahwa kadar *rejuvenator* yang tepat dapat membantu

mempertahankan ketahanan campuran terhadap pengaruh air. Ketahanan campuran terhadap pengaruh air dapat dipertahankan melalui proses rejuvenasi aspal RAP dengan WEO pada kadar yang tepat. Penambahan WEO mengembalikan fraksi *maltena* (komponen ringan aspal) yang hilang akibat oksidasi selama pemakaian sebelumnya, sehingga sifat viskoelastis aspal yang semula getas dan kaku kembali pulih menjadi lebih lentur. Aspal yang lebih lentur ini mampu membasahi dan menyelimuti permukaan agregat secara lebih merata, sehingga adhesi antara *binder* aspal dan permukaan agregat dapat meningkat, rongga yang dapat dimasuki air menjadi lebih sedikit, dan risiko *stripping* atau lepasnya ikatan aspal dari agregat akibat air dapat ditekan. Namun, efek ini hanya optimal pada kadar WEO yang tepat, yaitu 2% pada penelitian ini. Jika kadar WEO berlebihan, seperti pada kadar 6%, aspal justru mengalami pelunakan yang berlebihan sehingga ikatan aspal dengan agregat melemah, dan pada akhirnya menurunkan ketahanan campuran terhadap pengaruh air.

4.6.3 Kesimpulan Uji Indeks Kekuatan Sisa

Dengan mempertimbangkan hasil IKS, maka WEO 2% menghasilkan IKS tertinggi sebesar 96,48%, sedangkan WEO 4% menghasilkan IKS 93,24%, sehingga keduanya masih memenuhi persyaratan. Sebaliknya, WEO 6% tidak memenuhi karena IKS sebesar 89,62% kurang dari 90%. Oleh karena itu variasi RHA 2% + WEO 2% dapat dipilih sebagai variasi *rejuvenator* komposit yang paling optimal. Hasil ini juga diperkuat temuan (Abd Ali et al., 2024a) bahwa WEO dapat meningkatkan kinerja campuran RAP terhadap pengaruh air dan *stripping*, tetapi pemilihan kadar *rejuvenator* tetap diperlukan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan durabilitas campuran.

4.7 Analisis Biaya

4.7.1 Analisis Biaya Campuran Aspal Konvensional

Dalam analisis biaya ini, susunan campuran aspal konvensional mencakup beberapa jenis material, antara lain pasir, abu batu, agregat ukuran 3/4 inci, agregat ukuran 1/2 inci, dan aspal. Biaya tiap material dihitung berdasarkan sejumlah parameter yakni kebutuhan material, berat, harga satuan dasar, serta total biaya

yang dibutuhkan. Adapun hasil perhitungan biaya campuran aspal konvensional dapat dilihat pada Tabel 4.54.

Tabel 4. 55 Analisis Harga Aspal Konvensional

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	18	206,28	Rp320	Rp66,01
Agregat 1/2"	34	389,64	Rp365	Rp142,22
Pasir	12	137,52	Rp276	Rp37,96
Abu Batu	36	412,56	Rp172	Rp70,96
Aspal	6,05	73,08	Rp12.100	Rp871,20
TOTAL BIAYA		1200		Rp1,195,344

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Untuk campuran dengan berat 1.200 gram, biaya campuran aspal standar berdasarkan Tabel 4.54 tercatat sebesar Rp1,195,344. Setelah dikonversi, biaya campuran aspal konvensional menjadi Rp996,337. Nilai tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar pembandingan terhadap biaya campuran RAP 20% serta berbagai variasi campuran yang menggunakan RHA dan WEO.

4.7.2 Analisis Biaya Campuran RAP 20%

Pasir, abu batu, agregat berukuran 3/4 inci, serta agregat berukuran 1/2 inci, RAP (RAP >3/8 inci, RAP 3/8 inci – 4, dan RAP lolos saringan No. 4), serta aspal merupakan material yang digunakan untuk campuran RAP 20% tanpa bahan tambahan. Hanya biaya aspal baru yang diperhitungkan karena material RAP dalam campuran ini dianggap tidak memiliki biaya satuan mengingat sifatnya yang merupakan hasil daur ulang. Tabel 4.54 menyajikan hasil perhitungan biaya untuk campuran RAP 20%.

Tabel 4. 56 Analisis Harga Aspal RAP 20%

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	15	169,92	Rp320	Rp54,37
Agregat 1/2"	30	339,84	Rp365	Rp124,04
Pasir	5	56,64	Rp276	Rp15,63
Abu Batu	30	339,84	Rp172	Rp58,45
RAP >3/8"	6	67,97	Rp0	Rp0,00
RAP 3/8" - #4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
RAP Lolos No. 4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
Aspal	5,6	67,20	Rp12.100	Rp813,12
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.065,62

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan data pada Tabel 4.55, penggunaan RAP sebesar 20% menghasilkan biaya sebesar Rp1.065,62 untuk campuran dengan berat 1.200 gram. Jika dikonversi ke dalam satuan ton, biaya tersebut menjadi Rp888.018/ton. Biaya ini lebih ekonomis dibandingkan campuran aspal konvensional yang mencapai Rp996.337/ton, sehingga diperoleh penghematan sebesar Rp108.319/ton atau sekitar 10,9%. Efisiensi biaya tersebut dipengaruhi oleh penggunaan RAP tanpa biaya material, yang menggantikan 20% kebutuhan agregat baru sekaligus memberikan kontribusi aspal lama sebesar sekitar 0,84% terhadap campuran. Walaupun campuran RAP 20% menggunakan kadar aspal baru sebesar 5,6%, biaya tambahan akibat penggunaan aspal tersebut masih lebih rendah dibandingkan penghematan dari berkurangnya kebutuhan agregat baru..

4.7.3 Analisis Biaya Campuran Aspal RAP Rejuvenator Komposit

A. RAP 20% dengan RHA 2% WEO 2%

Untuk campuran RAP 20% dengan 2% RHA + 2% WEO, komposisi material pada dasarnya sama dengan campuran RAP 20%, tetapi ditambahkan RHA dan WEO sebagai *rejuvenating agent*. Meskipun penambahan RHA dan WEO bertujuan untuk meningkatkan kinerja campuran RAP, hal tersebut juga berdampak pada biaya keseluruhan campuran. Tabel 4.55 menyajikan hasil perhitungan biaya untuk campuran RAP 20% dengan penambahan 2% RHA dan 2% WEO.

Tabel 4. 57 Analisis Harga Aspal RAP 20% + RHA 2%+WEO 2%

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	15	169,92	Rp320	Rp54,37
Agregat 1/2"	30	339,84	Rp365	Rp124,04
Pasir	5	56,64	Rp276	Rp15,63
Abu Batu	30	339,84	Rp172	Rp58,45
RAP >3/8"	6	67,97	Rp0	Rp0,00
RAP 3/8" - #4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
RAP Lolos No. 4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
Aspal	5,6	67,20	Rp12.100	Rp813,12
WEO	2	0,2028	Rp48.000	Rp9,73
RHA	2	0,2028	Rp23.700	Rp4,81
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.080,16

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Mengacu pada Tabel 4.56, biaya campuran dengan berat 1.200 gram yang terdiri atas 20% RAP, 2% RHA, dan 2% WEO tercatat sebesar Rp1.080,16. Jika dikonversi ke dalam satuan ton, biaya tersebut setara dengan Rp900.133/ton. Nilai tersebut meningkat sebesar Rp12.115/ton atau sekitar 1,4% dibandingkan campuran RAP 20% tanpa bahan tambahan yang memiliki biaya Rp888.018/ton. Kenaikan biaya tersebut disebabkan oleh adanya tambahan biaya untuk

penggunaan RHA dan WEO. Meskipun demikian, biaya campuran dengan penambahan kedua bahan tersebut masih lebih rendah daripada campuran aspal konvensional yang mencapai Rp996.337/ton. Perbedaannya mencapai Rp96.204/ton atau sekitar 9,7%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan RHA 2% dan WEO 2% hanya memberikan peningkatan biaya yang relatif kecil, sedangkan campuran yang dihasilkan tetap memberikan keuntungan ekonomis dibandingkan campuran konvensional.

B. Analisa Biaya Campuran RAP 20% dengan RHA 2% WEO 4%

Komposisi material untuk campuran RAP 20% yang ditambah dengan 2% RHA dan 4% WEO sama dengan campuran sebelumnya, kecuali bahwa kadar RHA tetap pada 2% dan komponen WEO ditingkatkan menjadi 4%. Tujuan peningkatan konsentrasi WEO ini adalah untuk mengetahui bagaimana penambahan bahan peremaja (*renewing agent*) memengaruhi biaya keseluruhan campuran tersebut. Tabel 4.56 menampilkan hasil perhitungan biaya untuk campuran RAP 20% dengan 2% RHA dan 4% WEO.

Tabel 4. 58 Analisis Harga Aspal RAP 20% + RHA 2% + WEO 4%

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	15	169,92	Rp320	Rp54,37
Agregat 1/2"	30	339,84	Rp365	Rp124,04
Pasir	5	56,64	Rp276	Rp15,63
Abu Batu	30	339,84	Rp172	Rp58,45
RAP >3/8"	6	67,97	Rp0	Rp0,00
RAP 3/8" - #4	7	79,30	Rp0	Rp0,00

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
RAP Lolos No. 4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
Aspal	5,6	67,20	Rp12.100	Rp813,12
WEO	4	0,4055	Rp48.000	Rp19,47
RHA	2	0,2028	Rp23.700	Rp4,81
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.089,89

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan Tabel 4.57, campuran dengan komposisi 20% RAP, 2% RHA, dan 4% WEO memiliki biaya sebesar Rp1.089,89 untuk setiap 1.200 gram campuran. Setelah dikonversi ke satuan ton, biaya tersebut menjadi Rp908.244/ton. Nilai ini meningkat Rp8.111/ton atau sekitar 0,9% dibandingkan campuran dengan WEO 2% yang memiliki biaya Rp900.133/ton. Jika dibandingkan dengan campuran RAP 20% tanpa penambahan bahan, biaya tersebut lebih tinggi Rp20.226/ton atau sekitar 2,3%. Peningkatan biaya tersebut berkaitan dengan bertambahnya penggunaan WEO dalam campuran. Walaupun demikian, biaya campuran RAP 20% dengan RHA 2% dan WEO 4% masih berada di bawah biaya campuran aspal konvensional sebesar Rp996.337/ton, dengan penghematan sebesar Rp88.093/ton atau sekitar 8,8%.

C. Analisa Biaya Campuran RAP 20% dengan RHA 2% WEO 6%

Konsentrasi WEO ditingkatkan menjadi 6% merupakan tingkat tertinggi yang digunakan dalam penelitian ini, sementara kandungan RHA tetap pada angka 2% untuk campuran yang terdiri dari 20% RAP dengan penambahan 6% WEO dan 2% RHA. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mengetahui bagaimana kandungan WEO maksimum memengaruhi biaya keseluruhan campuran. Tabel 4.57 menampilkan

hasil perhitungan biaya untuk campuran yang mengandung 20% , 2% RHA dan 6% WEO.

Tabel 4. 59 Analisis Harga Aspal RAP 20% + RHA 2% + WEO 6%

Material	Material (%)	Berat (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	Total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	15	169,92	Rp320	Rp54,37
Agregat 1/2"	30	339,84	Rp365	Rp124,04
Pasir	5	56,64	Rp276	Rp15,63
Abu Batu	30	339,84	Rp172	Rp58,45
RAP >3/8"	6	67,97	Rp0	Rp0,00
RAP 3/8" - #4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
RAP Lolos No. 4	7	79,30	Rp0	Rp0,00
Aspal	5,6	67,20	Rp12.100	Rp813,12
WEO	6	0,6083	Rp48.000	Rp29,20
RHA	2	0,2028	Rp23.700	Rp4,81
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.099,63

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Mengacu pada tabel 4.58, campuran yang terdiri atas 20% RAP, 2% RHA, dan 6% WEO membutuhkan biaya sebesar Rp1.099,63 untuk setiap 1.200 gram campuran. Setelah dikonversi ke satuan ton, biaya yang diperoleh adalah Rp916.355/ton. Nilai tersebut menjadi biaya paling tinggi dibandingkan variasi campuran RAP lainnya. Kenaikan biaya terutama dipengaruhi oleh penggunaan WEO sebesar 6% yang merupakan kadar tertinggi dalam variasi penelitian. Meskipun demikian, biaya campuran tersebut masih lebih rendah daripada campuran konvensional sebesar Rp996.337/ton, sehingga diperoleh selisih biaya sebesar Rp79.982/ton atau sekitar 8,0%. Dengan demikian, peningkatan kadar WEO menyebabkan biaya campuran meningkat, tetapi penggunaan RAP tetap memberikan keuntungan dari sisi biaya dibandingkan campuran konvensional.

4.7.4 Analisis Biaya Campuran

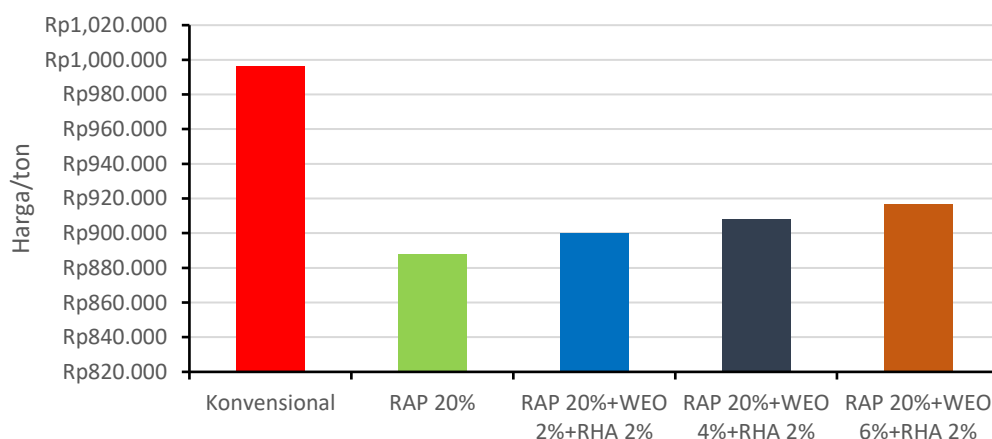
Biaya yang telah dihitung dan dikonversi untuk setiap campuran disajikan secara keseluruhan dalam tabel ringkasan guna mempermudah perbandingan biaya antar variasi campuran. Tabel 4.59 merangkum biaya untuk kombinasi aspal standar, campuran 20% RAP, serta campuran 20% RAP dengan RHA dan WEO.

Tabel 4. 60 Rekapitulasi Perbandingan Biaya Campuran

Jenis Aspal	Berat (gram)	Harga (Rp)	Konversi (Ton)	Harga (Rp/ton)
Konvensional	1.200	Rp1,195,60	0,83333	Rp996,337
RAP 20%	1.200	Rp1.065,62	0,83333	Rp888,018
RAP 20% + RHA 2% + WEO 2%	1.200	Rp1.080,16	0,83333	Rp900,133
RAP 20% + RHA 2% + WEO 4%	1.200	Rp1.089,89	0,83333	Rp908,244
RAP 20% + RHA 2% + WEO 6%	1.200	Rp1.099,63	0,83333	Rp916,355

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Grafik Analisa Biaya



Gambar 4. 34. Grafik Analisa Biaya

Hasil analisis pada Tabel 4.59 dan Gambar 4.34 memperlihatkan bahwa campuran konvensional membutuhkan biaya paling besar, yakni Rp996.337/ton.

Sebaliknya, campuran yang memanfaatkan RAP 20% tanpa bahan tambah menghasilkan biaya terendah, yaitu Rp888.018/ton. Ketika RHA 2% dan WEO ditambahkan pada campuran RAP 20%, biaya per ton naik secara bertahap, yaitu Rp900.133/ton untuk WEO 2%, Rp908.244/ton untuk WEO 4%, dan mencapai Rp916.355/ton untuk WEO 6%. Kenaikan ini wajar karena RHA dan WEO merupakan material tambahan yang memiliki harga tersendiri, sehingga semakin tinggi dosisnya, semakin besar pula biaya total campuran. Meskipun demikian, seluruh variasi campuran yang memakai RAP masih lebih ekonomis dibandingkan campuran konvensional, dengan selisih penghematan sekitar Rp80.000 hingga Rp108.000 per ton. Dengan kata lain, pemanfaatan material daur ulang tetap memberi keuntungan finansial, sehingga penentuan campuran optimum sebaiknya menimbang biaya dan kinerja campuran secara bersamaan.

Temuan ini sejalan dengan pernyataan (Mehmood et al., 2024) dalam tinjauan literatur mereka mengenai pemanfaatan waste engine oil pada campuran aspal daur ulang. Mereka menyimpulkan bahwa modifikasi komposit binder dengan WEO dan bahan tambah lain, termasuk rice husk ash, mampu menggantikan sebagian kebutuhan aspal baru hingga 8-15%, sehingga pendekatan ini dinilai sebagai langkah menuju konstruksi perkerasan yang lebih hemat biaya sekaligus berkelanjutan dalam jangka panjang.