

BAB 5

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisa Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang terdiri dari :

- a. Berat jenis dan penyerapan air agregat
- b. Keausan agregat dengan mesin *Los Angeles Abrasion*
- c. Penetrasi aspal
- d. Kehilangan berat minyak dan aspal
- e. Berat jenis aspal
- f. Titik lembek aspal
- g. Titik nyala dan titik bakar aspal
- h. Daktilitas aspal

Pengujian tersebut diuji di Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Pemeriksaan karakteristik material dilakukan untuk memeriksa kelayakan dari material yang digunakan.

5.1.1 Analisa Karakteristik Agregat

Agregat yang digunakan pada pengujian karakteristik campuran terdiri dari dua jenis, meliputi agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar merupakan material yang tertahan pada saringan No. 4, yaitu agregat dengan ukuran partikel lebih besar dari 4,75 mm. Sementara itu, agregat halus adalah material yang lolos dari saringan No. 4, dengan ukuran partikel kurang dari atau sama dengan 4,75 mm.



Gambar 5.1 Agregat

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

Berikut adalah analisa pengujian karakteristik agregat :

a. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Berat jenis didefinisikan sebagai rasio antara berat volume agregat terhadap berat volume air. Sedangkan penyerapan menunjukkan peningkatan massa agregat akibat penetrasi air ke dalam pori-pori agregat, tanpa memperhitungkan air yang menempel pada permukaan agregat (Dionisius et al., 2018). Di bawah ini disajikan hasil pengujian terhadap berat jenis agregat kasar dan penyerapan.

Tabel 5.1 Berat jenis agregat kasar

BJ Agregat Kasar (Split 1-2)					
Keterangan	I	II	III	Rata - rata	SNI 1969 : 2016
BJ <i>Bulk</i>	2,59	2,50	2,58	2,56	2,5
BJ (SSD)	2,64	2,55	2,64	2,61	
BJ (<i>apparent</i>)	2,73	2,63	2,73	2,70	
Penyerapan (%)	2,04	1,89	2,06	2,00	3%
BJ Agregat Kasar (<i>Screening</i>)					
BJ <i>Bulk</i>	2,58	2,51	2,58	2,55	2,5
BJ (SSD)	2,62	2,55	2,62	2,60	
BJ (<i>apparent</i>)	2,70	2,63	2,70	2,67	
Penyerapan (%)	1,74	1,81	1,71	1,76	3%

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berat jenis yang digunakan untuk perhitungan benda uji adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Berdasarkan pada Tabel 5.1 Berat Jenis Agregat Kasar (*split 1-2*) rata-rata berat jenis *bulk* yang didapat sebesar 2,56 dan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 2,00 %. Sedangkan Berat Jenis Agregat Kasar (*screening*) rata-rata berat jenis *bulk* yang didapat sebesar 2,55 dan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 1,75%. Nilai ini sudah memenuhi ketentuan pada SNI 1969:2016.



Gambar 5.2 Pengujian berat jenis agregat kasar

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

b. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

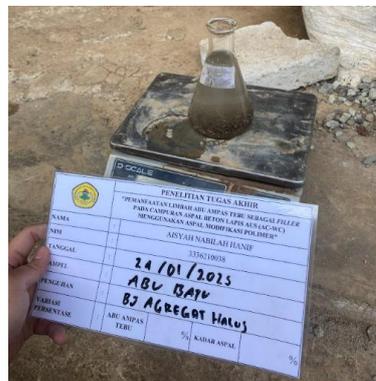
Agregat yang termasuk dalam kategori agregat halus yaitu material yang melewati saringan No. 4, dengan ukuran partikel kurang dari 4,75 mm. Di bawah ini disajikan hasil pengujian terhadap berat jenis serta daya serap air dari agregat halus.

Tabel 5.2 Berat jenis agregat halus

BJ Agregat Halus					
Keterangan	I	II	III	Rata – rata	SNI 1970 : 2016
BJ Bulk	2,55	2,53	2,90	2,66	2,51
BJ (SSD)	2,63	2,64	2,99	2,75	
BJ (<i>apparent</i>)	2,79	2,83	3,21	2,94	
Penyerapan (%)	3,46	4,17	3,31	3,64	5%

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berat jenis yang digunakan untuk perhitungan benda uji adalah berat jenis bulk atau berat jenis curah kering. Berdasarkan pada Tabel 5.2 Berat jenis agregat halus rata-rata berat jenis bulk yang didapat sebesar 2,66, berat jenis SSD sebesar 2,75, berat jenis apparent sebesar 3,64 dan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 3,64%. Nilai ini sudah memenuhi ketentuan pada SNI 1970:2016. dan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 3,64 %. Nilai ini sudah memenuhi ketentuan pada SNI 1970:2016.



Gambar 5.3 Pengujian berat jenis agregat halus

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

Semakin besar nilai berat jenis, maka volume agregat tersebut semakin kecil. Namun semakin kecil nilai berat jenis, maka volume agregat tersebut semakin besar. Hal ini berdasarkan rumus berat jenis, Dimana volume berbanding terbalik dengan berat jenis.

c. Keausan dengan Mesin *Los Angeles Abrasion*

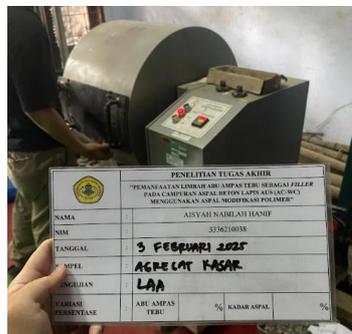
Sifat ketahanan agregat terhadap keausan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi mutu perkerasan jalan, karena berkaitan dengan daya tahan terhadap beban dan kekerasan agregat kasar melalui nilai abrasi (Arifin et al., 2007). Agregat kasar mengalami abrasi sebagai akibat dari pengaruh mekanis, seperti tekanan yang timbul selama tahapan konstruksi meliputi proses penimbunan, penghamparan, pemadatan serta akibat beban lalu lintas kendaraan dan faktor kimia seperti kelembapan serta fluktuasi suhu (Putri et al., 2023). Berikut hasil pengujian abrasi yang dilakukan menggunakan mesin *Los Angeles Abrasion* (LAA).

Tabel 5.3 Hasil pengujian keausan dengan mesin LAA

LAA Agregat				
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah		
Saringan		Hasil Pengujian		
Lewat	Tertahan	Berat sebelum, a (g)		
3/4	1/2	2500	2500	2500
1/2	3/4	2500	2500	2500
Jumlah berat		5000	5000	5000
Berat sesudah, b (g)		3723	3825	3561
a-b		1277	1175	1439
Keausan (%)		25,54	23,5	28,78
Keausan rata-rata (%)		25,94	SNI 2417:2008	
			< 30%	

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Dari ketiga pengujian didapatkan hasil rata-rata keausan agregat sebesar 25,92 % seperti pada Tabel 5.3 Hasil Penujian Keausan dengan Mesin LAA. Nilai keausan agregat sudah memenuhi syarat SNI 2417:2008 yang mensyaratkan nilai keausan <30%.



Gambar 5.4 Pengujian keausan dengan mesin LAA

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

5.1.2 Analisa Karakteristik *Filler*

Material *filler* terdiri dari partikel halus berukuran kurang dari 0,075 mm dan mampu melewati saringan No. 200, biasanya berbentuk debu. Dalam campuran aspal, *filler* berfungsi untuk mengisi celah rongga di antara partikel agregat (Saodang, 2005). Pada penelitian ini, *filler* yang digunakan terdiri dari abu batu dan abu ampas tebu yang melewati saringan No. 200 dan tertahan pada pan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.5. Hasil pengujian berat jenis abu ampas tebu disajikan dalam Tabel 5.4.



Gambar 5.5 *Filler* abu ampas tebu

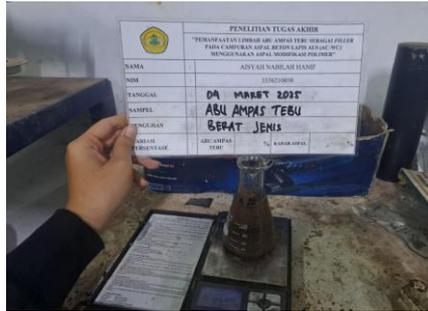
(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

Tabel 5.4 Berat jenis abu ampas tebu

Keterangan	I	II	III	Rata-Rata	
Berat Piknometer	72,75	72,75	72,75	72,75	gram
Berat Piknometer + air (25°C)	182,9	183,2	183	183,03	gram
Berat Piknometer + benda uji	122,49	123,12	122,64	122,75	gram
Berat Piknometer + benda uji + air	207,82	210	208,04	208,62	gram
Berat Jenis <i>Filler</i>	2,00	2,14	2,01	2,05	g/cm ³

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Penentuan berat jenis masing-masing *filler* dilakukan melalui tiga kali pengujian sesuai dengan standar SNI 1970-2016. Berdasarkan tabel 5.4 diketahui dan berat jenis *filler* abu ampas tebu yaitu rata-rata sebesar 2,05 g/cm³. Nilai berat jenis dari abu hasil pembakaran ampas tebu berada di bawah nilai berat jenis abu batu yaitu sebesar 2,66. Perbedaan berat jenis ini dapat mempengaruhi nilai VIM dan VMA dimana penggunaan berat jenis dengan nilai yang lebih rendah dapat meningkatkan nilai VIM dan VMA karena struktur campuran menjadi lebih berpori (Hidayat & Kushari, 2018).



Gambar 5.6 Pengujian berat jenis abu ampas tebu

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

5.1.3 Analisa Karakteristik Aspal

Penelitian ini menggunakan aspal polimer elastomer PG-70. Ada tujuh karakteristik aspal yang akan diuji antara lain penetrasi aspal, kehilangan berat minyak, berat jenis aspal, titik lembek, daktilitas, viskositas, titik nyala dan titik bakar. Pengujian-pengujian tersebut menggunakan prosedur Standar Nasional Indonesia dan Spesifikasi Bina Marga tahun 2024. Berikut ini adalah analisa pengujian karakteristik aspal.

a. Penetrasi Aspal

Pengujian dilakukan untuk memeriksa tingkat kekerasan aspal yang dilihat dari kedalaman jarum penetrasi yang dibebani dalam waktu tertentu dan suhu standar ke dalam permukaan aspal, yang diukur dengan angka yang terbaca pada arloji penetrometer. Pada pengujian ini, aspal yang digunakan adalah aspal polimer elastomer PG-70. Berikut ini adalah hasil pengujian penetrasi aspal.

Tabel 5.5 Hasil pengujian penetrasi aspal

Penetrasi Pada Suhu 25 °C, Beban 100 gr selama 5 detik	I	II	III
Pengamatan 1	52,5	44	52,5
Pengamatan 2	60	46	60
Pengamatan 3	57,5	46	57,5
Pengamatan 4	55	48	55
Pengamatan 5	60	49	60
Rata-Rata	57	46,6	57
	53,5		
SNI 06-2456-2011	30 - 60		

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Aspal modifikasi polimer PG 70 merupakan aspal yang diformulasikan dapat menahan suhu tinggi tanpa mengalami deformasi (hingga 70°C) dan suhu rendah

tanpa mengalami retak. Nilai *Performance grades* (PG) didapatkan melalui pengujian oleh alat *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), dimana aspal diklasifikasikan berdasarkan kinerjanya. Setiap PG memiliki dua angka; angka pertama menunjukkan suhu maksimum tanpa deformasi, dan angka kedua menunjukkan suhu minimum tanpa retakan (Indriyanti, 2017).

Berdasarkan Tabel 5.5 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal pada pengujian I didapatkan nilai sebesar 57 pada pengujian II sebesar 46,6 dan pengujian III sebesar 57 menghasilkan nilai rata-rata sebesar 53,5, menandakan bahwa nilai penetrasi aspal masih pada rentang nilai 30-60. Nilai tersebut adalah nilai penurunan jarum penetrasi dengan beban 100 gr selama 5 detik. Nilai penetrasi ini sudah sesuai dengan spesifikasi pada SNI 2456-2011 untuk penetrasi aspal polimer elastomer PG-70.

Hubungan nilai penetrasi dan *performance grades* (PG) menunjukkan bahwa nilai PG cenderung menurun seiring meningkatnya nilai penetrasi, yang menunjukkan bahwa aspal menjadi lebih lunak. Artinya, ketika kekerasan aspal menurun, ketahanannya terhadap suhu tinggi juga menurun, dan berlaku sebaliknya (Indriyati et al., 2013). Adapun menurut penelitian yang dilakukan (Wibisono & Yuantika, 2024) menggunakan aspal pertamina dan aspal PG 70, didapatkan hasil untuk nilai rata-rata penetrasi aspal pertamina adalah 61 sedangkan untuk aspal PG 70 nilai rata-rata 48. Hal ini menunjukkan bahwa aspal PG 70 lebih keras dibandingkan dengan aspal pertamina, sedangkan dari segi stabilitas aspal PG 70 memiliki stabilitas yang lebih tinggi dan dapat menahan beban lalu lintas berat.



Gambar 5.7 Pengujian penetrasi aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

b. Kehilangan Berat Minyak dan Aspal

Pemeriksaan ini dilakukan untuk menetapkan berkurangnya berat minyak dan aspal dengan cara memanaskan di dalam oven dan tebal tertentu yang ditunjukkan dalam persen berat semula. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat fisik aspal selama proses pencampuran di Asphalt Mixing Plant pada suhu 163°C. Berikut ini adalah hasil pengujian kehilangan berat aspal.

Tabel 5.6 Hasil pengujian kehilangan berat minyak dan aspal

Pengujian	I	II	III
Berat cawan + aspal keras (g)	65	65	65
Berat cawan kosong (g)	15	15	15
Berat aspal keras (g)	50	50	50
Berat sebelum pemanasan (g)	65	65	65
Berat sesudah pemanasan (g)	64,5	65	64,8
Berat endapan (g)	0,5	0	0,2
Kehilangan berat aspal (%)	0,77%	0,00%	0,31%
Rata-Rata	0,36%		
SNI 06-2440-1991	< 0,8%		

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Dari ketiga pengujian didapatkan hasil rata-rata kehilangan berat aspal sebesar 0,36% seperti pada Tabel 5.6 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Aspal. Nilai kehilangan berat aspal ini sudah memenuhi syarat SNI 06-2440-1991 yang mensyaratkan nilai kehilangan berat sebesar $\leq 0,8\%$. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa aspal tidak mengalami kehilangan berat yang berlebihan. Kehilangan berat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kadar aspal akibat paparan suhu tinggi.



Gambar 5.8 Pengujian kehilangan berat minyak dan aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

c. Berat Jenis Aspal

Penentuan berat jenis aspal dilakukan untuk mengukur densitas aspal padat menggunakan piknometer. Berat jenis aspal didefinisikan sebagai perbandingan antara massa aspal padat dan massa air suling dengan volume yang sama pada suhu 25°C. Jenis aspal yang digunakan dalam pengujian ini adalah aspal modifikasi dengan polimer elastomer PG 70. Hasil pengujian berat jenis aspal disajikan berikut ini.

Tabel 5.7 Hasil pengujian berat jenis aspal

Keterangan	Hasil
Berat piknometer (g)	50
Berat piknometer + Air (g)	146
Berat piknometer + Benda uji (g)	120
Berat piknometer + benda uji + Air (g)	149
BJ jenis aspal (g)	1,04
SNI 2441-2011	≥ 1

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Tabel 5.7 Hasil pengujian berat jenis aspal dari pengujian tersebut didapatkan hasil berat jenis aspal sebesar 1,04. Nilai berat jenis aspal sudah memenuhi syarat SNI 2441-2011 yang mensyaratkan berat jenis aspal sebesar ≥ 1 . Jika berat jenis aspal memiliki nilai yang tinggi, maka berat aspal pada campuran juga akan semakin besar.



Gambar 5.9 Pengujian berat jenis aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

d. Titik Lembek Aspal

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui titik lembek aspal, di mana pengujian menggunakan bola baja dengan berat tertentu mulai menembus lapisan aspal atau menekan cincin berukuran tertentu hingga menyentuh pelat dasar di bawah cincin akibat peningkatan suhu. Berikut adalah hasil pengujian titik lembek aspal.

Tabel 5.8 Hasil pengujian titik lembek aspal

Keterangan		Suhu (°C)
Pengujian	I	80
	II	84
SNI 2432-2011		> 70

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Tabel 5.9 Hasil Pengujian Titik Lembek nilai yang didapatkan dari pengujian 1 sebesar 82°C dan pengujian 2 sebesar 84°C. Nilai suhu tersebut adalah nilai titik lembek dari aspal yang digunakan. Titik lembek adalah suhu yang dibutuhkan untuk aspal berubah bentuk dari padat menjadi lembek. Nilai titik lembek aspal ini sudah memenuhi syarat SNI 2434-2011 yang mensyaratkan titik lembek aspal $\geq 48^\circ\text{C}$. Jika suhu yang didapatkan pada titik lembek bernilai kecil, maka aspal akan mudah menjadi lembek atau tingkat kekerasannya menjadi berkurang sehingga membuat campuran tidak stabil.



Gambar 5.10 Pengujian titik lembek aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

e. Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

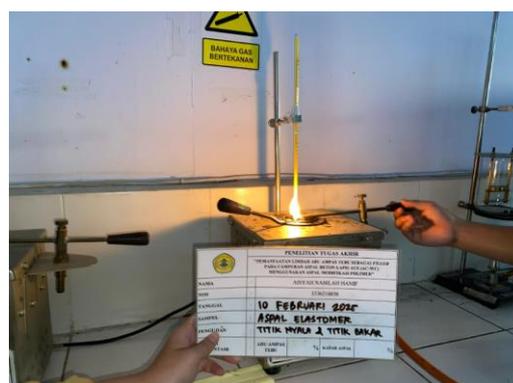
Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan suhu pada saat terjadinya nyala singkat kurang dari 5 detik (titik nyala) dan nyala lebih dari 5 detik (titik bakar) di permukaan aspal. Berikut adalah hasil pengujian titik nyala dan titik bakar.

Tabel 5.9 Hasil pengujian titik nyala dan titik bakar aspal

Titik	suhu
Nyala	260
Bakar	280
SNI 2432-2011	> 232

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Tabel 5.9 Hasil pengujian titik nyala dan titik bakar didapat nilai titik nyala hasil pengujian adalah sebesar 260°C sedangkan nilai titik bakar yang didapatkan nilai sebesar 280°C. Hal ini berarti aspal akan menimbulkan percikan api pada suhu 260°C dan aspal akan terbakar pada suhu 280°C. Nilai titik nyala aspal ini sudah memenuhi syarat SNI 2433-2011 yang mensyaratkan titik nyala aspal sebesar ≥ 232 °C. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai titik nyala dan titik bakar, jika nilai titik bakar semakin rendah maka aspal akan sangat mudah terbakar dan jika itu terjadi maka campuran aspal akan menjadi berbahaya saat suhu panas.



Gambar 5.11 Pengujian titik nyala dan titik bakar aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

f. Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas aspal dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa jauh aspal dapat mengalami pemuluran sebelum terputus, yang mencerminkan tingkat kelenturan material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menarik dua cetakan berisi aspal pada suhu $25 \pm 0,5$ °C, menggunakan kecepatan penarikan sebesar 50 mm per menit ± 2 mm. Jarak maksimum sebelum aspal putus menjadi indikator nilai daktilitas. Hasil dari pengujian daktilitas aspal disajikan berikut ini.

Tabel 5.10 Hasil pengujian daktilitas aspal

Daktilitas Pada 25°C		Panjang Tanpa Putus (cm)
Pengujian	I	147
	II	150
	III	149
Rata-Rata		148,7
SNI 2432-2011		>100 cm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Tabel 5.10 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal didapatkan hasil daktilitas aspal sepanjang 148,7 cm. Nilai daktilitas aspal ini sudah memenuhi syarat SNI 2432-2011 yang mensyaratkan daktilitas aspal sebesar ≥ 100 cm. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan aspal untuk memulur atau memanjang. Panjangnya pemuluran dipengaruhi oleh tingkat kelekatan aspal. Semakin panjang pemulurannya maka akan semakin besar tingkat kelekatan aspal. Dengan kelekatan aspal yang tinggi, maka campuran akan semakin kuat.



Gambar 5.12 Pengujian daktilitas aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

g. Viskositas

Pengujian viskositas aspal bertujuan untuk mengetahui kekentalan aspal pada suhu pencampuran dan suhu pemadatan sehingga cara kerja aspal dapat dioptimalkan agar bisa lebih efektif. Viskositas yang sesuai memastikan aspal cukup cair saat pencampuran, namun tetap cukup kental saat pemadatan agar mampu mengikat agregat dengan baik.



Gambar 5.13 Mesin viskositas aspal

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

Penentuan suhu viskositas untuk aspal modifikasi polimer elastomer berdasarkan hasil pengujian oleh (Alfiyyah, 2021) atau mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2024 menunjukkan bahwa viskositas pada suhu pencampuran adalah sebesar $170+20$ cSt dengan perkiraan temperatur aspal yaitu $155+1^{\circ}\text{C}$, dan viskositas pemadatan yaitu $280+30$ cSt dengan perkiraan temperatur aspal yaitu $145+1^{\circ}\text{C}$. Nilai viskositas aspal ini sudah memenuhi syarat (SNI 7729:2011) yang mensyaratkan viskositas aspal sebesar ≥ 300 cSt.

Jika waktu yang diperoleh dari pengujian viskositas bernilai kecil, itu menandakan bahwa aspal memiliki kekentalan yang rendah atau cenderung lebih cair. Aspal dengan viskositas rendah akan mempengaruhi proses pencampuran dan pemadatan, karena tidak memerlukan suhu yang tinggi untuk mencapai kondisi idealnya. Semakin rendah viskositas aspal, maka semakin rendah pula suhu yang dibutuhkan untuk mencampur dan memadatkannya secara efektif.

Di bawah ini disajikan ringkasan hasil pengujian terhadap karakteristik aspal yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 5.11 Rekapitulasi pengujian karakteristik aspal polimer elastomer PG-70

Pengujian	Hasil	Standar Pengujian	Ketentuan
Penetrasi Aspal	53,5	SNI 2456-2011	30 - 60
Kehilangan Berat Minyak dan Aspal	0,36%	SNI 06-2440-1991	$\leq 0,8\%$
Berat Jenis	1,04	SNI 2441-2011	≥ 1
Titik Lembek	82°C	SNI 2434-2011	$\geq 70^\circ\text{C}$
Titik Nyala	260°C	SNI 2433-2011	$\geq 232^\circ\text{C}$
Titik Bakar	280°C	SNI 2433-2011	$\geq 232^\circ\text{C}$
Daktilitas	148,7	SNI 2432-2011	$\geq 100 \text{ cm}$

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Pengujian terhadap spesifikasi aspal polimer ini juga dilakukan sebelumnya oleh PT. Aspal Polimer Emulsindo. Berikut adalah hasil uji laboratorium yang telah diperoleh dari pengujian tersebut.

Tabel 5.12 Hasil pengujian aspal oleh PT Aspal Polimer Emulsindo

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi		Hasil Uji
				Min	Max	Batch 10 (Re Test)
						Aspal 60/70
						SBS 3411 2,5%
						FT Wax 0,5%
						SLF 0,1%
Original Binder						
1	Penetrasi Pada 25 °C	SNI 06-2456-2011	0.1 mm	30	60	36
2	Temp. yg menghasilkan Geser Dinamis (G*/Sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 1,0 kPa, (70 °C)	ASTM D7175	kPa	1,00		1,95
3	Viskositas Kinematis 135 °C dengan alat Rotational Viscometer	ASTM D2170-10	Cp			1.759
4	Titik Lembek	ASTM D 36	°C	70		83,8
5	Titik Nyala	SNI 2433-2011	°C	232		324
6	Berat Jenis	SNI 2441:2011	Gram	1		1,026
7	Kelarutan dalam Trichloroethylene	AASHTO T 44-14	%	99		99,8
8	Keelastisan Setelah Pengembalian	ASTM D6084	%	Cross Cek		76
9	Daktilitas	SNI 2432-2011	cm	Cross Cek		58
10	Stabilitas Penyimpanan Perbedaan Titik Lembek	ASTM D 5976 part 6.1	°C		6,5	1,4
Residu hasil TFOT (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)						
11	Berat yang Hilang	ASTM D2872	%	1,0		0,028
12	Keelastisan Setelah Pengambilan	ASTM D6084	%	45		72
13	Penetrasi Pada 25 °C	SNI 06-2456-2011	%	54		32
	$\frac{\text{Pen TFOT}}{\text{Pen Original}} \times 100\%$					88,8
14	Temp. yg menghasilkan Geser Dinamis (G*/Sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 2,2 kPa, (70 °C)	ASTM D7175	kPa	2,20		2,41

(Sumber : PT Aspal Polimer Emulsindo, 2025)

5.2 Perencanaan Campuran Aspal Beton

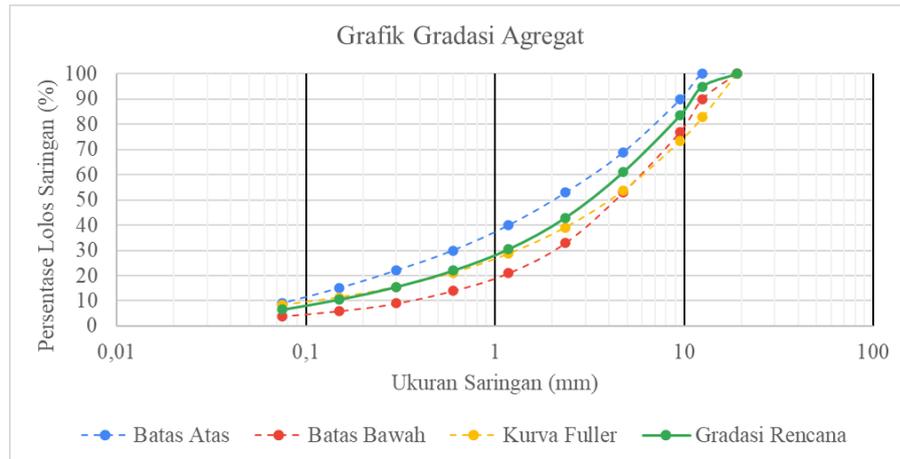
Pada sub bab ini adalah penjelasan tentang perhitungan kebutuhan material agregat dan abu ampas tebu yang dibutuhkan untuk campuran beraspal. Sesuai dengan perencanaan awal, peneliti akan membuat 72 benda uji sesuai dengan Tabel 4.5. Dalam merencanakan campuran, dibutuhkan beberapa data seperti berat jenis aspal, berat jenis agregat dan berat jenis *filler* abu ampas tebu. Berikut adalah contoh perhitungan kebutuhan material. Dalam penelitian ini gradasi yang digunakan adalah nilai tengah dari tabel gradasi pada spesifikasi Bina Marga 2024 seperti pada Gambar 4.5. Dari tabel tersebut didapat nilai tengah di antara batas atas dan batas bawah gradasi tersebut. Berikut adalah nilai tengah dari masing-masing saringan.

Tabel 5.13 Persentase gradasi rencana campuran aspal beton

Nomor / Ukuran Saringan		Spesifikasi Gradasi Laston (AC-WC)			Persentase digunakan
Inch	mm	(%)			(%)
3/4"	19	100	-	100	0,0
1/2"	12,5	90	-	100	5,0
3/8"	9,52	77	-	90	11,5
No. 4	4,76	53	-	69	22,5
No. 8	2,36	33	-	53	18,0
No. 16	1,18	21	-	40	12,5
No. 30	0,6	14	-	30	8,5
No. 50	0,3	9	-	22	6,5
No. 100	0,15	6	-	15	5,0
No. 200	0,075	4	-	9	4,0
Pan					6,5

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Dari hasil persentase gradasi rencana campuran aspal diperoleh data untuk menentukan hasil proporsi campuran yang akan dibuat untuk campuran aspal beton lapis aus (AC-WC).



Gambar 5.14 Grafik gradasi agregat beraspal lapis aus (AC-WC)

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Tahap berikutnya adalah menetapkan kadar aspal perkiraan yang nantinya akan digunakan dalam campuran. Nilai kadar aspal tersebut diperoleh berdasarkan persentase agregat yang tertahan pada masing-masing fraksi, kemudian dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned}
 P_b &= 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + \text{Konstanta} \\
 &= 0,035 (39) + 0,045 (54,5) + 0,18 (6,5) + 0,5 \\
 &= 5,48 \sim 5,5 \%
 \end{aligned}$$

Maka kadar aspal yang digunakan sebesar $5,5\% \pm 0,5\%$ untuk setiap kadar abu ampas tebu yang digunakan. Untuk berat total agregat dalam campuran akan dikurangi berat dari kadar aspal yang digunakan untuk selanjutnya menghitung berat agregat tiap saringan.

Tabel 5.14 Perkiraan nilai kadar aspal rencana

Pb-1	Pb-0,5	Pb	Pb+0,5	Pb+1
4,5%	5%	5,5%	6%	6,5%

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Selanjutnya adalah perhitungan perhitungan berat agregat setiap saringan. Berikut adalah rumus yang digunakan.

$$\text{Berat Agregat} = \% \text{tertahan} \times \text{berat total agregat} \quad (5.1)$$

Sebagai contoh, berikut adalah perhitungan berat agregat pada saringan no.16.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat saringan No.16} &= 12,5\% \times 1146 \\
 &= 143,3 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Dari semua variasi aspal dan variasi persentase abu ampas tebu, dihitung kebutuhan masing-masing agregat yang dibutuhkan. Berikut adalah hasil dari perhitungan berat agregat disetiap saringannya pada Pb 4,5%.

Tabel 5.15 Perhitungan kebutuhan agregat setiap saringan

Nomor / Ukuran Saringan		Persentase digunakan	Berat Agregat (g)	Berat AAT 4% (g)	Berat AAT 8% (g)	Berat AAT 12% (g)
Inch	(%)	(%)	4,5%			
3/4"	19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12,5	5,0	57,3	57,3	57,3	57,3
3/8"	9,52	11,5	131,8	131,8	131,8	131,8
No. 4	4,76	22,5	257,9	257,9	257,9	257,9
No. 8	2,36	18,0	206,3	206,3	206,3	206,3
No. 16	1,18	12,5	143,3	143,3	143,3	143,3
No. 30	0,6	8,5	97,4	97,4	97,4	97,4
No. 50	0,3	6,5	74,5	74,5	74,5	74,5
No. 100	0,15	5,0	57,3	57,3	57,3	57,3
No. 200	0,075	4,0	45,8	45,8	45,8	45,8
Pan	Abu batu	6,5	74,5	71,5	68,5	65,6
	Abu Ampas Tebu		0,0	3,0	6,0	8,9
Total Berat Agregat (g)			1146,0	1146,00	1146,00	1146,00
Berat Aspal Total (g)			54,0			

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

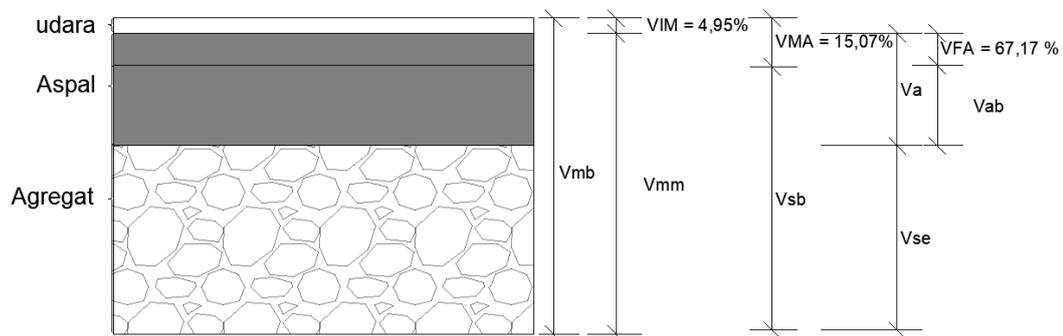
5.3 Pembuatan Benda Uji Campuran Beraspal Dengan Pengganti *Filler* Abu Ampas Tebu

Setelah diperoleh komposisi serta kadar aspal dalam campuran aspal beton, tahap selanjutnya adalah pembuatan benda uji pada campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) guna menentukan kadar aspal optimum pada setiap variasi penggunaan abu ampas tebu. Dalam penelitian ini, sebanyak 60 benda uji akan dibuat untuk menentukan kadar aspal optimum, ditambah 12 benda uji tambahan pada kadar optimum untuk setiap variasi abu ampas tebu. Pembuatan benda uji mengacu standar SNI 06-2489-1991 tentang cara pengujian campuran aspal dengan alat *Marshall*. Pemadatan dilakukan dengan menumbuk sampel sebanyak 2×75 kali menggunakan alat pemadat *Marshall (Marshall Compaction Hammer)*.

5.4 Analisa Karakteristik *Marshall* Campuran Beraspal

Penelitian ini mengkaji enam parameter karakteristik Marshall, yaitu VIM, VMA, VFA, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient. Nilai dari masing-masing karakteristik tersebut dijadikan acuan pada proses penentuan kadar aspal optimum (KAO).

VIM merupakan volume rongga udara yang tersisa di dalam campuran beton aspal setelah proses pemadatan. Rongga ini berfungsi sebagai ruang pergeseran agregat akibat pemadatan lanjutan dari beban lalu lintas berulang, serta sebagai ruang ekspansi ketika aspal menjadi lunak akibat kenaikan suhu lingkungan. VMA merupakan besar volume rongga dalam campuran beton aspal padat jika seluruh selimut aspal ditiadakan. VMA akan meningkat apabila lapisan aspal yang menyelimuti agregat menjadi lebih tebal, atau jika agregat yang digunakan adalah gradasi terbuka. VFA merupakan volume rongga antar agregat yang telah terisi aspal, disebut juga sebagai lapisan atau film aspal (Sukirman, 2016).



Gambar 5.15 Contoh skematis rongga beton aspal padat kadar aspal 6% AAT 4%

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

V_{mb} = volume bulk dari campuran aspal beton padat.

V_{mm} = volume teoritis tanpa rongga dari aspal beton padat.

V_{sb} = volume bulk dari agregat (volume agregat)

V_{se} = volume agregat efektif dari agregat

Berikut ini adalah hasil pengujian *Marshall* dengan kadar aspal rencana untuk mendapatkan kadar aspal optimum (KAO).



Gambar 5.16 Contoh pengujian *marshall* kadar aspal 4,5% abu ampas tebu 4%

(Sumber : Dokumentasi penulis, 2025)

Tabel 5.16 Rekapitulasi hasil pengujian *marshall*

Karakteristik <i>Marshall</i>	Kadar Aspal	Abu Ampas Tebu				Spesifikasi
		0%	4%	8%	12%	
VIM	4,5	11,30	12,32	12,60	14,24	3 % - 5 %
	5	8,80	8,12	9,86	11,17	
	5,5	7,26	7,18	7,85	9,03	
	6	5,73	4,97	6,41	6,03	
	6,5	4,35	4,21	4,79	4,99	
VMA	4,5	17,66	18,61	18,87	20,40	Min 15 %
	5	16,42	15,79	17,39	18,59	
	5,5	16,08	16,01	16,61	17,68	
	6	15,77	15,09	16,37	16,04	
	6,5	15,61	15,49	16,00	16,18	
VFA	4,5	36,05	33,99	34,81	30,24	Min 65 %
	5	46,39	48,59	43,73	41,55	
	5,5	54,87	55,20	53,12	50,34	
	6	63,70	67,06	61,15	62,62	
	6,5	72,17	72,82	70,07	69,21	
Stabilitas	4,5	1063,73	1109,18	1078,27	1052,82	Min 1000 kg
	5	1058,27	1174,64	1111,00	1105,55	
	5,5	1118,28	1194,65	1154,64	1152,82	
	6	1191,01	1283,74	1191,01	1125,55	
	6,5	1101,91	1094,64	1105,55	1100,09	
<i>Flow</i>	4,5	2,67	2,38	2,51	2,64	2 mm - 4 mm
	5	2,80	2,44	2,69	2,78	
	5,5	2,93	2,45	2,72	2,82	
	6	3,06	2,55	2,78	2,98	
	6,5	3,29	2,99	3,05	3,14	
MQ	4,5	397,87	477,98	434,67	400,62	Min 250 kg/mm
	5	387,53	481,91	413,61	398,08	
	5,5	381,70	491,68	426,25	410,14	
	6	392,62	506,90	432,51	379,27	
	6,5	336,13	373,00	365,40	350,92	

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

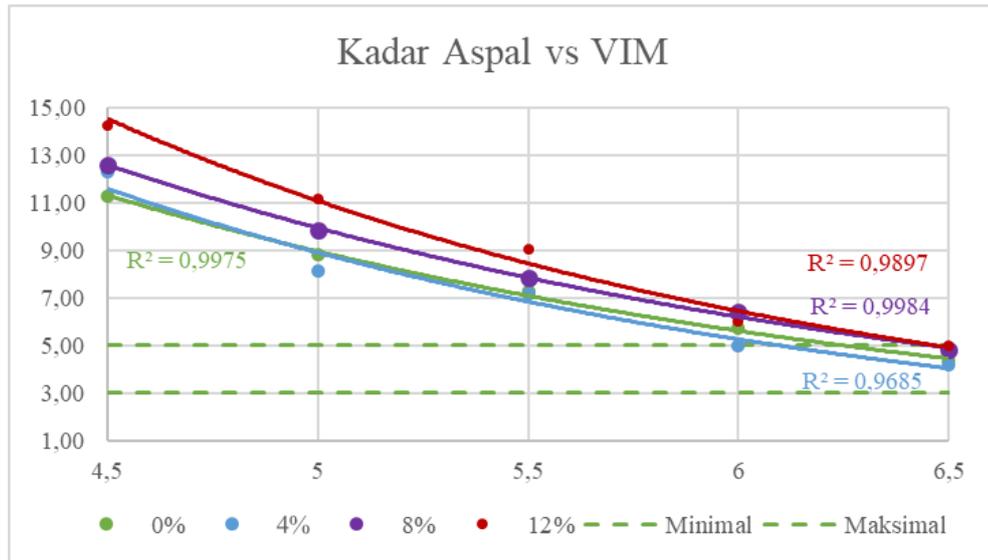
Dari tabel di atas, terlihat bahwa beberapa nilai belum memenuhi standar Bina Marga, sementara nilai lainnya sudah sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan. Pada nilai VMA, semua nilai yang didapatkan telah memenuhi syarat Bina Marga dengan nilai di atas 15%. Pada nilai VIM terdapat 15 dari 20 nilai yang tidak memenuhi syarat Bina Marga yaitu nilai yang didapatkan lebih dari 5%. Pada nilai VFA didapatkan hasil 15 nilai yang tidak memenuhi syarat Bina Marga dengan nilai kurang dari 65%. Pada nilai stabilitas semuanya memenuhi syarat Bina Marga dengan nilai lebih dari 1000 kg. Pada nilai *flow* semuanya memenuhi syarat Bina Marga dengan nilai rentan 2 – 4 mm. Pada nilai MQ hasil yang didapatkan semuanya memenuhi syarat Bina Marga yaitu minimal 250 kg/mm.

5.4.1 Analisa VIM (*Void In Mixture*)

VIM adalah jumlah pori-pori yang terdapat di antara butiran agregat yang telah dilapisi oleh aspal. Nilai VIM dinyatakan sebagai persentase terhadap volume total campuran beton aspal yang telah dipadatkan. (Saudi et al., 2023). Berikut ini adalah contoh perhitungan nilai VIM pada benda uji 1 pada kadar aspal 6% dan kadar abu ampas tebu 4%.

$$\begin{aligned} \text{VIM} &= 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \\ &= 100 \times \frac{2,488 - 2,37}{2,488} \\ &= 4,95\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian VIM, nilai yang memenuhi kriteria diperoleh saat benda uji menggunakan kadar aspal sebesar 6% hingga 6,5% dengan kadar abu ampas tebu 4%, serta pada kadar aspal 6,5% dengan kadar abu ampas tebu 8% dan 12%. Sebaliknya, penggunaan kadar aspal 4,5% hingga 5,5% pada seluruh variasi kadar abu ampas tebu menghasilkan nilai VIM yang melebihi batas persyaratan. Nilai VIM tertinggi tercatat sebesar 14,24% pada benda uji dengan kadar aspal 4,5% dan abu ampas tebu 12%.



Gambar 5.17 Grafik perbandingan kadar aspal vs VIM

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.17 Grafik perbandingan kadar aspal vs VIM diatas, dilihat dari kadar aspal yang digunakan nilai VIM cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh banyaknya aspal dalam campuran, sehingga rongga dalam campuran semakin sedikit karena terisi oleh aspal. Dengan kata lain, semakin tinggi kadar aspal, semakin rendah nilai VIM yang terbentuk.

Jika dibandingkan dengan penelitian (Ali H, 2011) menggunakan *filler* abu batu, pada kadar aspal optimum 5,87% nilai VIM tercatat sebesar 4,2%. Perbedaan ini menunjukkan nilai VIM pada penggunaan abu ampas tebu sedikit lebih besar, menghasilkan rongga dalam campuran yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan campuran tanpa *filler* abu ampas tebu. Hal ini disebabkan karena berat jenis abu ampas tebu lebih kecil dibandingkan abu batu yang menyebabkan nilai rongga dalam campuran meningkat (Ali H, 2011). Juga karena sebagian besar aspal diserap oleh *filler* abu ampas tebu yang digunakan sehingga mengurangi jumlah aspal yang dapat mengisi rongga-rongga antar agregat (Kurniasari et al., 2018).

Pada setiap kadar abu ampas tebu yang digunakan terdapat VIM yang tidak memenuhi ketentuan yaitu pada saat kadar aspal 4,5% sampai 5,5% sedangkan nilai VIM yang memenuhi syarat Bina Marga adalah saat kadar aspal yang digunakan sebesar 6% - 6,5%. Berdasarkan nilai koefisien determinasi nilai yang didapatkan

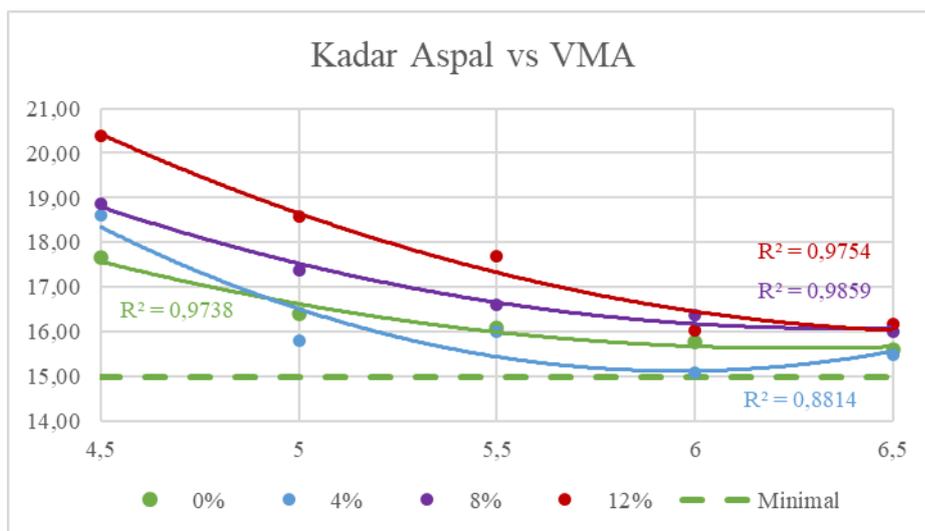
adalah 0,9685 – 0,9975 yang menunjukkan bahwa hubungan kadar aspal terhadap nilai VIM memiliki korelasi yang sangat kuat.

5.4.2 Analisa VMA (*Void In Mineral Aggregate*)

VMA adalah merupakan volume rongga udara yang terdapat di antara partikel-partikel agregat dalam campuran aspal panas yang telah dipadatkan, termasuk ruang yang diisi oleh aspa. Besarnya VMA dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti bentuk gradasi agregat, intensitas pemadatan, kadar aspal, bentuk butiran, tekstur permukaan agregat, dan tingkat penyerapan air oleh agregat (Bakri, 2020). Berikut ini adalah contoh perhitungan nilai VMA pada benda uji 1 pada kadar aspal 6% dan kadar abu ampas tebu 4%.

$$\begin{aligned} \text{VMA} &= 100 - \frac{\text{Berat isi} \times (100 - \text{Kadar Aspal})}{\text{Berat Jenis Agregat}} \\ &= 100 - \frac{2,37 \times (100 - 6)}{2.618} \\ &= 15,07\% \end{aligned}$$

Dari semua pengujian VMA, hasil yang didapat paling tinggi adalah saat kadar aspal 4,5% untuk kadar abu ampas tebu 4% dan 12%. Sedangkan untuk kadar abu ampas tebu 8%, nilai VMA tertinggi pada saat kadar aspal 5,5%. Namun seluruh pengujian memenuhi standar yang disyaratkan adalah >15%.



Gambar 5.18 Grafik perbandingan kadar aspal vs VMA

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Nilai VMA menunjukkan kecenderungan menurun seiring peningkatan kadar aspal dalam campuran. Penurunan ini disebabkan karena bertambahnya volume aspal yang mengisi rongga antar butir agregat, sehingga ruang kosong menjadi lebih sedikit. VMA berperan penting dalam menentukan seberapa besar rongga yang dapat diisi aspal. Semakin tinggi nilai VMA, semakin besar pula volume rongga yang terisi. Dilihat dari segi penambahan abu ampas tebu, peningkatan persentase abu ampas tebu menyebabkan nilai VMA semakin meningkat. Berdasarkan kadar abu ampas tebu yang digunakan, penambahan abu sebanyak 8% dan 12% menyebabkan peningkatan nilai VMA dibandingkan dengan benda uji yang tidak mengandung abu ampas tebu 0%. Sedangkan penambahan abu ampas tebu sebesar 4% menghasilkan penurunan nilai VMA pada kadar aspal 6% dan 6,5%.

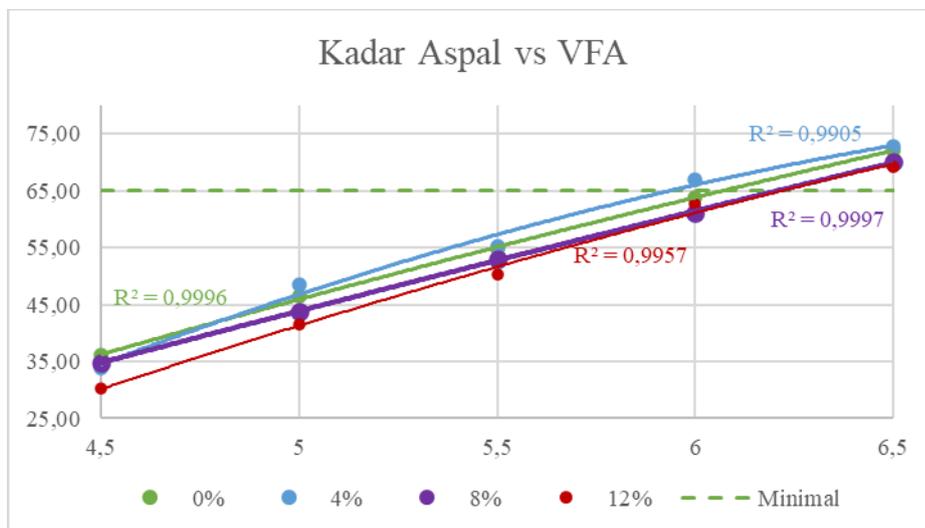
Jika dibandingkan dengan penelitian (Setiobudi & Tamara, 2020) yang menggunakan *filler* abu ampas tebu dan aspal pen 60/70 pada campuran (AC-WC), menunjukkan seiring bertambahnya persentase abu ampas tebu pada campuran maka nilai VMA semakin tinggi. Besarnya nilai VMA menunjukkan semakin banyak rongga dalam campuran tersebut yang bisa menyebabkan kepadatan campuran berkurang. Abu ampas tebu memiliki bentuk partikel yang tidak teratur, berpori, dan ringan, sehingga tidak mampu mengisi rongga antar agregat dengan seefisien *filler* abu batu. Akibatnya, volume rongga dalam agregat mineral (VMA) meningkat karena adanya ruang antar partikel yang tetap terbuka (Gutama et al., 2023). Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai VMA sebesar 0,8814 – 0,9859 yang menunjukkan bahwa hubungan kadar aspal terhadap nilai VMA memiliki korelasi yang kuat.

5.4.3 Analisa VFA (*Void Filled with Asphalt*)

VFA adalah persentase volume besar rongga dalam campuran agregat yang telah terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Untuk menghasilkan campuran perkerasan yang tahan lama, pori-pori di antara agregat harus terisi dengan jumlah aspal yang memadai agar terbentuk lapisan aspal yang cukup tebal (Raffles & Umar, 2023). Berikut ini merupakan contoh perhitungan VFA pada benda uji 1 dengan kadar aspal 6% dan kadar abu ampas tebu 4%.

$$\begin{aligned}
 \text{VFA} &= 100 \times \frac{\text{VMA} - \text{VIM}}{\text{VMA}} \\
 &= 100 \times \frac{15,07 - 4,95}{15,07} \\
 &= 67,17\%
 \end{aligned}$$

Dari semua pengujian VFA, hasil yang didapat yang memenuhi syarat adalah saat kadar aspal 6% dan 6,5% untuk kadar abu ampas tebu 4%, dan saat kadar aspal 6,5% untuk kadar abu ampas tebu 8% dan 12%. Dengan syarat yang disyaratkan oleh Bina Marga adalah >65%.



Gambar 5.19 Grafik perbandingan kadar aspal vs VFA

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.19 Grafik perbandingan kadar aspal vs VFA. Dilihat dari kadar aspal yang digunakan, nilai VFA meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini karena semakin banyak aspal yang digunakan maka akan mengisi rongga-rongga kosong di antara agregat. Dengan semakin sedikitnya rongga yang tersisa, persentase volume rongga yang terisi aspal pun menjadi lebih besar. Jadi, semakin tinggi kadar aspal, semakin tinggi pula nilai VFA yang dihasilkan (Gutama et al., 2023).

Berdasarkan kadar abu ampas tebu yang digunakan, pada kadar abu ampas tebu sebanyak 4% nilai VFA mengalami sedikit peningkatan. Sedangkan pada kadar abu ampas tebu 8% dan 12% nilai VFA mengalami penurunan dibandingkan dengan

nilai VFA pada kadar abu ampas tebu 4%. Pada kadar 4%, abu ampas tebu masih berfungsi secara optimal dalam mengisi rongga antar agregat tanpa mengganggu struktur kepadatan campuran. Jumlah *filler* yang relatif sedikit memungkinkan aspal mengisi ruang kosong yang tersisa secara efisien, sehingga proporsi rongga yang terisi aspal menjadi lebih tinggi, dan nilai VFA meningkat. Namun, saat kadar abu ampas tebu dinaikkan menjadi 8% dan 12%, jumlah abu ampas tebu yang terlalu banyak justru membuat struktur campuran menjadi kurang padat. Partikel abu ampas tebu yang ringan dan bisa menyerap sebagian aspal, sehingga mengurangi aspal efektif dalam campuran. Jika dibandingkan dengan penelitian (Gutama et al., 2023) yang menggunakan *filler* abu ampas tebu, menunjukkan seiring bertambahnya persentase abu ampas tebu pada campuran maka nilai VFA cenderung sedikit menurun.

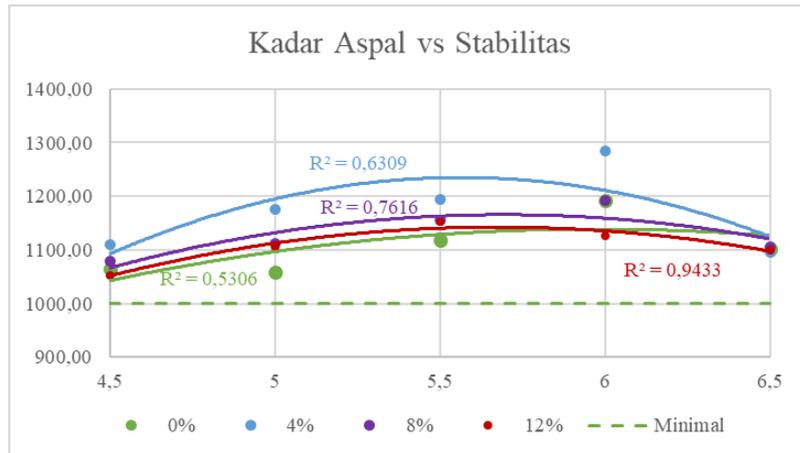
Nilai VFA berhubungan dengan nilai VIM dan VMA. Jika nilai VIM besar maka nilai VFA kecil, namun jika nilai VMA besar maka nilai VFA besar. Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai VFA sebesar 0,9905 – 0,9997 yang menunjukkan bahwa hubungan kadar aspal terhadap nilai VFA memiliki korelasi sangat kuat.

5.4.4 Analisa Stabilitas

Stabilitas adalah daya tahan lapisan perkerasan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk permanen seperti; gelombang, alur (*rutting*), atau *bleeding*. Nilai stabilitas dihasilkan dari pembacaan dial stabilitas ketika pengujian menggunakan alat *Marshall*, lalu dihitung dengan mencocokkan angka kalibrasi pada *proving ring* dalam satuan lbs atau kg dan disesuaikan dengan faktor koreksi berdasarkan ketebalan benda uji setelah proses pemadatan (Ramadhan et al., 2024). Berikut ini merupakan contoh perhitungan stabilitas pada benda uji 1 dengan kadar aspal 6% pada kadar abu ampas tebu 4%.

$$\begin{aligned}
 \text{Stabilitas} &= \text{Bacaan dial} \times \text{angka kalibrasi } \textit{marshall} \\
 &= 121 \times 10,91 \\
 &= 1320,11 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Dari semua pengujian stabilitas, semua benda uji memenuhi syarat Bina Marga yang mensyaratkan stabilitas >1000 kg.



Gambar 5.20 Grafik perbandingan kadar aspal vs stabilitas

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.20 Grafik perbandingan kadar aspal vs stabilitas. Dilihat dari kadar aspal yang digunakan, nilai stabilitas meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. nilai stabilitas relatif berdekatan antara semua benda variasi kadar. Didapatkan hasil nilai stabilitas pada semua kadar aspal dan kadar abu ampas tebu yang digunakan menghasilkan nilai stabilitas yang sesuai standar Spesifikasi Bina Marga 2024, yaitu lebih dari 1000 kg.

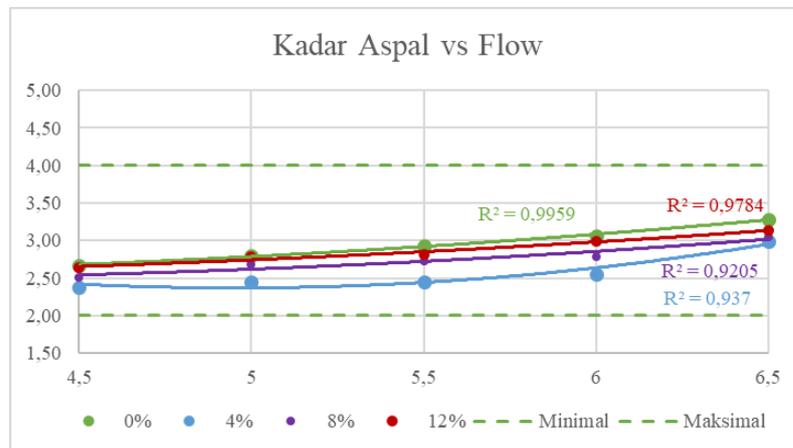
Nilai stabilitas pada kadar abu ampas tebu 4% mengalami peningkatan dari benda uji pada kadar abu ampas tebu 0%. Didapat nilai stabilitas tertinggi sebesar 1283,74 kg, ada saat kadar abu ampas tebu 4% dan kadar aspal 6%. Sedangkan pada kadar abu ampas tebu 8% dan 12% mengalami penurunan dari benda uji pada kadar abu ampas tebu 4%. Penambahan abu ampas tebu pada campuran menyebabkan peningkatan nilai stabilitas. Peningkatan ini terjadi karena abu ampas tebu mengandung sifat khusus yaitu senyawa kimia pozzolan atau silika (SiO_2) membuat agregat saling mengunci lebih baik (*interlocking*) dan campuran semakin kaku (Suciati et al., 2024).

Jika dibandingkan dengan penelitian (Setiobudi & Tamara, 2020) yang menggunakan *filler* abu ampas tebu dan aspal pen 60/70, pada kadar aspal optimum 5,7% nilai stabilitas mengalami kenaikan dan optimal pada kadar abu ampas tebu 1% sebesar 1202,4 Kg, nilai ini memenuhi Spesifikasi Umum 2010 Revisi 3 Dinas PU Bina Marga. Penggunaan aspal PG70 memiliki campuran yang lebih baik

berbeda dengan aspal penetrasi 60/70, aspal PG 70 mampu meningkatkan karakteristik Marshall. Hal ini disebabkan oleh sifat PG 70 memiliki viskositas rendah, sensitivitas suhu rendah, titik lembek tinggi, serta nilai penetrasi dan daktilitas yang mendukung performa campuran aspal (Widhiatmoko & Hadi, 2024).

5.4.5 Analisa *Flow*

Flow adalah besarnya penurunan pada campuran benda uji akibat pembebanan hingga mencapai titik runtuh, dinyatakan dalam satuan (mm). (Bitu et al., 2024). Nilai ini didapat dari *dial flow* pada alat *Marshall* yang digunakan. Berikut adalah nilai *flow* yang didapat dari pengujian :



Gambar 5.21 Grafik perbandingan kadar aspal vs *flow*

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.21 Grafik perbandingan kadar aspal vs *flow* diatas, ditinjau dari penambahan kadar aspal, campuran menghasilkan nilai *flow* yang terus bertambah. Pernyataan ini menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan lebih baik terhadap deformasi saat menerima beban kendaraan lalu lintas.

Ditinjau dari segi penambahan abu ampas tebu, nilai *flow* kerap menurun. Seperti pada kadar aspal 4,5%, terjadi penurunan seiring dengan bertambahnya abu ampas tebu. Pada saat abu ampas tebu 0% didapat nilai *flow* 2,67 mm, pada kadar abu ampas tebu 4% didapat nilai *flow* 2,38 mm, pada kadar abu ampas tebu 8% didapat nilai *flow* 2,51 mm, dan pada kadar abu ampas tebu 12% didapat nilai *flow* 2,64 mm. Hal ini disebabkan karena berat jenis abu ampas tebu lebih rendah dibandingkan *filler* abu batu, volumenya lebih besar untuk massa yang sama. Hal

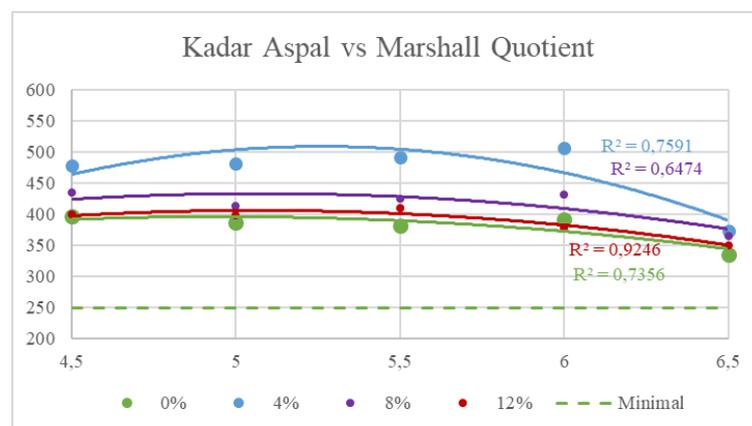
ini membuat abu tersebut tidak mengisi rongga secara padat, melainkan memperkuat struktur kasar yang membatasi deformasi saat diberi beban. Akibatnya, campuran menjadi lebih tahan terhadap perubahan bentuk, dan menurunkan nilai *flow* (Hidayat & Kushari, 2018). Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai *flow* sebesar 0,9205 – 0,9959 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai *flow* memiliki korelasi sangat kuat.

5.3.6 Analisa *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ), yang merupakan rasio antara stabilitas dengan kelelehan, digunakan sebagai tingkat kekakuan dari spesimen uji. Nilai MQ yang tinggi menandakan campuran aspal memiliki sifat kaku, menunjukkan kepadatan yang baik serta stabilitas yang tinggi. Sebaliknya, nilai MQ yang rendah mengindikasikan campuran aspal lebih lunak dan kurang stabil, sehingga berisiko mengalami retak pada permukaan serta pergeseran horizontal searah dengan arah lalu lintas (Irianto, 2021). Berikut ini merupakan contoh perhitungan MQ pada benda uji 1 dengan kadar aspal 6% dan kadar abu ampas tebu 4%.

$$\begin{aligned}
 \text{Marshall Quotient} &= \frac{\text{Stabilitas}}{\text{flow}} \\
 &= \frac{1320,11}{2,39} \\
 &= 552,35 \text{ kg/mm}
 \end{aligned}$$

Semua pengujian MQ (*Marshall Quotient*) memenuhi syarat Bina Marga yang mensyaratkan MQ sebesar >250 kg/mm.



Gambar 5.22 Grafik perbandingan kadar aspal vs *marshall quotient*

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.55, nilai MQ cenderung meningkat seiring penambahan abu ampas tebu jika dibandingkan dengan benda uji dengan kadar abu ampas tebu 0%. Namun jika ditinjau dari penambahan kadar aspal nilai MQ cenderung menurun. Meningkatnya nilai MQ menandakan bahwa campuran aspal memiliki kekakuan dan ketahanan deformasi yang lebih baik. Artinya, campuran mampu menahan beban lalu lintas dengan deformasi yang kecil karena kombinasi antara stabilitas yang tinggi dan *flow* yang rendah. Nilai MQ menunjukkan pola yang serupa dengan nilai stabilitas, dengan titik optimum pada kadar AAT 4%. Peningkatan kadar AAT menyebabkan penurunan kekakuan campuran, sebab itu campuran menjadi lebih fleksibel saat menahan dan menerima beban roda lalu lintas (Hidayat & Kushari, 2018).

Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai *Marshall Qoutient* sebesar 0,6474 – 0,9193 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai *Marshall Qoutient* memiliki korelasi kuat.

5.3.7 Analisa Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Beraspal

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan untuk mengetahui jumlah kadar aspal yang paling efektif dalam memenuhi kriteria parameter *Marshall*. Tujuannya adalah memperoleh campuran aspal yang ideal dengan performa terbaik. KAO ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam membandingkan campuran dengan variasi persentase abu ampas tebu, agar dapat diketahui campuran mana yang memberikan hasil paling optimal. Penggunaan kadar aspal optimum saat perbandingan campuran, guna mendapat nilai tertinggi dari masing-masing persentase abu ampas tebu pada campuran. Di bawah ini ditampilkan diagram batang (*barchart*) yang menunjukkan nilai KAO untuk masing-masing campuran.

Tabel 5.17 Penentuan KAO campuran beraspal dengan abu ampas tebu 0%

AAT 0%	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
VIM					↓	3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA					↓	Min 65%
Stabilitas						Min 1000 kg
<i>Flow</i>						2mm - 4mm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Tabel 5.18 Penentuan KAO campuran beraspal dengan abu ampas tebu 4%

AAT 4%	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 1000 kg
Flow						2mm - 4mm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Tabel 5.19 Penentuan KAO campuran beraspal dengan abu ampas tebu 8%

AAT 8%	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 1000 kg
Flow						2mm - 4mm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Tabel 5.20 Penentuan KAO campuran beraspal dengan abu ampas tebu 12%

AAT 12%	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 1000 kg
Flow						2mm - 4mm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Berdasarkan pada Tabel 5.17 hingga dengan Tabel 5.20 didapatkan nilai KAO kadar abu ampas tebu 0% sebesar 6,5%, KAO kadar abu ampas tebu 4% sebesar 6,25%. dan KAO pada kadar abu ampas tebu 8% dan 12% sebesar 6,5%. Dilihat dari hasil KAO yang didapatkan, nilai KAO berkurang pada kadar abu 4% dan kembali meningkat pada kadar abu ampas tebu 8% dan 12%. Hal ini disebabkan karena pada kadar 4%, abu ampas tebu masih berfungsi secara efisien sebagai *filler* yaitu mengisi rongga antar agregat dengan baik tanpa menyerap terlalu banyak aspal. Karena itu, jumlah aspal yang dibutuhkan untuk mencapai parameter *Marshall* (stabilitas, *flow*, VIM, VFA, dan VMA) menjadi lebih sedikit, sehingga nilai KAO turun menjadi 6,25%. Namun, saat kadar abu meningkat ke 8% dan 12%,

karakteristik abu ampas tebu yang ringan, berpori, dan menyerap aspal mulai berdampak lebih besar. *Filler* tidak lagi hanya mengisi rongga, tapi juga mengganggu kepadatan agregat dan menyerap sebagian aspal, sehingga aspal efektif berkurang. Untuk mengimbangi hal ini dan tetap memenuhi parameter *Marshall*, diperlukan kadar aspal yang lebih tinggi untuk menjaga performa campuran, sehingga nilai KAO kembali naik ke 6,5%.

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (Wardana, 2019) dengan gradasi campuran yang sama AC-WC menggunakan aspal pen 60/70 dengan *filler* abu ampas tebu. Hasil penelitian tersebut telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2010 Revisi 2 dan didapat nilai kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6,3%. Adapun penelitian yang dilakukan oleh (Kristanti et al., 2024) dengan gradasi campuran yang sama AC-WC menggunakan aspal pen 60/70 dengan *filler* yang sama yaitu abu ampas tebu sebesar 4%. Hasil penelitian tersebut telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 dan didapat nilai kadar aspal optimum (KAO) sebesar 7,3%.

Hasil penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Widhiatmoko & Hadi, 2024) dengan gradasi campuran AC-WC dan menggunakan aspal polimer PG 70 dengan bahan campuran serbuk ban karet. Hasil penelitian tersebut telah memenuhi spesifikasi dan didapat nilai kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,8%.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan peneliti terdahulu, dapat disimpulkan bahwa nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) merupakan parameter penting dalam perencanaan campuran aspal. Namun, besarnya nilai KAO ini bervariasi tergantung pada jenis campuran, jenis aspal, jenis agregat, dan jenis campuran pada aspal yang digunakan. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu didapat nilai KAO pada campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) yaitu rentang 5,5-7,5%.

5.5 Pengujian Karakteristik Campuran Beraspal dengan Abu Ampas Tebu Pada Kondisi KAO

Pengujian tahap kedua yaitu pengujian karakteristik *Marshall* pada kadar aspal optimum (KAO). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari abu ampas tebu yang digunakan. Hasil dari pengujian ini akan menjadi acuan dalam

mengevaluasi potensi penggunaan abu ampas tebu sebagai *filler* dalam campuran aspal.

Tabel 5.21 Rekapitulasi hasil pengujian *marshall* dengan kadar aspal optimum

Karakteristik <i>Marshall</i>	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Abu Ampas Tebu (%)	Hasil	Spesifikasi
VIM	6,5	0,00	4,35	3 % - 5 %
	6,25	4,00	4,34	
	6,5	8,00	4,71	
	6,5	12,00	4,79	
VMA	6,5	0,00	15,61	Min 15 %
	6,25	4,00	15,06	
	6,5	8,00	15,93	
	6,5	12,00	16,00	
VFA	6,5	0,00	72,14	Min 65 %
	6,25	4,00	71,22	
	6,5	8,00	70,44	
	6,5	12,00	70,08	
Stabilitas	6,5	0,00	1283,74	Min 1000 kg
	6,25	4,00	1298,29	
	6,5	8,00	1163,73	
	6,5	12,00	1141,91	
<i>Flow</i>	6,5	0,00	2,97	2 mm - 4 mm
	6,25	4,00	2,66	
	6,5	8,00	2,68	
	6,5	12,00	3,06	
MQ	6,5	0,00	438,06	Min 250 kg/mm
	6,25	4,00	489,86	
	6,5	8,00	436,24	
	6,5	12,00	374,78	

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Setelah dilakukan serangkaian pengujian, informasi yang diperoleh mengarah pada kesimpulan bahwa seiring penambahan abu ampas tebu dalam campuran aspal nilai VIM meningkat. Begitupula nilai VMA semakin bertambah seiring pertambahan abu ampas tebu pada campuran. Nilai VFA sangat dipengaruhi dari nilai VIM dan VMA karena VFA adalah persentase selisih antara nilai VIM dan VMA. Seperti pada hasil yang didapat pada kadar aspal 6,5% dengan kadar abu ampas tebu 0%

didapat nilai VIM sebesar 4,35% dan nilai VMA sebesar 15,61%. Dari kedua hasil nilai tersebut maka akan menghasilkan nilai VFA yaitu sebesar 72,14%.

Ditinjau dari nilai stabilitas yang didapat dari tabel di atas, terjadi kenaikan dan penurunan. Kenaikan terjadi pada saat penambahan kadar abu ampas tebu sebanyak 4%. Berdasarkan tabel di atas, nilai stabilitas yang didapat saat penambahan abu ampas tebu 4% sebesar 1298,29 kg, sedangkan tanpa penambahan abu ampas tebu nilai stabilitas yang didapat adalah sebesar 1283,74 kg. Bila dibandingkan dengan campuran dengan kadar abu ampas tebu 0% terjadi kenaikan sebesar 14,55 kg atau setara dengan kenaikan 1,2% nilai stabilitas. Namun terjadi penurunan pada saat penambahan abu ampas tebu sebanyak 8%, didapat nilai stabilitas sebesar 1163,73 kg. Jika dibandingkan dengan kadar abu ampas tebu 0%, terjadi penurunan sebesar 120,01 kg atau setara dengan 9,3% nilai stabilitas. Berdasarkan hasil penelitian ini, abu ampas tebu yang optimal untuk digunakan sebagai *filler* adalah 4% karena kadar ini memenuhi syarat Bina Marga dan meningkatkan nilai stabilitas pada campuran.

Ditinjau dari nilai *flow* penurunan yang terjadi pada hasil tabel diatas, terjadi penurunan nilai *flow* pada kadar abu ampas tebu 4%. Hasil yang didapatkan dari campuran tersebut adalah sebesar 2,66 mm, sedangkan pada campuran tanpa abu ampas tebu didapat nilai penurunan sebesar 2,97 mm. Hal ini disebabkan oleh kandungan silika (SiO_2) pada abu ampas tebu membuat campuran semakin kaku (Suciati et al., 2024). Namun dari semua campuran dengan variasi kadar abu ampas tebu dan kadar aspal, semua memenuhi ketentuan yang disyaratkan oleh Bina Marga tahun 2024 yang mensyaratkan nilai penurunan sebesar 2-4 mm.

5.6 Proporsi Optimum

Berdasarkan hasil penelitian, proporsi yang paling ideal untuk penambahan abu ampas tebu pada campuran beraspal lapisan aus adalah penambahan abu ampas tebu sebanyak 4%, dikarenakan kadar tersebut memenuhi ketentuan Bina Marga dalam hal karakteristik *Marshall* (VIM, VMA, VFA, Stabilitas dan *flow*) dan memiliki nilai stabilitas tertinggi. Berikut ini adalah rekapitulasi hasil pengujian *Marshall* dengan penambahan abu ampas tebu sebanyak 4% dengan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6,25%.

Tabel 5.22 Rekapitulasi hasil Campuran dengan Kadar Abu Ampas Tebu 4%

Karakteristik <i>Marshall</i>	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Abu Ampas Tebu (%)	Hasil	Spesifikasi
VIM (%)	6,25	4	4,34	3 % - 5 %
VMA (%)			15,06	≤ 15 %
VFA (%)			71,22	≥ 65 %
Stabilitas (kg)			1298,29	≥ 1000 kg
<i>Flow</i> (mm)			2,66	2 mm - 4 mm
MQ (kg/mm)			489,86	≥ 250 kg/mm

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

5.7 Keunggulan dan Kekurangan Abu Ampas Tebu Sebagai *Filler* Dalam Campuran AC–WC Menggunakan Aspal PG-70

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan didapatkan beberapa keunggulan dan kekurangan dari penggunaan abu ampas tebu sebagai *filler* dalam campuran AC WC. Berikut merupakan keunggulan dan kekurangan *filler* abu ampas tebu dalam campuran beraspal.

Tabel 5.23 Keunggulan dan kekurangan *filler* abu ampas tebu

No.	Keunggulan	Kekurangan
1.	Mengandung senyawa pozzolan atau silika (SiO ₂) yang meningkatkan efek <i>interlocking</i> antar agregat, sehingga campuran menjadi lebih kaku dan stabil.	Bentuk partikel yang tidak beraturan, berpori, dan ringan menyebabkan efisiensi pengisian rongga antar agregat lebih rendah dibandingkan <i>filler</i> abu batu.
2.	Berat jenis material abu ampas tebu lebih rendah dibandingkan <i>filler</i> abu batu, sehingga untuk massa yang sama, volumenya menjadi lebih besar. Kondisi ini menyebabkan abu tidak mampu mengisi rongga antar agregat secara padat, namun justru memperkuat struktur kasar campuran. Akibatnya, campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi dan menghasilkan nilai <i>flow</i> yang lebih rendah.	Rendahnya berat jenis abu ampas tebu dibandingkan abu batu yang menyebabkan volume rongga meningkat.

(Sumber : Analisis penulis, 2025)

Pengaruh dari penambahan abu ampas tebu sebagai *filler* terhadap karakteristik dalam penelitian ini yaitu, pada nilai VIM dan VMA, *filler* abu ampas tebu dapat meningkatkan nilai VIM dan VMA. Pada nilai VFA, *filler* abu ampas tebu menurunkan nilai VFA. Pada Stabilitas, *filler* abu ampas tebu cenderung menaikkan nilai Stabilitas. Pada *flow*, *filler* abu ampas tebu cenderung menurunkan nilai *flow*. Pada nilai MQ, *filler* abu ampas tebu mengalami peningkatan.

Abu ampas tebu merupakan limbah organik dari industri gula yang memiliki potensi berkelanjutan sebagai bahan tambahan dalam campuran beraspal karena mengandung silika tinggi membuat agregat saling mengunci lebih baik (*interlocking*) dan campuran semakin kaku (Suciati et al., 2024). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu ampas tebu dapat meningkatkan stabilitas *Marshall* secara signifikan lebih tinggi dibandingkan campuran tanpa *filler* (Suciati et al., 2024).

Kenaikan stabilitas campuran pada kadar AAT 4% dapat dikaitkan dengan kemampuan *filler* AAT dalam menyerap aspal, yang berkontribusi terhadap peningkatan kohesi dan densitas campuran. Hal ini memperbesar area kontak antar agregat dan memperkuat mekanisme saling mengunci (*interlocking*). Sebaliknya, ketika kadar AAT melebihi batas optimum, stabilitas mulai menurun akibat ukuran partikel yang sangat halus mudah menyatu dengan aspal, membentuk mastik dengan viskositas rendah. Akumulasi mastik yang berlebihan menyebabkan lemahnya ikatan antar agregat, sehingga berdampak pada penurunan stabilitas keseluruhan (Hidayat & Kushari, 2018).

Selain itu, penggunaan abu ampas tebu pada campuran dengan aspal modifikasi PG-70 menghasilkan campuran beraspal yang lebih baik, dimana aspal PG-70 jika dibandingkan dengan aspal penetrasi memiliki nilai stabilitas lebih tinggi, ini mengindikasikan aspal PG 70 lebih diperuntukan untuk lalu lintas yang berat. Aspal PG 70 memiliki angka titik lembek lebih tinggi jika dibanding aspal penetrasi. Ini berarti aspal PG 70 lebih kuat dalam menghadapi cuaca ekstrim seperti di Indonesia dibandingkan dengan aspal penetrasi yang memiliki titik lembek lebih rendah.

Salah satu kelemahan dari aspal PG-70 adalah tingkat penggunaannya yang masih terbatas, karena proses pengolahannya relatif kompleks dan memerlukan bahan tambahan seperti batu kapur (*limestone*). Sebaliknya, aspal penetrasi lebih mudah diakses dan tersedia luas, mengingat produksinya dilakukan oleh PT Pertamina yang merupakan perusahaan minyak terbesar di Indonesia (Wibisono & Yuantika, 2024).

5.8 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini dilakukan perbandingan hasil penelitian terhadap penelitian sebelumnya yang membahas parameter *Marshall* seperti VIM, VMA, VFA, stabilitas, *flow*, dan *marshall quotient*. Tujuannya adalah untuk melihat apakah penggunaan abu ampas tebu sebagai *filler* menggunakan aspal PG-70 memberikan pengaruh yang sejalan atau berbeda dengan penelitian terdahulu. Hasil perbandingan ini membantu memperjelas posisi temuan dalam konteks pengembangan campuran aspal yang lebih optimal. Berikut merupakan tabel perbandingan hasil penelitian terhadap penelitian terdahulu, dimana pada penelitian (Kristanti et al., 2024) digunakan kadar abu ampas tebu 4% dan aspal pen 60/70.

Tabel 5.24 Perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu

Parameter <i>marshall</i>	(Kristanti et al., 2024)	Aisyah Nabilah Hanif (2025)	Keterangan
VIM (%)	6,14	4,34	Penggunaan aspal PG 70 menghasilkan VIM lebih rendah karena lebih kaku dan mampu mengisi rongga dengan lebih stabil dibandingkan aspal pen 60/70.
VMA (%)	19,21	15,06	Penggunaan aspal PG 70 menghasilkan VMA yang lebih rendah karena memiliki viskositas tinggi sehingga lebih resisten terhadap deformasi plastis, dibandingkan aspal pen 60/70.
VFA (%)	68,21	71,22	Penggunaan aspal PG 70 menghasilkan VFA lebih tinggi karena mampu

Parameter <i>marshall</i>	(Kristanti et al., 2024)	Aisyah Nabilah Hanif (2025)	Keterangan
			menahan posisi di antara agregat.
Stabilitas (kg)	971,87	1298,29	Penggunaan aspal PG 70 memberikan stabilitas lebih tinggi karena strukturnya lebih kaku dan tahan suhu tinggi.
<i>Flow</i> (mm)	2,76	2,66	Aspal Pen 60/70 menghasilkan <i>flow</i> yang sedikit lebih besar karena lebih fleksibel. PG 70 menekan <i>flow</i> ke nilai yang lebih optimal karena lebih resisten deformasi.
MQ (kg/mm)	451,35	489,86	Penggunaan PG 70 menghasilkan MQ yang lebih tinggi karena kombinasi stabilitas kuat dan <i>flow</i> yang ideal. Aspal pen 60/70 nilai MQ lebih rendah karena <i>flow</i> relatif tinggi dan stabilitas sedikit turun.

(Sumber : Analisis penulis, 2025)