

BAB 5

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Material

Penelitian dilakukan di laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa berupa pemeriksaan agregat, *filler* dan aspal dengan menggunakan alat-alat laboratorium yang sesuai dengan masing-masing jenis pengujian.

5.1.1 Analisis Karakteristik Agregat

Agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat kasar, agregat halus dan abu batu. Pengujian agregat yang dilakukan meliputi berat jenis dan penyerapan agregat, dan keausan agregat (*los angeles*). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.1, Tabel 5.2 dan Tabel 5.3.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Pengujian		I	II	III	Rata-rata
Berat Jenis Agregat Kasar	<i>Bulk</i>	2,61	2,50	2,58	2,57
	<i>SSD</i>	2,66	2,55	2,64	2,62
	(<i>Apparent</i>) Semu	2,77	2,63	2,73	2,71
	Penyerapan	2,21	1,89	2,06	2,06

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

a. Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar

Pengujian berat jenis agregat kasar dengan standar uji SNI 1969:2016 dilakukan sebanyak 3 kali agar dapat mewakili nilai yang didapatkan. Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 5.1, agregat kasar sudah memenuhi spesifikasi berat jenis yang disyaratkan, yaitu min. 2,5 gr/cm³. Berat jenis yang terlalu kecil akan membuat rongga dalam campuran membesar yang berpengaruh pada nilai VIM.

b. Pengujian Penyerapan Agregat Kasar

Pengujian penyerapan agregat kasar dengan standar uji SNI 1969:2016 dilakukan sebanyak 3 kali. Pada Tabel 5.1 ditunjukkan bahwa hasil nilai penyerapan sebesar 2,06% yang dimana sudah sesuai spesifikasi yaitu max. 3%.

Jika agregat memiliki nilai penyerapan yang besar, hal ini akan menyebabkan aspal yang digunakan dalam campuran harus lebih banyak.



Gambar 5.1 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

c. Pengujian Keausan Agregat Kasar

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Keausan Agregat Kasar

LAA Agregat Alam				
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah		
Saringan		Hasil Pengujian		
Lewat	Tertahan	Berat sebelum, a (g)		
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	2500	2500	2500
$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	2500	2500	2500
Jumlah berat		5000	5000	5000
Berat sesudah, b (g)		3977,5	3568	3867
a-b		1022,5	1432	1133
LAA Agregat Alam				
Keausan (%)		20,45	28,64	22,66
Keausan rata-rata (%)		23,92		

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pengujian keausan agregat kasar dengan standar uji SNI 2417:2008 dilakukan sebanyak 3 kali menggunakan Mesin *Los Angeles*, bertujuan untuk mengetahui daya tahan agregat kasar dalam proses pembuatan jalan, penimbunan, penghamparan dan pemadatan. Pada Tabel 5.2 ditunjukkan bahwa hasil nilai keausan agregat sebesar 23,92 % dan sudah memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu maksimal 40% .



Gambar 5.2 Pengujian Keausan Agregat Kasar
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Pengujian		I	II	III	Rata-rata
Berat Jenis dan Penyerapan Agregat	<i>Bulk</i>	2,61	2,58	2,54	2,58
	<i>SSD</i>	2,68	2,67	2,64	2,66
	(<i>Apparent</i>) Semu	2,81	2,83	2,82	2,82
	Penyerapan	2,77	3,52	3,38	3,38

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

a. Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

Pengujian berat jenis agregat halus dengan standar uji SNI 1969:2016 dilakukan sebanyak 3 kali. Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 5.3, agregat halus sudah memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal $2,5 \text{ gr/cm}^3$.

b. Pengujian Penyerapan Agregat Halus

Pengujian penyerapan agregat Halus dengan standar uji SNI 1969:2016 dilakukan sebanyak 3 kali. Pada Tabel 5.3 ditunjukkan bahwa rata-rata nilai penyerapan sebesar 3,38% dan sudah sesuai dengan syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal 4.1%.



Gambar 5.3 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

5.1.2 Analisis Karakteristik Serbuk Marmer

Serbuk marmer yang digunakan pada penelitian ini merupakan limbah serbuk batu marmer yang didapatkan dari Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur. *Filler* yang digunakan yaitu haruslah lolos saringan no. 200 dan sudah diuji berat jenisnya.

Tabel 5.4 Kandungan Serbuk Marmer

Unsur Kimia	Kandungan
Kalsium Oksida, CaO	52,69 %
Kalsium Karbonat, CaCO ₃	41,92 %
Magnesium Oksida, MgO	0,84 %
Magnesium Karonat, MgCO ₃	1,76 %
Silika, SiO ₂	1,62 %
Alumunium Oksida, Al ₂ O ₃	0,37 %

(Sumber : Utomo et al, 2021)

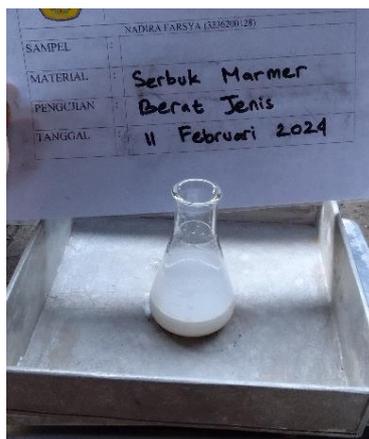
Berdasarkan (Utomo et al, 2021) diketahui bahwa serbuk marmer tersusun atas kandungan CaO sebanyak 52,69% yang sama seperti bahan dasar penyusun semen portland, sehingga marmer dapat berfungsi untuk menambah distribusi pengikatan dalam campuran beton. Menurut Ferriyal (2005), limbah serbuk marmer yang selain berfungsi untuk menambah distribusi pengikatan, juga sebagai bahan pengisi yang cukup baik dalam mengisi rongga – rongga campuran. CaO (Kalsium Oksida) memiliki suhu leleh yang tinggi yang dapat mentolelir suhu ekstrim.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Karakterisitik serbuk Marmer

Keterangan	I	II	III	Rata-Rata	
Berat Piknometer (W1)	72,5	72,5	72,5	72,5	Gram
Berat Piknometer + air (25 ⁰ C) (W2)	219	219,5	219	219,166	Gram
Berat Piknometer + benda uji (W3)	97	98	97,5	97,5	Gram
Berat Piknometer + benda uji + air (W4)	234,5	235	235	234,833	Gram
Berat jenis Serbuk Marmer	2,722	2,55	2,777	2,678	gram/ml

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pengujian berat jenis serbuk marmer dilakukan menggunakan serbuk marmer yang sudah lolos saringan no. 200 berdasarkan SNI 1970-2016. Berdasarkan Tabel 5.5 diketahui bahwa nilai berat jenis filler serbuk marmer sebesar 2,67.



Gambar 5.4 Pengujian Berat Jenis Serbuk Marmer
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

5.1.3 Analisis Karakteristik Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70. Pengujian aspal yang dilakukan meliputi penetrasi, titik nyala dan bakar, titik lembek, daktilitas, berat jenis, kehilangan berat dan viskositas.

a. Pengujian Penetrasi

Tabel 5.6 Pengujian Penertrasi

Penetrasi pada suhu 25 °C Beban 100 gram selama 5 detik	I	II	III
Pengamatan I	65	70	66
Pengamatan II	70	67	63
Pengamatan III	67	68	64
Pengamatan IV	66	64	68
Pengamatan V	62	63	63
Pengamatan VI	66	63	62
Rata-Rata	66	65,8	64,3
Rata-Rata	65,4		

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pemeriksaan penetrasi aspal bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal, semakin tinggi nilai penetrasi maka aspal tersebut semakin lunak dan semakin kecil nilai penetrasi maka semakin keras aspal. Nilai penetrasi aspal didapatkan dengan memasukkan jarum dengan beban 100 gram pada suhu 25°C, waktu pengujian selama 5 detik. Semakin tinggi suhu semakin rendah nilai penetrasi aspal, sehingga aspal menjadi lebih keras. Pada Tabel 5.6 diketahui

bahwa nilai hasil pengujian penetrasi yang didapatkan sebesar 65,4, sudah memenuhi ketentuan pada SNI 2456-2011 yaitu sebesar 60 – 70 dan cocok digunakan pada perkerasan jalan di Indonesia yang memiliki iklim tropis, karakteristik penetrasi yang baik akan membantu aspal dalam menyesuaikan diri dengan suhu yang lebih tinggi.



Gambar 5.5 Pengujian Penetrasi Aspal
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

b. Pengujian Berat Jenis Aspal

Tabel 5.7 Pengujian Berat Jenis

Keterangan	Hasil	Satuan
Berat piknometer (W1)	34,5	Gram
Berat piknometer + Air (W2)	135,5	Gram
Berat piknometer + Benda uji (W3)	126	Gram
Berat piknometer + benda uji + Air (W4)	142,5	Gram
BJ Aspal	1,083	Gram

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pengujian berat jenis aspal dilakukan berdasarkan SNI 2441-2011. Pada Tabel 5.7 diketahui hasil nilai berat jenis aspal sebesar 1,083 dimana sudah sesuai spesifikasi yaitu batas minimum 1, dapat disimpulkan bahwa aspal yang digunakan memiliki kandungan partikel dan minyak yang sedikit sehingga memiliki kualitas yang baik.



Gambar 5.6 Pengujian Berat Jenis Aspal
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

c. Pengujian Daktilitas

Tabel 5.8 Pengujian Daktilitas

Daktilitas Pada 25°C, 5 cm/menit	Panjang pengujian (cm)
I	100
II	120
III	105
Rata-rata	108,3

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Suhu yang lebih tinggi dapat mengurangi nilai daktilitas aspal, sehingga aspal menjadi lebih keras. Semakin tinggi nilai daktilitas aspal menandakan aspal semakin lentur, sehingga baik digunakan sebagai bahan ikat perkerasan. Pada Tabel 5.8 pengujian daktilitas yang dilakukan mendapatkan hasil sebesar 108,3 cm yang mana sudah memenuhi syarat minimal 100 cm. Hal tersebut menandakan aspal yang digunakan memiliki kelenturan yang baik.



Gambar 5.7 Pengujian Daktilitas Aspal

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

d. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Tabel 5.9 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Titik	Waktu	Suhu
Nyala	4 menit 20 detik	350 °C
Bakar	5 menit 54 detik	390 °C

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pada Tabel 5.9 diperoleh nilai titik nyala, saat api menyala di atas aspal kurang dari 5 detik, pada suhu 350 °C dalam waktu 4 menit 20 detik. Sedangkan nilai titik bakar, saat api menyala di atas aspal lebih dari 5 detik, terjadi ketika suhu

aspal 390 °C dalam waktu 5 menit 54 detik. Dari data tersebut disimpulkan bahwa aspal memiliki ketahanan yang baik terhadap resiko kebakaran karena sudah memenuhi syarat yaitu minimal 232 °C.



Gambar 5.8 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar
(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

e. Pengujian Titik Lembek

Tabel 5.10 Pengujian Titik Lembek

Titik Lembek (°C)	Titik Lembek (°C)
50	53

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pada pengujian titik lembek didapatkan hasil 50 °C.dan 53 °C. Aspal yang digunakan baik untuk campuran aspal karena sudah sesuai dengan standar SNI 2434-201 yaitu minimal 48 °C, semakin tinggi nilai titik lembek aspal menandakan bahwa aspal tidak mudah mengalami perubahan bentuk.



Gambar 5.9 Pengujian Titik Lembek
(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

f. Pengujian Kehilangan Berat

Table 5.11 Pengujian Kehilangan Berat

Keterangan	I	II	III
Berat cawan + aspal keras (g)	62	62	62
Berat cawan kosong (g)	11,5	11,5	11,5
Berat aspal keras (g)	50,5	50,5	50,5
Berat sebelum pemanasan (g)	62	62	62
Berat sesudah pemanasan (g)	61,5	61,7	61,65
Berat endapan (g)	0,5	0,3	0,35
Kehilangan berat aspal (%)	0,81%	0,48%	0,56%
Rata-Rata	0,62%		

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Pada pengujian kehilangan berat didapatkan hasil 0,062%. Hasil sudah sesuai dengan syarat yaitu maksimum 0,8%, hal itu menandakan bahwa aspal dapat bertahan terhadap suhu dan cuaca.



Gambar 5.10 Pengujian Kehilangan Berat

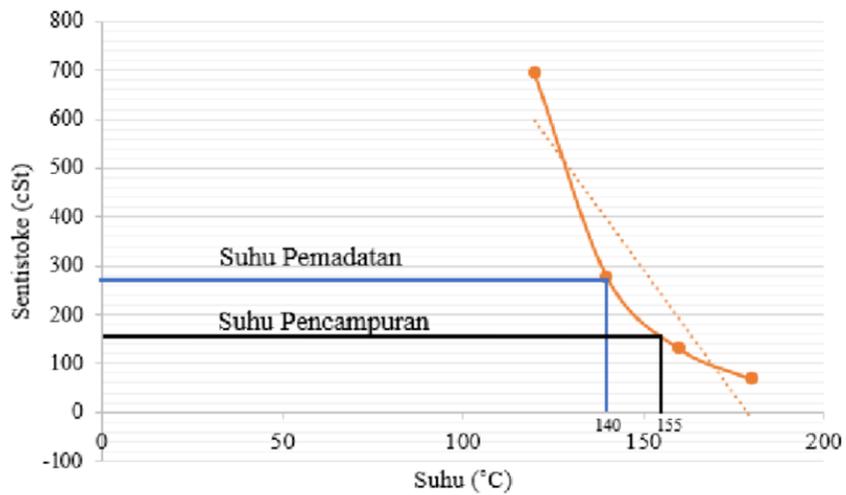
(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

g. Pengujian Viskositas

Tabel 5.12 Pengujian Viskositas

Viskositas	Suhu	Waktu	cSt
Pengamatan 1	120	328	694
Pengamatan 2	140	132	276,818
Pengamatan 3	160	63	130,333
Pengamatan 4	180	34	67,1667

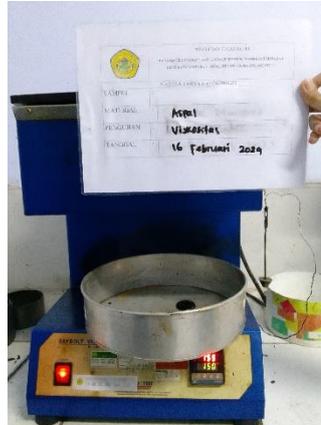
(Sumber: Analisis Penulis, 2024)



Gambar 5.11 Grafik Hasil Pengujian Viskositas

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

Berdasarkan grafik di atas pada pengujian viskositas suhu pada pencampuran diambil pada 170 cSt dan didapatkan pada suhu 155°C dan suhu pada Pemadatan diambil pada 280 cSt didapatkan pada suhu 140 °C. Hasil tersebut sudah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.



Gambar 5.12 Grafik Hasil Pengujian Viskositas

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

h. Rekapitulasi hasil pengujian karakteristik aspal yang digunakan pada penelitian.

Tabel 5.13 Rekapitulasi Pengujian Karakteristik Aspal

No	Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi		Metode Pengujian
			Min.	Maks.	
1	Penetrasi	65,4	60	70	SNI 2456-2011
2	Berat Jenis Aspal	1,083	1 gr	-	SNI 2441-2011
3	Daktilitas	108 cm	100	-	SNI 2432-2011

4	Titik Nyala	350 °C	232	-	SNI 2433-2011
5	Titik Bakar	390 °C	232	-	SNI 2433-2011
6	Titik Lembek	50 °C dan 53 °C	48	-	SNI 2434-2011
7	Kehilangan Berat	0,62 %	-	0,8	SNI 2440-1991
8	Viskositas	140 - 155	-	-	SNI 7729-2011

(Sumber: Analisis Penulis, 2024)

5.2 Rencana Campuran Aspal Beton

Rencana campuran perlu dibuat untuk menentukan proporsi dari agregat dan aspal yang akan digunakan dalam campuran aspal beton. Proporsi agregat dalam campuran aspal beton yang digunakan harus memenuhi persyaratan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

5.2.1 Proporsi Agregat Campuran Aspal Beton

Menentukan gradasi yang akan digunakan. Hasil dari rencana campuran ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.13 yang ada batasan-batasan pada jenis campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dari variasi ukuran butir agregat berdasarkan nilai titik tengah dari spesifikasi yang digunakan agar mendapatkan nilai campuran yang ideal. Campuran dengan gradasi batas atas akan membuat campuran lebih padat karena gradasi atas memiliki fraksi agregat halus lebih banyak, sedangkan campuran dengan gradasi batas bawah akan membuat campuran memiliki banyak rongga dikarenakan gradasi batas bawah memiliki fraksi agregat kasar lebih banyak. Campuran dengan gradasi tengah membantu campuran untuk mencapai kepadatan optimal dan memberikan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas campuran (Indira, 2017).

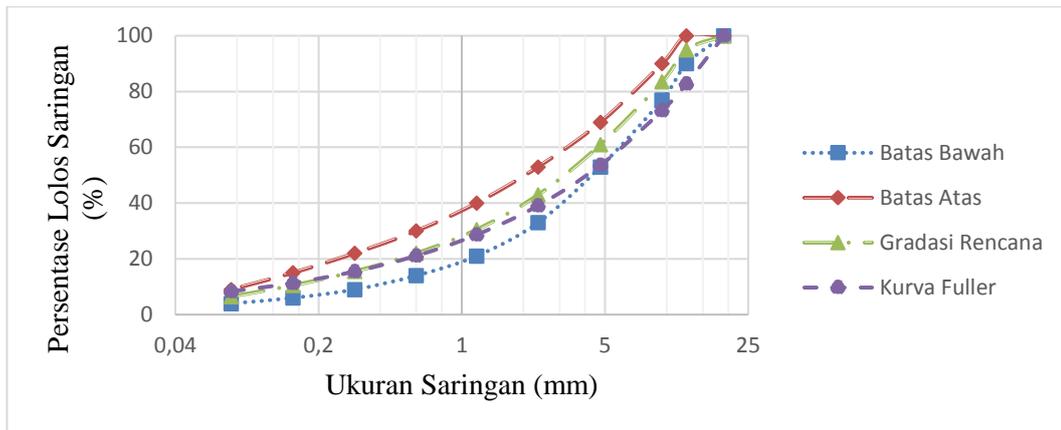
Tabel 5.14 Presentase Lolos Gradasi Campuran

Ukuran Ayakan		Batas Bawah	Batas Tengah	Batas Atas	Persentase Digunakan
3/4"	19	100	100	100	0
1/2"	12,5	90	95	100	5
3/8"	9,5	77	83,5	90	11,5
No. 4	4,75	53	61	69	22,5
No. 8	2,36	33	43	53	18
No. 16	1,18	21	30,5	40	12,5
No. 30	0,600	14	22	30	8,5
No. 50	0,300	9	15,5	22	6,5
No. 100	0,150	6	10,5	15	5

Ukuran Ayakan		Batas Bawah	Batas Tengah	Batas Atas	Persentase Digunakan
No. 200	0,075	4	6,5	9	4
Pan					6,5

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

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



Gambar 5.13 Grafik Gradasi Rencana Campuran Aspal Beton

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

5.2.2 Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar aspal optimum (KAO) merupakan kadar aspal dalam campuran yang memberikan kinerja yang optimal. KAO pada penelitian ini didapatkan dari penelitian sebelumnya (M Indra Kurniawan, 2023) berdasarkan kadar aspal yang memenuhi karakteristik *Marshall* sesuai dengan persyaratan yang terdapat pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Kadar aspal optimum akan digunakan untuk pembuatan sampel pada pengujian penuaan campuran aspal.

Pada penelitian ini digunakan *filler* serbuk marmer dengan persentase yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, yaitu 0%, 1%, 2%, dan 3%.

Serbuk Marmer	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
0%						
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 800 kg
Flow						2mm - 4mm

Gambar 5.14 Grafik Penentuan KAO Serbuk Marmer 0%
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Serbuk Marmer	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
1%						
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 800 kg
Flow						2mm - 4mm

Gambar 5.15 Grafik Penentuan KAO Serbuk Marmer 1%
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Serbuk Marmer	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
2%						
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 800 kg
Flow						2mm - 4mm

Gambar 5.16 Grafik Penentuan KAO Serbuk Marmer 2%
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Serbuk Marmer	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4,50	5	5,5	6	6,5	
3%						
VIM						3% - 5%
VMA						Min 15%
VFA						Min 65%
Stabilitas						Min 800 kg
Flow						2mm - 4mm

Gambar 5.17 Grafik Penentuan KAO Serbuk Marmer 3%
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Dari gambar di atas diketahui bahwa nilai KAO yang didapatkan untuk pemakaian serbuk marmer 0% yaitu 6,25%, untuk serbuk marmer 1% yaitu 5,75%, untuk serbuk marmer 2% yaitu 5,50% dan untuk serbuk marmer 3% yaitu 5,50%. Dengan

bertambahnya kadar *filler* serbuk marmer yang digunakan membuat kadar aspal menurun. Hal tersebut disebabkan oleh kandungan CaO (*Kalsium Oksida*) pada serbuk marmer sehingga membantu ikatan agregat menjadi lebih baik.

5.2.3 Kebutuhan Berat Agregat Untuk Campuran Beraspal

Contoh perhitungan untuk kadar aspal 6,25% dengan kadar serbuk marmer 0%

Berat Total	= 1200 gram
Berat Aspal	= 6,25% x 1200 = 75 gram
Berat Total Agregat	= 1200 – 75 = 1125 gram
Berat Agregat Split	= 1125 x 16,55% = 185,625 gram
Berat Agregat Screening	= 1125 x 22,5% = 253,125 gram
Berat Agregat Halus	= 1125 x 54,5% = 613,125 gram
Berat Abu Batu	= 1125 x 6,5% = 73,125 gram

5.2.4 Pembuatan Benda Uji Campuran Beraspal Dengan Pengganti Filler Serbuk Marmer

Setelah melakukan perhitungan untuk mengetahui komposisi agregat dan kadar aspal campuran aspal beton dilakukan pembuatan benda uji campuran aspal beton lapis aus sebanyak 60 buah sesuai dengan variasi serbuk marmer yaitu 0%, 1%, 2% dan 3% dan nilai kadar aspal optimum dari penelitian sebelumnya (M. Indra Kurniawan, 2023). Pembuatan benda uji dibuat berdasarkan SNI 06-2489-1991 tentang metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall.

Pemadatan benda uji dilakukan penumbukan sebanyak 75 kali di setiap sisi. Untuk benda uji STOA penumbukan dilakukan setelah pengovenan selama 4 jam dengan suhu 135°C. Untuk benda uji LTOA benda uji ditumbuk terlebih dulu kemudian dioven selama 120 jam dengan suhu 85°C. Perbedaan suhu pada penuaan STOA dan LTOA dikarenakan pada proses STOA mensimulasikan campuran aspal pada

masa konstruksi yang membutuhkan suhu tinggi untuk mempercepat oksidasi sehingga meningkatkan kekakuan aspal. Sedangkan proses LTOA mensimulasikan campuran aspal pada masa pelayanan, suhu yang digunakan mendekati suhu yang dialami aspal pada masa pelayanan.

5.2.5 Analisis Sifat Volumetrik Campuran Beraspal

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk campuran aspal beton pada kadar aspal 6,25% dengan kadar serbuk marmer 0% pada kondisi *Short Term Oven-Aging*.

Kadar Aspal	= 6,25 %
Persentase Agregat	= 93,75 %
Bj Bulk Gabungan	= 2,577 gr/ml
Bj Apparent Gabungan	= 2,778 gr/ml
Bj Bulk Aspal	= 1,0828 gr/ml
Berat Benda Uji Kering	= 1142,5 gram
Berat Benda Uji SSD	= 1145 gram
Berat Benda Uji Dalam Air	= 657 gram

a. Menentukan Berat Jenis Efektif Agregat (Gse)

$$\begin{aligned}
 Gse &= \frac{Gsb+Gsa}{2} \\
 &= \frac{2,58 + 2,78}{2} \\
 &= 2,68 \text{ gr/ml}
 \end{aligned}$$

b. Menentukan Berat Jenis Campuran Maksimum (Gmm)

$$\begin{aligned}
 Gmm &= \frac{100}{\frac{100 - \text{Kadar Aspal}}{Gse} + \frac{\text{Kadar Aspal}}{\text{Bj Aspal}}} \\
 &= \frac{100}{\frac{100 - 6,25}{2,68} + \frac{6,25}{1,0828}} \\
 &= 2,45 \text{ gr/ml}
 \end{aligned}$$

c. Menghitung Isi Benda Uji

$$\begin{aligned}
 \text{Isi Benda Uji} &= \text{Berat Benda Uji SSD} - \text{Berat Benda Uji Dalam Air} \\
 &= 1145 - 657 \\
 &= 488 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

d. Persentase Pori Benda Uji (VIM)

$$\begin{aligned} \text{VIM} &= 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \\ &= 100 \times \frac{2,45 - 2,34}{2,45} \\ &= 4,52\% \end{aligned}$$

e. Persentase Pori Antar Butir Campuran Agregat (VMA)

$$\begin{aligned} \text{VMA} &= 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{se}} \\ &= 100 - \frac{2,34 \times 93,75}{2,68} \\ &= 18,03\% \end{aligned}$$

f. Volume Pori Terisi Aspal (VFA)

$$\begin{aligned} \text{VFA} &= 100 \times \frac{\text{VMA} - \text{VIM}}{\text{VMA}} \\ &= 100 \times \frac{18,03 - 4,52}{18,03} \\ &= 74,95\% \end{aligned}$$

g. Stabilitas

$$\begin{aligned} \text{Stabilitas} &= \text{Pembacaan Dial} \times \text{Angka Korelasi} \times \text{Kalibrasi Alat} \\ &= 80 \times 1,09 \times 10,9108 \\ &= 951,42 \text{ kg} \end{aligned}$$

h. *Marshall Quotient* (MQ)

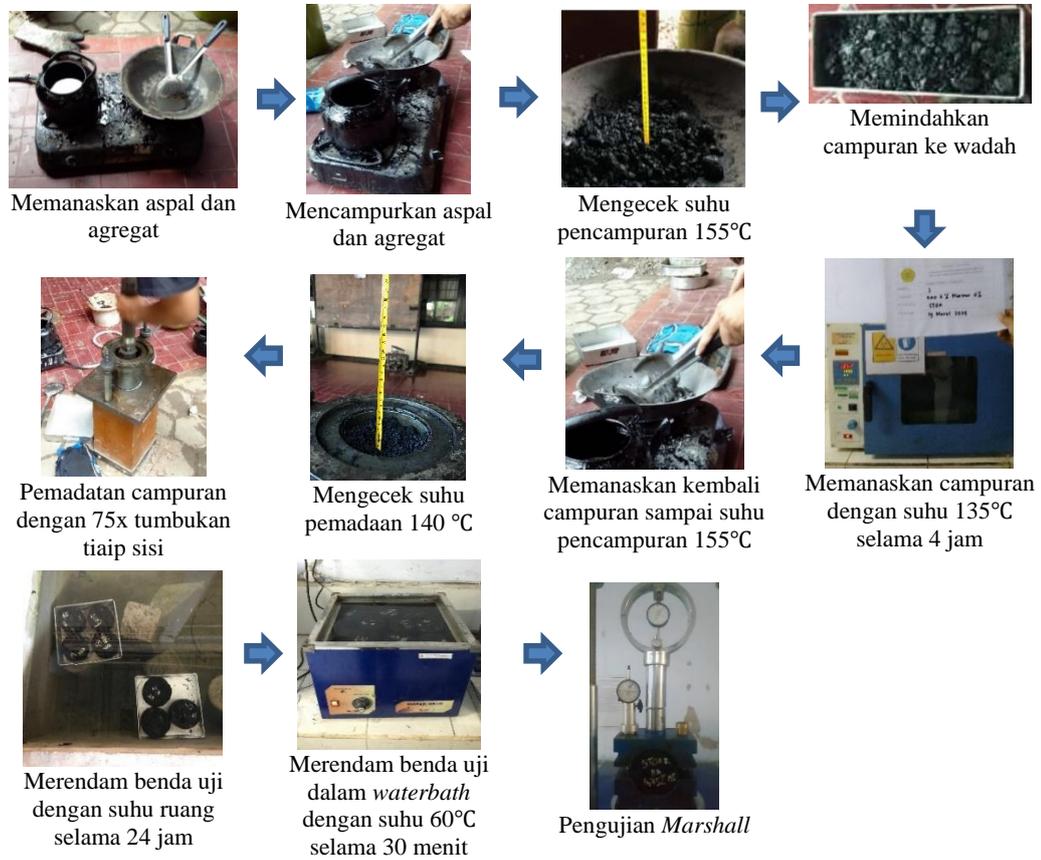
$$\begin{aligned} \text{MQ} &= \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}} \\ &= \frac{951,42}{2,40} \\ &= 396,43 \text{ kg/mm} \end{aligned}$$

5.3 Analisis Karakteristik Campuran Aspal Beton

5.3.1 Analisis Data Pengujian Terhadap Karakteristik Marshall Pada Kondisi STOA dan LTOA

Berikut ini merupakan rekapitulasi dari hasil pengujian *Marshall* dengan menggunakan Kadar Aspal Optimum (KAO) 6,25%, 5,75%, 5,50%, dan 5,50% dan

dengan pengganti *filler* serbuk marmer persentase 0%, 1%, 2%, dan 3% pada kondisi sebelum penuaan (standar), penuaan jangka pendek (STOA), dan penuaan jangka panjang (LTOA).



Gambar 5.18 Proses Pengujian Penuaan STOA
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)





Gambar 5.19 Proses Pengujian Penuaan LTOA
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024)

Tabel 5.15 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Pada Kondisi Standar STOA dan LTOA

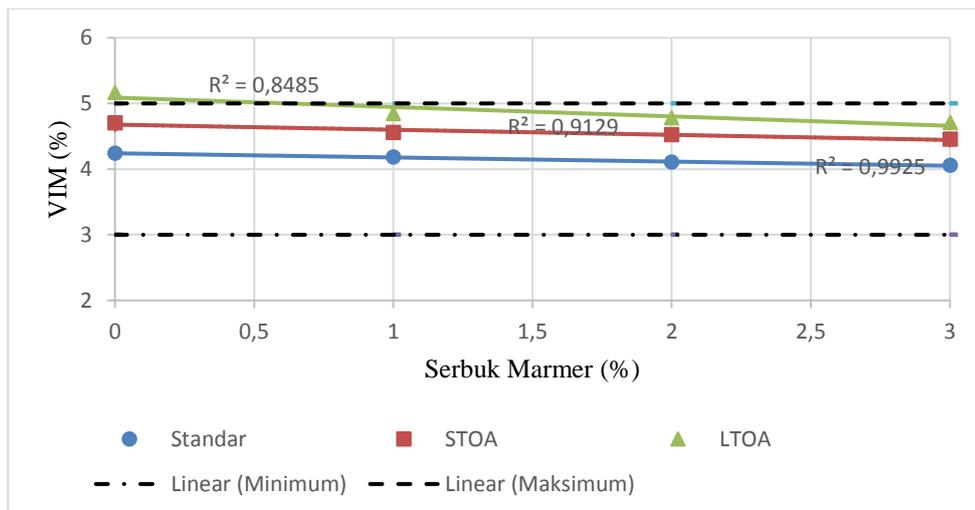
No	Data	Kadar Aspal (%)	Kadar Serbuk Marmer (%)	Standar	STOA	LTOA	Standar Bina Marga
1	VIM (%)	6,25	0	4,24	4,71	5,16	3%-5%
		5,75	1	4,18	4,56	4,85	
		5,5	2	4,10	4,52	4,78	
		5,5	3	4,05	4,46	4,71	
2	VMA (%)	6,25	0	17,78	18,19	18,59	Min. 15%
		5,75	1	16,74	17,07	17,32	
		5,5	2	16,17	16,54	16,76	
		5,5	3	16,13	16,48	16,70	
3	VFA (%)	6,25	0	76,17	74,14	72,23	Min. 65%
		5,75	1	75,01	73,31	72,03	
		5,5	2	74,62	72,67	71,49	
		5,5	3	74,86	73,00	71,81	
4	Stabilitas (kg)	6,25	0	991,06	979,17	968,10	Min. 800 kg
		5,75	1	1098,10	1074,31	1058,46	
		5,5	2	1193,24	1183,31	1173,42	
		5,5	3	1094,91	1066,31	1014,85	
5	Flow (mm)	6,25	0	2,58	2,53	2,50	2mm-4mm
		5,75	1	2,55	2,50	2,45	
		5,5	2	2,50	2,47	2,43	
		5,5	3	2,48	2,40	2,30	
6	Marshall Quantity (kg/mm)	6,25	0	383,64	386,52	387,24	> 250 kg/mm
		5,75	1	430,63	429,73	432,02	
		5,5	2	477,30	479,72	482,23	
		5,5	3	440,90	444,30	441,24	

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Tabel 5.15, hampir semua nilai karakteristik *marshall* yang didapatkan sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2. Pada karakteristik VIM kondisi LTOA dengan KAO 6,25% dan *filler* serbuk marmer 0%, nilai tidak memenuhi syarat karena melebihi 5%. Pada karakteristik VMA, semua nilai sudah memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 15%. Pada karakteristik VFA, semua nilai sudah memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 65%. Pada karakteristik stabilitas, semua nilai sudah memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 800 kg. Pada karakteristik *flow*, semua nilai sudah memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 2 mm dan tidak melebihi 4 mm. Pada karakteristik MQ, semua nilai sudah memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 250 kg/mm.

a. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai VIM

VIM (*Void In the Mix*) adalah persentase rongga udara pada total campuran aspal. Jika nilai VIM tinggi hal itu menandakan campuran aspal tersebut memiliki banyak ruang yang terisi udara atau bisa disebut campuran tersebut bersifat *porous* (berpori). Karenanya, campuran menjadi tidak rapat dan mudah teroksidasi, yang menyebabkan butir antar agregat kurang lekat dan merusak lapis perkerasan. Jika nilai VIM kecil menandakan bahwa campuran tersebut memiliki rongga udara yang lebih kecil. Terlalu kecilnya nilai VIM dapat menyebabkan aspal mengalami *bleeding* karena kekurangan rongga udara.



Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai VIM (Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Gambar 5.20 dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya persentase *filler* serbuk marmer nilai VIM mengalami penurunan, mengakibatkan lapisan menjadi kedap air dan udara tidak masuk dalam campuran sehingga dapat meningkatkan keawetan (durabilitas) campuran aspal. Hal itu disebabkan serbuk marmer memiliki berat jenis yang lebih besar dibandingkan abu batu dan juga tekstur yang sangat halus sehingga serbuk marmer mampu mengisi rongga udara dalam campuran dengan lebih baik .

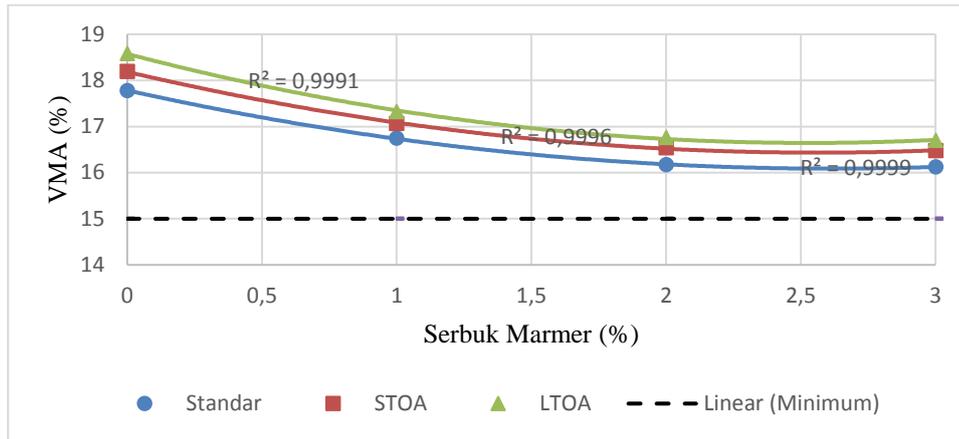
Berdasarkan Gambar 5.20 seiring bertambahnya waktu penuaan nilai VIM mengalami kenaikan sehingga menyebabkan kedekatan campuran pada air berkurang dan menurunkan durabilitas campuran aspal. Hal itu disebabkan oleh proses oksidasi yang terjadi pada aspal.

Nilai R^2 pada gambar 5.20 menunjukkan nilai koefisien determinasi yang didapatkan dari hasil analisis regresi linier untuk mengetahui pengaruh antara variabel persentase serbuk marmer dengan variabel VIM, semakin mendekati 1 serbuk marmer semakin berpengaruh terhadap VIM dan jika mendekati 0 serbuk marmer semakin tidak berpengaruh terhadap nilai VIM. Dari nilai koefisien determinasi pada kondisi standar – STOA – LTOA diketahui bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 99,42% - 91,29% - 83,16% dalam kondisi tersebut terhadap nilai VIM.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai dari VIM harus dalam rentang 3% sampai 5%. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa selain pada KAO 6,25% dan serbuk marmer 0%, nilai VIM masih memenuhi spesifikasi.

b. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai VMA

VMA (*Void in Mineral Agregat*) adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat mineral, yaitu volume rongga udara dan volume rongga yang terisi aspal. VMA digunakan untuk menunjukkan seberapa baik agregat mineral dalam menyerap aspal dan mengurangi rongga pada campuran aspal.



Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai VMA (Sumber : Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Gambar 5.21 dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya persentase *filler* serbuk marmer nilai VMA mengalami penurunan, sehingga dapat meningkatkan keawetan campuran aspal. Hal itu disebabkan serbuk marmer memiliki tekstur yang lebih halus daripada abubatu sehingga serbuk marmer mampu mengisi rongga udara dalam campuran dengan lebih baik.

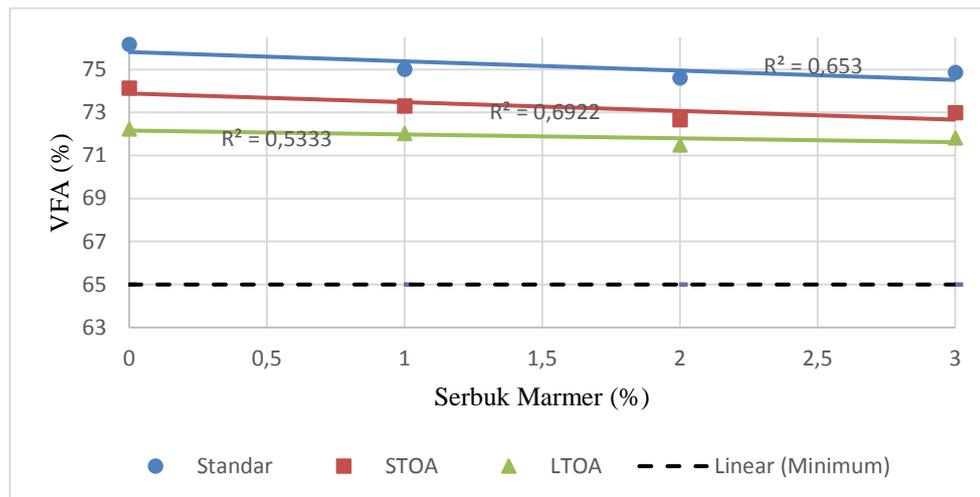
Berdasarkan Gambar 5.21 seiring bertambahnya waktu penuaan nilai VMA mengalami kenaikan, mengakibatkan campuran aspal kurang kedap terhadap air dan udara, serta mempercepat proses oksidasi dan penuaan aspal. Hal ini disebabkan oleh adanya proses oksidasi dan karena proses penuaan dapat membuat aspal menjadi keras dan getas yang dimana membuat kemampuan aspal dalam mengisi rongga antar agregat berkurang.

Nilai R^2 (koefisien determinasi) pada gambar 5.21 menunjukkan bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 100% - 99,96% - 99,88% terhadap nilai VMA pada kondisi standar – STOA – LTOA.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai dari VMA minimal 15%. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa nilai VMA yang diperoleh pada kondisi sebelum penuaan, penuaan jangka pendek dan penuaan jangka panjang dari KAO 6,25% dengan serbuk marmer 0% hingga KAO 5,50% dengan serbuk marmer 3% memenuhi spesifikasi.

c. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai VFA

VFA (*Void Filled with Asphalt*) adalah volume dari rongga campuran yang diisi oleh aspal. Semakin tinggi nilai VFA maka semakin banyak rongga yang terisi aspal dan jika nilai VFA terlalu tinggi maka akan menyebabkan *bleeding*, sedangkan jika nilai VFA terlalu kecil akan menyebabkan campuran aspal beton kurang kedap air dan udara sehingga menyebabkan campuran akan mudah retak.



Gambar 5.22 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai VFA
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Gambar 5.22 Dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya waktu penuaan nilai VFA mengalami penurunan, membuat berkurangnya fleksibilitas campuran dan kemampuan untuk menyerap deformasi akibat beban lalu lintas, keawetan campuran juga berkurang. Hal itu karena penuaan menyebabkan aspal menjadi keras sehingga aspal tidak dapat mengisi rongga secara efektif dan juga fungsi aspal sebagai bahan pengikat antar agregat melemah, sehingga kekedapan dan keawetan campuran semakin berkurang.

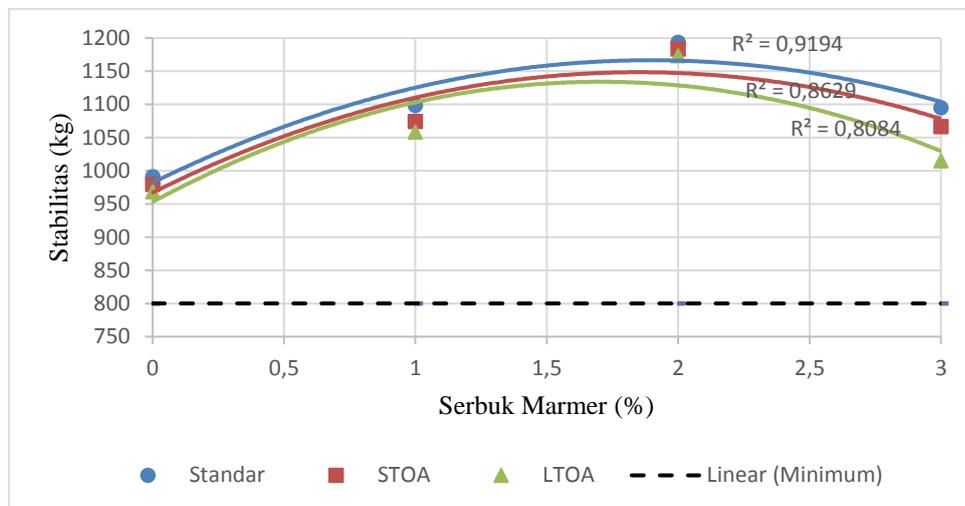
Bertambahnya serbuk marmer dengan KAO yang sama dapat menaikkan nilai VFA, mengindikasikan bahwa campuran tersebut memiliki durabilitas yang baik. Hal itu dikarenakan berat jenis *filler* serbuk marmer lebih besar dibandingkan berat jenis abu batu, sehingga banyaknya serbuk marmer yang digunakan menyebabkan rongga dalam campuran akan semakin kecil yang membuat rongga yang terisi aspal (VFA) akan semakin besar.

Dari nilai R^2 (koefisien determinasi) pada kondisi standar – STOA – LTOA diketahui bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 42,8% - 69,22% - 72,44% terhadap nilai VFA.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai dari VFA minimal 65%. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa Nilai VFA yang diperoleh pada kondisi sebelum penuaan, penuaan jangka pendek (STOA) dan penuaan jangka panjang (LTOA) dari KAO 6,25% dengan serbuk marmer 0% hingga KAO 5,50% dengan serbuk marmer 3% sudah memenuhi spesifikasi.

d. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan campuran aspal beton dalam menahan deformasi serta mempertahankan bentuk dan struktur aslinya saat mendapatkan beban lalu lintas. Stabilitas sangat penting untuk menjamin daya tahan campuran aspal beton untuk mendapatkan ketahanan yang baik terhadap tekanan dan beban yang diterima.



Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai Stabilitas

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Gambar 5.23 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas mengalami kenaikan sampai nilai optimum pada persentase serbuk marmer 2% dengan KAO 5,50% menandakan kemampuan campuran aspal dalam menahan deformasi baik. Nilai stabilitas mengalami penurunan pada persentase *filler* serbuk marmer 3% dengan KAO 5,50% dikarenakan campuran aspal

mengalami *bleeding*. Hal itu karena kandungan CaO (kalsium oksida) yang terdapat dalam serbuk marmer dapat menambah sifat saling mengunci antar agregat menjadi semakin baik sehingga dapat menaikkan stabilitas pada campuran, sehingga kemampuan campuran aspal dalam menahan deformasi menjadi lebih baik (Utomo et al, 2021).

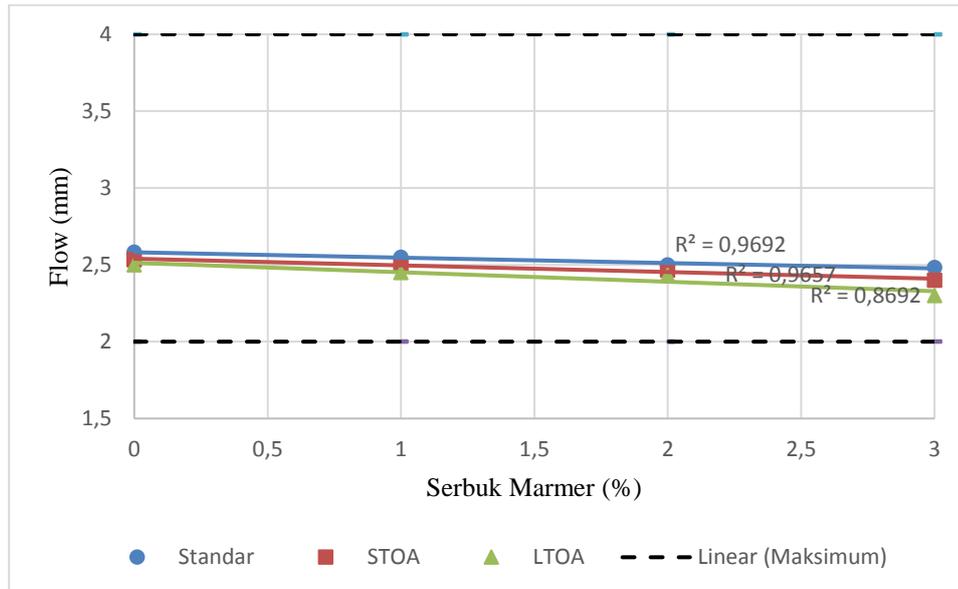
Sedangkan seiring bertambahnya waktu penuaan nilai stabilitas mengalami penurunan, yang menyebabkan daya tahan campuran aspal dalam menahan deformasi berkurang. Hal itu dikarenakan semakin lama waktu penuaan, aspal mengalami penguapan dan menjadi getas yang menyebabkan aspal pada campuran sudah tidak berguna sebagai pelumas yang kemudian membuat energi pemadatan yang diberikan pada campuran akan merusak campuran tersebut dan daya tahan campuran aspal dalam menahan beban akan berkurang.

Dari nilai R^2 (koefisien determinasi) pada kondisi standar – STOA – LTOA diketahui bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 80,84% - 86,29% - 90,27% dalam kondisi tersebut terhadap nilai stabilitas.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai dari stabilitas minimal 800 kg. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa Nilai stabilitas yang diperoleh pada kondisi sebelum penuaan, penuaan jangka pendek (STOA) dan penuaan jangka panjang (LTOA) sudah memenuhi spesifikasi. Diketahui nilai stabilitas tertinggi terdapat pada kondisi standar dengan serbuk marmer 2% dan KAO 5,50% yaitu sebesar 1193,24 kg, pada kondisi STOA dengan serbuk marmer 2% dan kadar aspal 5,50% yaitu sebesar 1183,31 kg, dan pada kondisi LTOA dengan serbuk marmer 2% dan kadar aspal 5,50% yaitu sebesar 1173,42 kg.

e. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai Flow

Flow (kelelehan) adalah deformasi yang terjadi dari awal pembebanan sampai hingga stabilitas menurun. Campuran yang memiliki nilai flow rendah dengan stabilitas yang tinggi cenderung menjadi kaku, jika yang terjadi adalah kebalikannya maka campuran menjadi mudah berubah bentuk.



Gambar 5.24 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai *Flow*
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan gambar 5.24 dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya persentase *filler* serbuk marmer nilai *flow* mengalami penurunan, hal itu menunjukkan bahwa campuran aspal menjadi lebih kaku dan rentan terhadap retakan saat menerima beban lalu lintas. Hal itu dikarenakan tekstur *filler* serbuk marmer yang sangat halus sehingga *filler* dapat mengisi rongga pada campuran aspal menjadi lebih baik sehingga meningkatkan kepadatan campuran.

Dan seiring bertambahnya waktu penuaan nilai *flow* mengalami penurunan. Karena hal tersebut, campuran aspal mengalami turunnya fleksibilitas dan kurang mampu dalam mengikuti deformasi. Hal itu disebabkan penuaan membuat perkerasan cenderung lebih kaku karena pengovenan menyebabkan penguapan pada campuran aspal sehingga daya lekat aspal pada agregat menurun.

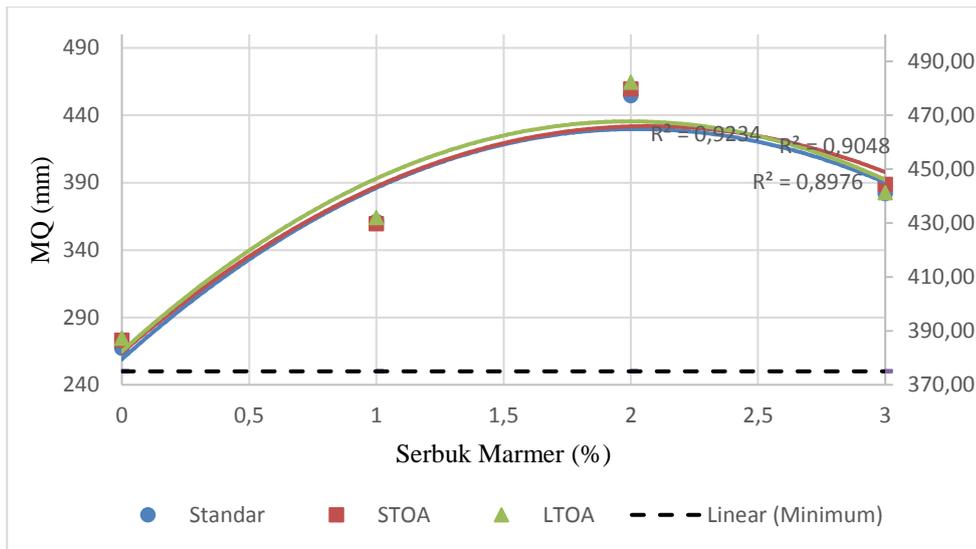
Dari nilai R^2 (koefisien determinasi) pada kondisi standar – STOA – LTOA diketahui bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 28% - 16% - 8,31% terhadap nilai *flow*.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai dari *flow* harus dalam rentang 2 mm sampai 4 mm. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa nilai *flow* yang diperoleh pada kondisi sebelum penuaan, penuaan jangka

pendek dan penuaan jangka panjang dari KAO 6,25% dengan serbuk marmer 0% hingga KAO 5,50% dengan serbuk marmer 3% memenuhi spesifikasi.

f. Pengaruh Penuaan Terhadap Nilai *Marshall Quotient*

Marshall Quotient (MQ) adalah indeks fleksibilitas campuran aspal yang didapatkan dari hasil bagi nilai stabilitas dengan nilai *flow*.



Gambar 5.25 Grafik Pengaruh Penuaan STOA dan LTOA Terhadap Nilai MQ (Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Gambar 5.25 diketahui bahwa seiring bertambahnya waktu penuaan menyebabkan nilai MQ cenderung meningkat. Hal itu disebabkan penuaan membuat perkerasan cenderung lebih kaku karena pengovenan menyebabkan penguapan pada campuran aspal sehingga daya lekat aspal pada agregat menurun. Peningkatan kekakuan ini akan meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen dan kemampuan untuk menyebarkan beban yang diterima, tetapi disisi lain akan menyebabkan campuran menjadi lebih getas dan cepat retak, sehingga semakin lama proses penuaan terjadi maka durabilitasnya akan semakin berkurang.

Penggunaan *filler* serbuk marmer dapat meningkatkan nilai MQ, hal ini menandakan campuran tersebut mampu menahan beban yang lebih besar tanpa mengalami deformasi berlebihan. Hal ini dikarenakan kandungan pada serbuk marmer yaitu CaO (kalsium oksida) dapat menambah sifat saling mengunci antar agregat menjadi semakin baik sehingga dapat menaikkan stabilitas pada

campuran, sehingga membuat campuran menjadi lebih kaku dibandingkan campuran tanpa serbuk marmer dan kemampuan campuran aspal dalam menahan deformasi menjadi lebih baik (Utomo et al, 2021).

Dari nilai R^2 (koefisien determinasi) pada kondisi standar – STOA – LTOA diketahui bahwa persentase serbuk marmer yang digunakan berpengaruh 85,53% - 81,23% - 74,81% dalam kondisi tersebut terhadap nilai MQ.

Pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 disyaratkan bahwa nilai MQ minimal 250 kg/mm. Dari tabel 5.15 diketahui bahwa nilai MQ yang diperoleh pada kondisi sebelum penuaan, penuaan jangka pendek dan penuaan jangka panjang dari KAO 6,25% dengan serbuk marmer 0% hingga KAO 5,50% dengan serbuk marmer 3% memenuhi spesifikasi.

5.3.2 Analisis Karakteristik Campuran Beraspal yang Sudah Mengalami Penuaan Terhadap *Marshall* Rendam

Marshall rendam dilakukan untuk mengetahui ketahanan campuran aspal di lapangan dalam kondisi ekstrim. Pengujiannya adalah dengan merendam benda uji pada *waterbath* selama 24 jam dengan suhu 60°C (RSNI M-01-2003). Kemudian campuran diuji *marshall* untuk mendapatkan nilai *flow* dan stabilitasnya.

Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall*

Data	Kadar Aspal (%)	Kadar Serbuk Marmer (%)	STOA		LTOA		Standar Bina Marga
			Marshall	Marshall Rendam	Marshall	Marshall Rendam	
VIM (%)	6,25	0	4,71	4,84	5,16	6,51	3% 5%
	5,75	1	4,56	4,71	4,85	6,19	
	5,5	2	4,52	4,60	4,78	6,06	
	5,5	3	4,46	4,58	4,71	5,77	
VMA (%)	6,25	0	18,19	18,30	18,59	19,74	Min. 15%
	5,75	1	17,07	17,20	17,32	18,49	
	5,5	2	16,54	16,60	16,76	17,88	
	5,5	3	16,48	16,58	16,70	17,62	
VFA (%)	6,25	0	74,14	73,61	72,23	67,02	Min. 65%
	5,75	1	73,31	72,74	72,03	66,52	
	5,5	2	72,67	72,38	71,49	66,14	
	5,5	3	73,00	72,41	71,81	67,34	

Data	Kadar Aspal (%)	Kadar Serbuk Marmer (%)	STOA		LTOA		Standar Bina Marga
			Marshall	Marshall Rendam	Marshall	Marshall Rendam	
Stabilitas (kg)	6,25	0	979,17	975,21	968,10	938,33	Min. 800 kg
	5,75	1	1074,31	1066,59	1058,46	1002,34	
	5,5	2	1183,31	1086,74	1173,42	1118,32	
	5,5	3	1066,31	1041,80	1014,85	1011,04	
Flow (mm)	6,25	0	2,53	2,55	2,50	2,52	2mm-4mm
	5,75	1	2,50	2,53	2,45	2,50	
	5,5	2	2,47	2,50	2,43	2,47	
	5,5	3	2,40	2,43	2,30	2,37	
Marshall Quantity (kg/mm)	6,25	0	386,52	382,43	387,24	372,85	> 250 kg/mm
	5,75	1	429,73	421,02	432,02	400,94	
	5,5	2	479,72	434,70	482,23	453,37	
	5,5	3	444,30	428,14	441,24	427,20	

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Dari Tabel 5.16 data yang didapatkan dari penelitian, nilai stabilitas pada campuran aspal dengan KAO 5,50% dan kadar serbuk marmer 2% pada benda uji STOA *marshall* yaitu 1183,31, lebih besar dari pada benda uji STOA *marshall* rendam, yaitu 1086,74. Dengan meningkatnya durasi perendaman pada *waterbath* menjadi 24 jam menyebabkan nilai stabilitas mengalami penurunan daripada perendaman *waterbath* dengan waktu 30 menit. Sehingga membuat campuran aspal menjadi kurang mampu menahan beban yang tinggi. Hal itu dikarenakan air yang semakin memenuhi rongga-rongga pada campuran aspal dapat merusak ikatan-ikatan antara agregat sehingga kemampuan campuran dalam menahan deformasi berkurang. Untuk mendapat stabilitas yang tinggi diperlukan agregat yang rapat, dan mempunyai rongga antar butiran agregat (VMA) yang kecil. Berkebalikan dengan nilai stabilitas yang menurun, seiring bertambahnya durasi perendaman *waterbath* nilai *flow* (kelelehan) meningkat. Hal itu dikarenakan lamanya perendaman membuat rongga-rongga campuran lebih mudah terisi air sehingga membuat campuran lebih mudah mengalami deformasi. Tingginya nilai *flow* menandakan campuran aspal bersifat plastis dan lebih mampu mengikuti deformasi akibat adanya beban, sedangkan nilai *flow* yang rendah menandakan campuran aspal bersifat kaku dan getas. Pada *marshall* rendam nilai *Marshall Quotient* (MQ) cenderung menurun daripada *marshall*. Hal ini dikarenakan pada campuran aspal

yang mengalami perendaman lebih lama akan mengakibatkan kerusakan pada campuran aspal yang disebabkan oleh rongga-rongga yang lebih mudah terisi oleh air.

5.4 Analisis Serbuk Marmer Sebagai Filler Pada Penuaan Campuran

Campuran aspal beton lapis aus dengan *filler* serbuk marmer yang mengalami penuaan jangka pendek maupun penuaan jangka panjang akan meningkatkan nilai VIM dan VMA, hal itu disebabkan oleh berkurangnya ikatan antar agregat karena aspal bersifat lebih keras dan getas sehingga menyebabkan menurunnya keawetan campuran. Namun seiring bertambahnya kadar serbuk marmer pada campuran aspal dapat menurunkan nilai VIM dikarenakan kandungan Kalsium Oksida (CaO) pada marmer yang membuat ikatan antar agregat menjadi lebih baik dan juga tekstur serbuk marmer yang lebih halus daripada abubatu sehingga dapat mengisi rongga antar agregat dengan lebih baik (Utomo et al, 2021).

Campuran aspal beton lapis aus dengan *filler* serbuk marmer membuat nilai VFA, stabilitas, dan *flow* mengalami penurunan seiring bertambahnya penuaan campuran aspal. Menurunnya nilai VFA dan *flow* disebabkan oleh aspal yang menjadi keras dan getas karena penuaan sehingga daya lekat aspal pada agregat menurun, hal itu menyebabkan kekedapan dan keawetan campuran semakin berkurang juga berkurangnya fleksibilitas campuran dan kemampuan campuran untuk berdeformasi akibat beban lalu lintas. Meningkatnya nilai stabilitas seiring bertambahnya penuaan disebabkan oleh aspal yang mengalami penguapan dan menjadi getas menyebabkan daya tahan campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas akan berkurang.

Dilihat dari nilai stabilitas pada campuran aspal semakin bertambahnya kadar *filler* serbuk marmer membuat nilai stabilitas meningkat sampai batas maksimumnya, hal itu disebabkan semakin sedikit rongga pada campuran aspal maka semakin tinggi nilai stabilitas menandakan kemampuan campuran aspal dalam menahan deformasi baik. Nilai stabilitas pada kondisi penuaan, campuran aspal dengan serbuk marmer 0% pada kondisi STOA sebesar 979,17 kg dan pada kondisi LTOA sebesar 968,10 Kg, sedangkan campuran aspal dengan serbuk marmer didapatkan lebih besar yaitu pada kondisi STOA sebesar 1074,31 kg dan pada kondisi LTOA sebesar 1058,46

Kg. Dari keterangan sebelumnya, campuran aspal dengan *filler* pengganti serbuk marmer 1%, 2% dan 3% secara tidak langsung mempengaruhi proses pengujian yang mana dapat memperlambat proses penuaan jangka pendek (STOA) dan penuaan jangka panjang (LTOA).