

BAB IV

ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Mutu Bahan

Dalam penelitian ini, bahan-bahan yang digunakan meliputi agregat kasar dan halus biasa serta aspal minyak penetrasi 60/70. Tujuan dari pemeriksaan mutu dan bahan adalah untuk memastikan bahwa bahan yang digunakan dalam campuran aspal sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga tahun 2018. Proses pengujian mutu dan bahan dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi dan Laboratorium Transportasi ITN Malang yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang.

4.2 Pengujian Agregat

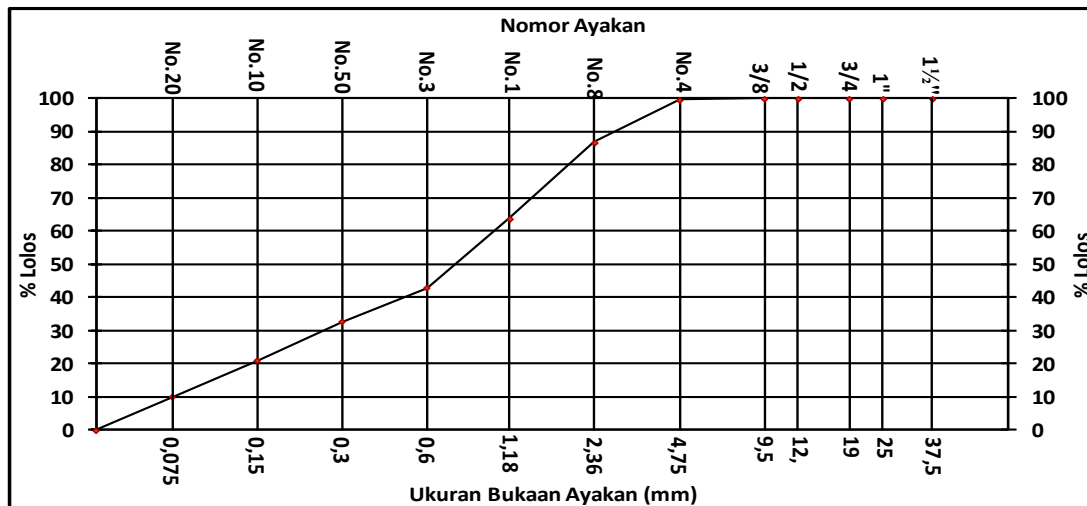
4.2.1 Pengujian Analisa Saringan Agregat (SNI ASTM C136 : 2012)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran ukuran butiran (gradasi) pada agregat halus maupun kasar melalui proses pengayakan. Dalam pengujian Analisa saringan agregat menggunakan parameter dari Ditjen Bina Marga Tahun 2018 revisi 2. Hasil uji analisa saringan akan mengelompokkan agregat ke dalam kategori kasar, sedang, dan halus, seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 0 – 5

Ukuran saringan	Berat tertahan		Kumulatif		Prosentase				Rata - Rata Prosentase Lolos
	(gram)		(gram)		tertahan		Lolos		
	I	II	I	II	I	II	I	II	
1 ½" (37,5 mm)	0	0	0	0	0	0	100,00	100,00	100,00
1" (25 mm)	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
¾" (19 mm)	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
½" (12,5 mm)	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
3/8" (9,5 mm)	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
No.4 (4,75 mm)	2,2	2,8	2,19	2,79	0,41	0,48	99,59	99,52	99,56
No.8 (2,36 mm)	63,8	78,8	65,94	81,58	12,22	14,12	87,78	85,88	86,83
No.16 (1,18 mm)	123,7	132,6	189,65	214,17	35,16	37,08	64,84	62,92	63,88
No.30 (0,6 mm)	109,6	124,7	299,29	338,83	55,49	58,66	44,51	41,34	42,93
No.50 (0,28 mm)	55,6	59,2	354,93	398,04	65,80	68,91	34,20	31,09	32,65
No.100 (0,15 mm)	67,1	63,7	421,99	461,72	78,23	79,93	21,77	20,07	20,92
No.200 (0,075 mm)	64,7	57,1	486,65	518,86	90,22	89,82	9,78	10,18	9,98
p a n	52,8	58,8	539,40	577,66	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
Total berat	539,4	577,7							

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.1 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 0 – 5

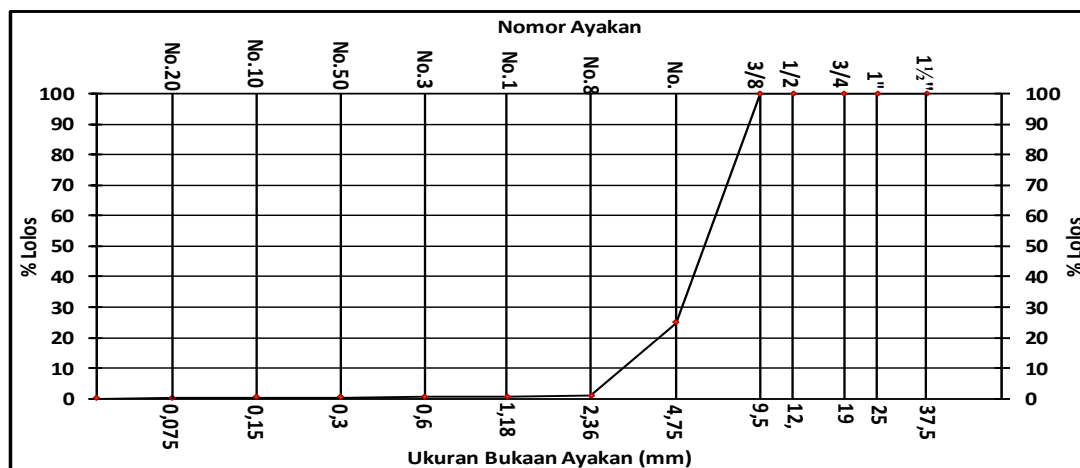
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil analisa saringan agregat halus 0–5 mm menunjukkan bahwa sebagian besar butiran agregat memiliki ukuran kecil dan lolos dari saringan berukuran lebih besar. Terlihat bahwa hampir seluruh agregat (99,56%) lolos saringan No. 4 (4,75 mm), yang berarti material didominasi partikel lebih kecil dari 4,75 mm. Persentase agregat yang lolos terus menurun seiring dengan semakin kecilnya ukuran saringan, yaitu 86,83% lolos saringan No. 8 (2,36 mm), 63,88% lolos No. 16 (1,18 mm), 42,93% lolos No. 30 (0,60 mm), dan 32,65% lolos No. 50 (0,28 mm). Jumlah agregat yang lolos semakin sedikit pada ukuran lebih halus, yaitu 20,92% pada saringan No. 100 (0,15 mm) dan hanya 9,98% pada saringan No. 200 (0,075 mm). Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa agregat memiliki gradasi halus yang cukup baik, dengan proporsi partikel halus yang tidak berlebihan.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 5 – 10

Ukuran saringan	Berat tertahan		Kumulatif		Prosentase				Rata - Rata Prosentase
	(gram)		(gram)		tertahan		Lolos		
	I	II	I	II	I	II	I	II	Lolos
1 ½" (37,5 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
1" (25 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
¾" (19 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
½" (12,5 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
3/8" (9,5 mm)	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
No.4 (4,75 mm)	1774,4	1916,6	1774,40	1916,62	74,24	75,98	25,76	24,02	24,89
No.8 (2,36 mm)	588,7	580,5	2363,09	2497,07	98,87	98,99	1,13	1,01	1,07
No.16 (1,18 mm)	15,7	15,0	2378,74	2512,06	99,53	99,58	0,47	0,42	0,44
No.30 (0,6 mm)	0,7	0,5	2379,43	2512,56	99,56	99,60	0,44	0,40	0,42
No.50 (0,28 mm)	0,6	0,6	2380,03	2513,14	99,58	99,62	0,42	0,38	0,40
No.100 (0,15 mm)	0,1	1,3	2380,11	2514,46	99,59	99,68	0,41	0,32	0,37
No.200 (0,075 mm)	3,1	2,1	2383,16	2516,58	99,71	99,76	0,29	0,24	0,26
p a n	6,8	6,0	2390,00	2522,62	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
Total berat	2390,0	2522,6							

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 5 - 10

Sumber : Hasil Penelitian

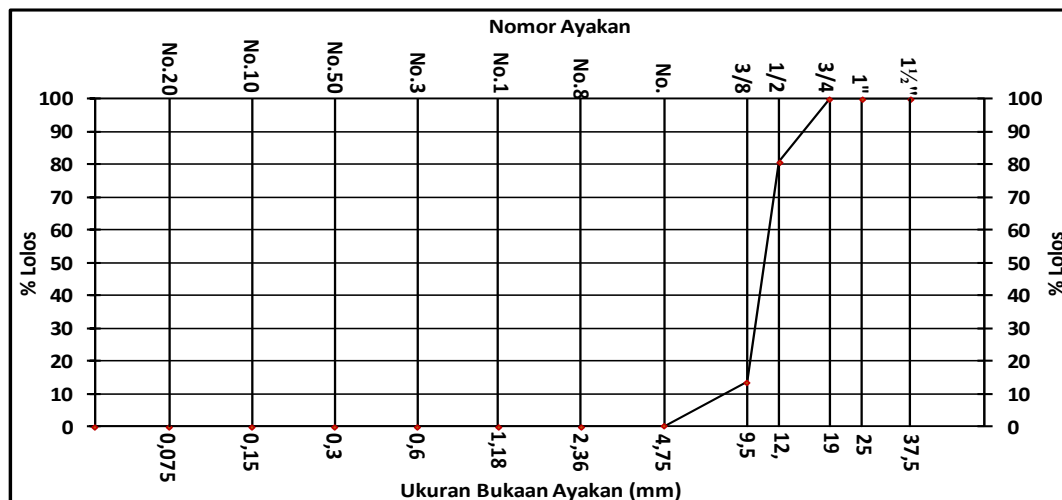
Hasil analisa saringan untuk agregat berukuran 5–10 mm menunjukkan bahwa seluruh material lolos dari saringan 9,5 mm, yang berarti tidak ada butiran lebih besar dari 10 mm. rata-rata dari agregat tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm) yaitu 75,11%, menandakan bahwa sebagian besar butiran berada di antara ukuran 4,75 mm hingga 9,5 mm sesuai dengan rentang ukuran 5–10 mm. Sisanya, sekitar 24,89% agregat lolos dari saringan No. 4, namun sebagian besar tetap tertahan di saringan No. 8 (2,36 mm), dan hanya sedikit yang lolos ke saringan-saringan yang lebih halus.

Gradasi ini sesuai untuk digunakan sebagai agregat sedang dalam campuran aspal, karena memiliki ukuran yang seragam dan tidak mengandung terlalu banyak partikel halus yang bisa memengaruhi kekuatan dan kestabilan campuran.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 10 – 10

Ukuran saringan	Berat tertahan		Kumulatif		Prosentase				Rata - Rata Prosentase Lolos
	(gram)		(gram)		tertahan		Lolos		
	I	II	I	II	I	II	I	II	
1 ½" (37,5 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
1" (25 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
¾" (19 mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
½" (12,5 mm)	693,05	675,06	693,05	675,06	19,54	18,89	80,46	81,11	80,78
⅜" (9,5 mm)	2357,1	2423,2	3050,15	3098,22	86,00	86,72	14,00	13,28	13,64
No.4 (4,75 mm)	490,2	469,3	3540,31	3567,52	99,82	99,85	0,18	0,15	0,16
No.8 (2,36 mm)	0,4	0,6	3540,66	3568,11	99,83	99,87	0,17	0,13	0,15
No.16 (1,18 mm)	0,2	0,2	3540,90	3568,29	99,84	99,87	0,16	0,13	0,14
No.30 (0,6 mm)	0,2	0,3	3541,12	3568,54	99,85	99,88	0,15	0,12	0,14
No.50 (0,28 mm)	0,2	0,1	3541,32	3568,60	99,85	99,88	0,15	0,12	0,13
No.100 (0,15 mm)	0,9	0,7	3542,24	3569,25	99,88	99,90	0,12	0,10	0,11
No.200 (0,075 mm)	2,0	2,0	3544,20	3571,28	99,93	99,96	0,07	0,04	0,06
p a n	2,4	1,6	3546,55	3572,86	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
Total berat	3546,6	3572,9							

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 10 -10

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil analisa saringan untuk agregat 10–10 mm menunjukkan bahwa material tertahan dengan baik antara ukuran 9,5 mm hingga 12,5 mm, karena hanya sedikit

butiran yang lolos saringan 9,5 mm dan semuanya lolos saringan 12,5 mm (100%). Artinya, ukuran butiran sangat seragam, seluruhnya berada di sekitar 10 mm sesuai dengan kategori agregat 10 –10. Gradasi seperti ini disebut *uniform* (seragam), dan cocok digunakan sebagai agregat kasar dalam campuran aspal porus.

Hasil pengujian material menunjukkan bahwa baik agregat kasar maupun halus telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga tahun 2018 revisi 2. Berdasarkan spesifikasi tersebut, persentase material yang lolos saringan No.200 tidak boleh melebihi 1% untuk agregat kasar dan 10% untuk agregat halus. Pengujian menunjukkan bahwa persentase agregat kasar yang lolos saringan No.200 adalah 0,06%, sedangkan untuk agregat halus adalah 9,98%.

Penggunaan agregat dengan kandungan material halus yang tinggi pada campuran beton aspal dapat menurunkan kualitas beton aspal. Hal ini disebabkan oleh partikel halus yang menyelimuti permukaan agregat kasar, sehingga mengurangi daya ikat antara agregat dengan aspal sebagai bahan pengikat. Akibatnya, ikatan antara agregat dan aspal menjadi lemah dan rentan terlepas (Sukirman, 2016). Hasil analisis saringan untuk agregat kasar, sedang, dan halus ini akan digunakan dalam proses *mix design* untuk menentukan komposisi campuran yang optimal.



Gambar 4.4 Dokumentasi pengujian analisa saringan agregat yang tertahan di setiap saringan

4.2.2 Hasil Berat Jenis dan Penyerapan Agregat (SNI 1969 – 2016)

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengukur berat jenis (*bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*saturated surface dry* atau SSD), berat jenis semu (*apparent*), serta tingkat penyerapan (*absorpsi*) pada agregat. Proses pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang yang beralamat di Jl. Bendungan Sigurgura No. 2, Malang. Data hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus 0 – 5

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B _k	484,30	487,20	485,75
Berat contoh kering permukaan jenuh	B _j	500,06	500,06	500,06
Berat piknometer diisi air pada 25°C	B	667,30	647,12	657,21
Berat piknometer + contoh + air (25°C)	B _t	975,96	956,20	966,08
Berat Jenis (<i>bulk</i>)	$\frac{B_k}{(B + B_j - B_t)}$	2,53	2,55	2,54
Berat jenis kering permukaan jenuh	$\frac{B_j}{(B + B_j - B_t)}$	2,61	2,62	2,62
Berat jenis semu (<i>apparent</i>)	$\frac{B_k}{(B + B_k - B_t)}$	2,76	2,74	2,75
Penyerapan (<i>absorpsi</i>)	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100 \%$	3,25%	2,64%	2,95%

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian dari berat jenis dan penyerapan agregat halus 0 – 5 adalah sebagai berikut :

1. Berat jenis (*bulk specific gravity*)
2. Berat jenis kering permukaan jenuh (*saturated surface dry*)
3. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)
4. Penyerapan (*absorpsi*)

Keterangan :

B_k = Berat benda uji kering oven (gr)

B = Berat piknometer berisi air (gr)

B_t = Berat piknometer berisi benda uji dalam air (gr)

Percobaan Sampel I : B_k = 484,30

: B_j = 500,06

$$: B = 667,30$$

$$: Bt = 975,96$$

Maka Perhitunngan :

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (bulk)} &= \frac{Bk}{B+Bj-Bt} \\ &= \frac{484,30}{667,30+500,06-975,96} \\ &= 2,53 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis permukaan jenuh} &= \frac{Bj}{B+Bj-Bt} \\ &= \frac{500,06}{667,30+500,06-975,96} \\ &= 2,61 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (apparent)} &= \frac{Bk}{B+Bk-Bt} \\ &= \frac{484,30}{667,30+484,30-975,96} \\ &= 2,76 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan (absorbsi)} &= \frac{Bj-Bk}{Bk} \times 100\% \\ &= \frac{500,06-484,30}{484,30} \times 100\% \\ &= 3,25\% \end{aligned}$$

$$\text{Percobaan Sampel II} \quad : Bk = 487,20$$

$$: Bj = 500,06$$

$$: B = 647,30$$

$$: Bt = 956,20$$

Maka Perhitunngan :

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (bulk)} &= \frac{Bk}{B+Bj-Bt} \\ &= \frac{487,30}{647,30+500,06-956,20} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2,55 \\
 \text{Berat jenis permukaan jenuh} &= \frac{B_j}{B + B_j - B_t} \\
 &= \frac{500,06}{647,30 + 500,06 - 956,20} \\
 &= 2,62 \\
 \text{Berat jenis semu (apparent)} &= \frac{B_k}{B + B_k - B_t} \\
 &= \frac{487,20}{647,30 + 487,20 - 956,20} \\
 &= 2,79 \\
 \text{Penyerapan (absorpsi)} &= \frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\% \\
 &= \frac{500,06 - 487,20}{487,20} \times 100\% \\
 &= 2,64\%
 \end{aligned}$$

Dari pengujian berat jenis dan penyerapan agregat 0 – 5 didapatkan rata-rata kedua sampel untuk berat jenis sebesar 2,54 dan penyerapan sebesar 2,95%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat berat jenis > 2,5 dan penyerapan < 3%. (acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga diketahui bahwa agregat 0 – 5 dapat digunakan sebagai campuran aspal dan sebagai indikator daya tahan terhadap ketahanan campuran aspal pada air.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar 5 – 10

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B _k	2794,4	2552	2673,2
Berat contoh kering permukaan jenuh	B _j	2864,4	2613	2738,7
Berat contoh di dalam air	B _a	1803,5	1648,1	1725,8
Berat Jenis (bulk)	$\frac{B_k}{B_j - B_a}$	2,63	2,64	2,64
Berat jenis kering permukaan jenuh	$\frac{B_j}{B_j - B_a}$	2,70	2,71	2,70
Berat jenis semu (apparent)	$\frac{B_k}{B_k - B_a}$	2,82	2,82	2,82
Penyerapan (absorpsi)	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$	2,51%	2,39%	2,45%

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian dari berat jenis dan penyerapan agregat kasar 5 – 10 adalah sebagai berikut :

1. Berat jenis (*bulk specific gravity*)
2. Berat jenis kering permukaan jenuh (*saturated surface dry*)
3. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)
4. Penyerapan (*absorpsi*)

Keterangan :

Bk = Berat benda uji kering oven (gr)

Bj = Berat benda uji kering permukaan jenuh (gr)

Ba = Berat benda uji di dalam air (gr)

Percobaan Sampel I : Bk = 2794,4
 : Bj = 2864,4
 : Ba = 1803,5

Maka Perhitungan :

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (bulk)} &= \frac{Bk}{Bj - Ba} \\ &= \frac{2794,4}{2864,4 - 1803,5} \\ &= 2,63 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis permukaan jenuh} &= \frac{Bj}{Bj - Ba} \\ &= \frac{2864,4}{2864,4 - 1803,5} \\ &= 2,70 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (apparent)} &= \frac{Bk}{Bk - Ba} \\ &= \frac{2794,4}{2794,4 - 1803,5} \\ &= 2,82 \end{aligned}$$

$$\text{Penyerapan (absorpsi)} = \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$$

$$= \frac{2864,4 - 2794,4}{2794,4} \times 100\%$$

$$= 2,51 \%$$

Percobaan Sampel II : Bk = 2552
 : Bj = 2613
 : Ba = 1648,1

Maka Perhitungan :

Berat jenis (*bulk*)

$$= \frac{Bk}{Bj - Ba}$$

$$= \frac{2552}{2613 - 1648,1}$$

$$= 2,64$$

Berat jenis permukaan jenuh

$$= \frac{Bj}{Bj - Ba}$$

$$= \frac{2613}{2613 - 1648,1}$$

$$= 2,71$$

Berat jenis semu (*apparent*)

$$= \frac{Bk}{Bk - Ba}$$

$$= \frac{2552}{2552 - 1648,1}$$

$$= 2,82$$

Penyerapan (*absorpsi*)

$$= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$$

$$= \frac{2613 - 2552}{2552} \times 100\%$$

$$= 2,39 \%$$

Dari pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar 5 - 10 didapatkan rata-rata kedua sampel untuk berat jenis sebesar 2,64 dan penyerapan sebesar 2,45%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat berat jenis > 2,5 dan penyerapan < 3%. (acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga diketahui bahwa agregat 5 – 1 dapat

digunakan sebagai campuran aspal dan sebagai indikator daya tahan terhadap ketahanan campuran aspal pada air.

Pada pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar 10 – 10 memiliki rumus perhitungan yang sama dengan agregat sedang 5 – 10, hasil pengujian dapat dilihat pada tabel :

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar 10 – 10

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B _k	3321,5	3235	3278,25
Berat contoh kering permukaan jenuh	B _j	3381,1	3292	1668,275
Berat contoh di dalam air	B _a	2134,7	2080,3	2107,5
Berat Jenis (bulk)	$\frac{B_k}{B_j - B_a}$	2,66	2,67	2,67
Berat jenis kering permukaan jenuh	$\frac{B_j}{B_j - B_a}$	2,71	2,72	2,71
Berat jenis semu (apparent)	$\frac{B_k}{B_k - B_a}$	2,80	2,80	2,80
Penyerapan (absorpsi)	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100 \%$	1,79%	1,76%	1,78%

Sumber: Hasil Penelitian

Dari pengujian berat jenis dan penyerapan agregat 10 - 10 yang dapat dilihat pada tabel 4.6 didapatkan rata-rata kedua sampel untuk berat jenis sebesar 2,67 dan penyerapan sebesar 1,78%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat berat jenis > 2,5 dan penyerapan < 3%. (acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga diketahui bahwa agregat 5 – 10 dapat digunakan sebagai campuran aspal dan sebagai indikator daya tahan terhadap ketahanan campuran aspal pada air.



Gambar 4.5 Dokumentasi pengujian berat jenis kondisi SSD

4.2.3 Pengujian Keausan Agregat Dengan Menggunakan Alat Abrasi Los Angeles (SNI 2417 – 2008)

Pengujian abrasi agregat bertujuan untuk mengetahui sejauh mana ketahanan agregat terhadap keausan dan tumbukan mekanis yang terjadi selama proses pencampuran, pemadatan, dan penggunaan jalan oleh kendaraan. Melalui pengujian ini, dapat dinilai kualitas dan durabilitas agregat dalam menahan gaya gesek dan benturan, yang berpengaruh langsung terhadap umur dan kinerja perkerasan jalan. Selain itu, pengujian abrasi juga berfungsi untuk memastikan bahwa agregat memenuhi standar spesifikasi teknis yang ditetapkan, seperti oleh SNI atau Direktorat Jenderal Bina Marga, guna mencegah kerusakan dini pada konstruksi perkerasan jalan. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang berlokasi di Jalan Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Berikut dapat dilihat pada tabel 4.7 dan 4.8 hasil pengujian abrasi dengan 100 dan 500 putaran :

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Agregat Dengan Menggunakan Alat Abrasi Los Angeles (100 putaran)

Gradasi pemeriksaan		B (fraksi 10 - 10 mm)			
Saringan		I		II	
Lolos	tertahan	Berat sebelum	Berat sesudah	Berat sebelum	Berat sesudah
76,20 mm (3")	63,50 mm (2,5")	2500	2500	2500	2500
63,50 mm (2,5")	50,80 mm (2")				
50,80 mm (2")	37,50 mm (1,5")				
37,50 mm (1,5")	25,40 mm (1")				
25,40 mm (1")	19,00 mm (3/4")				
19,00 mm (3/4")	12,50 mm (1/2")				
12,50 mm (1/2")	9,50 mm (3/8")				
9,50 mm (3/8")	6,30 mm (1/4")				
6,30 mm (1/4")	4,75 mm (No. 4)				
4,75 mm (No. 4)	2,38 mm (No. 8)				
Jumlah berat		5000		5000	
Berat tertahan saringan no 12		-	4833,4	-	4803
No. sampel		I		II	
a	Berat benda uji semula	5000,0 gr		5000,0 gr	
b	Berat tertahan saringan No.12	4833,4 gr		4803,0 gr	
c	Keausan : $\frac{a-b}{a} \times 100 \%$	3,33		3,94	
Rata - rata keausan		3,64			

Sumber : Hasil penelitian

Pengujian keausan 100 putaran dilakukan untuk mengetahui ketahanan awal agregat terhadap keausan dan digunakan sebagai indikator awal sebelum melakukan pengujian abrasi 500 putaran. Pada tabel 4.7 hasil pengujian keausan menggunakan mesin abrasi los angeles dengan 100 putaran didapatkan nilai rata-rata keausan yaitu 3,64% yang masih masuk dalam spesifikasi Ditjen Bina Marga yaitu keausan 100 putaran < 8%.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Agregat Dengan Menggunakan Alat Abrasi Los Angeles
(500 putaran)

Gradasi pemeriksaan		B (fraksi 10 - 10 mm)			
Saringan		I		II	
Lolos	tertahan	Berat sebelum	Berat sesudah	Berat sebelum	Berat sesudah
76,20 mm (3")	63,50 mm (2,5")				
63,50 mm (2,5")	50,80 mm (2")				
50,80 mm (2")	37,50 mm (1,5")				
37,50 mm (1,5")	25,40 mm (1")				
25,40 mm (1")	19,00 mm (3/4")				
19,00 mm (3/4")	12,50 mm (1/2")				
12,50 mm (1/2")	9,50 mm (3/8")				
9,50 mm (3/8")	6,30 mm (1/4")				
6,30 mm (1/4")	4,75 mm (No. 4)				
4,75 mm (No. 4)	2,38 mm (No. 8)				
Jumlah berat		5000		5000	
Berat tertahan saringan no 12		-	4231,4	-	4170,4
No. sampel		I		II	
a	Berat benda uji semula	5000,0 gr		5000,0 gr	
b	Berat tertahan saringan No.12	4231,4 gr		4170,4 gr	
c	Keausan : $\frac{a-b}{a} \times 100 \%$	15,37		16,59	
Rata - rata keausan		15,98			

Sumber : Hasil penelitian

Hasil pengujian keausan agregat dengan menggunakan alat abrasi los angeles 100 putaran dan 500 putaran dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\text{Nilai Keausan Los Angeles} = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Keterangan :

A : Berta benda uji semula (gram)

B : Berat benda uji tertahan di saringan No.12 dan No.4 (gram)

Contoh perhitungan keausan los angeles 500 putaran :

Percobaan sampel I :

$$\begin{aligned}\text{Nilai keausan los angeles} &= \frac{5000-4231,4}{4231,4} \times 100\% \\ &= 15,37\%\end{aligned}$$

Percobaan sampel II :

$$\text{Nilai keausan los angeles} = \frac{5000-4170,4}{4170,4} \times 100\% = 16,59\%$$

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata keausan los angeles sebesar 15,98%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai keausan $\leq 40\%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga agregat dapat digunakan sebagai campuran aspal dan digunakan sebagai syarat mutu akhir dalam pengujian keausan agregat.



Gambar 4.6 Dokumentasi pengujian abrasi

4.2.4 Hasil Pengujian Material Agregat Lolos Ayakan No.200 (SNI ASTM C117 – 2012)

Pengujian material agregat yang lolos ayakan No. 200 bertujuan untuk menentukan persentase butiran halus, seperti debu atau lempung, yang terkandung dalam agregat. Keberadaan partikel halus ini penting untuk dikontrol karena dapat memengaruhi sifat ikatan antara agregat dan aspal, serta menurunkan kekuatan dan durabilitas campuran. Oleh karena itu, pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa kadar material halus dalam agregat masih berada dalam batas yang diizinkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, agar campuran aspal yang dihasilkan tetap

memiliki kualitas dan kinerja yang baik saat digunakan pada konstruksi. Hasil pengujian material agregat lolos ayakan No.200 dapat dilihat pada tabel-tabel dibawah :

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Material Agregat Lolos Ayakan No.200
Agregat Kasar 10 – 10

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W ₁)	(gram)	381,8	186,2
Berat tempat + contoh awal	(W ₂)	(gram)	3765,8	3995,8
Berat contoh awal	W ₃ = W ₁ - W ₂	(gram)	3384,0	3809,6
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W ₄)	(gram)	3735,5	3967,4
Berat contoh oven	W ₅ = W ₄ - W ₁	(gram)	3353,7	3781,2
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 $W_6 = \frac{W_3 - W_5}{W_3} \times 100\%$			0,90	0,75
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 rata - rata %			0,82	

Sumber : Hasil penelitian

Hasil pengujian material lolos ayakan No.200 agregat 10 – 10 dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\text{Lolos No.200 (A)} = \frac{B-C}{B} \times 100\%$$

Keterangan:

B = Massa contoh awal massa kering sebelum dicuci (gr)

C = Massa contoh akhir massa kering tertahan saringan No.200 setelah dicuci (gr)

Contoh perhitungan bahan lolos ayakan No.200 agregat kasar 10 – 10

Percobaan sampel I :

$$\begin{aligned}
 \text{Lolos No.200 (A)} &= \frac{B-C}{B} \times 100\% \\
 &= \frac{3384-3353,7}{3384} \times 100\% \\
 &= 0,90 \%
 \end{aligned}$$

Percobaan sampel II :

$$\begin{aligned}
 \text{Lolos No.200 (A)} &= \frac{B-C}{B} \times 100\% \\
 &= \frac{3809,6-3781,2}{3809,6} \times 100\% \\
 &= 0,75 \%
 \end{aligned}$$

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata lolos ayakan No.200 agregat kasar 10 – 10 sebesar 0,82%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai lolos ayakan No.200 $\leq 1\%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga agregat kasar 10 – 10 dapat digunakan dalam campuran berdasarkan pengujian material lolos saringan No.200.

Pada pengujian material lolos ayakan No.200 agregat 5 – 10 dan 0 – 5 memiliki rumus perhitungan yang sama dengan agregat 10 – 10 , hasil pengujian dapat dilihat pada tabel :

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Material Agregat Lolos Ayakan No.200
Agregat Kasar 5 – 10

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W ₁)	(gram)	343,1	343,1
Berat tempat + contoh awal	(W ₂)	(gram)	2721,6	2923,1
Berat contoh awal	W ₃ = W ₁ - W ₂	(gram)	2378,5	2580,0
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W ₄)	(gram)	2699,6	2898,4
Berat contoh oven	W ₅ = W ₄ - W ₁	(gram)	2356,5	2555,3
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 $W_6 = \frac{W_3 - W_5}{W_3} \times 100\%$			0,92	0,96
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 rata - rata %			0,94	

Sumber : Hasil Penelitian

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata lolos ayakan No.200 agregat kasar 5 – 10 sebesar 0,98%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai lolos ayakan No.200 $\leq 1\%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga agregat kasar 5 – 10 dapat digunakan dalam campuran berdasarkan pengujian material lolos saringan No.200.

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Material Agregat Lolos Ayakan No.200

Agregat Halus 0 - 5

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W ₁)	(gram)	119,1	119,1
Berat tempat + contoh awal	(W ₂)	(gram)	801,6	802,2
Berat contoh awal	W ₃ = W ₁ - W ₂	(gram)	682,5	683,0
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W ₄)	(gram)	733,5	735,9
Berat contoh oven	W ₅ = W ₄ - W ₁	(gram)	614,4	616,8
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 $W_6 = \frac{W_3 - W_5}{W_3} \times 100\%$			9,98	9,70
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 rata - rata %			9,84	

Sumber : Hasil penelitian

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata lolos ayakan No.200 agregat kasar 0 – 5 sebesar 9,84%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai lolos ayakan No.200 $\leq 10\%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2). Sehingga agregat kasar 0 – 5 dapat digunakan dalam campuran berdasarkan pengujian material lolos saringan No.200.



Gambar 4.7 Dokumentasi pengujian lolos ayakan No.200

4.2.5 Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah dalam Agregat (SNI 4141-2015)

Pengujian ini adalah untuk memperoleh persen gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat. Pengujian ini dilakukan di Lboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang Jl. Bendungan Sigura-gura No.2 Malang. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah dalam Agregat 0 – 5

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W ₁)	(gram)	126,4	133,6
Berat tempat + contoh awal	(W ₂)	(gram)	390,4	394,9
Berat contoh awal	(W ₃) = (W ₂) - (W ₁)	(gram)	264,0	261,3
Data contoh setelah di ayak saringan No. 20 , kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven	(W ₄)	(gram)	388,5	392,9
Berat contoh oven	W ₅ = W ₄ - W ₁	(gram)	262,1	259,3
Jumlah gumpalan lempung	$W_6 = \frac{W_3 - W_5}{W_3} \times 100\%$		0,72	0,75
Jumlah gumpalan lempung dan butir mudah pecah rata - rata (%)			0,74	

Sumber : Hasil penelitian

Hasil pengujian gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat halus 0 – 5 menggunakan rumus adalah sebagai berikut :

$$P = \frac{W-R}{W} \times 100\%$$

Dimana :

P = Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat

W = Berat benda uji (gram)

R = Berat benda uji kering oven yang tertahan pada masing-masing ukuran setelah dilakukan penyaringan basah (gram)

Perhitungan :

Percobaan sampel I:

$$P = \frac{W-R}{W} \times 100\%$$

$$P = \frac{264-262,1}{264} \times 100\%$$

$$P = 0,72\%$$

Percobaan sampel II:

$$P = \frac{W-R}{W} \times 100\%$$

$$P = \frac{261,3-259,3}{261,3} \times 100\%$$

$$P = 0,75\%$$

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat halus 0 – 5 sebesar 0,74%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat $\leq 1\%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2).



Gambar 4.8 Dokumentasi pengujian gumpalan lempung setelah di oven

4.2.6 Pengujian Setara Pasir Untuk Menguji Agregat Halus Yang Mengandung Bahan Plastis (SNI 03-44828-1997)

Pengujian setara pasir adalah metode untuk mengukur kualitas agregat halus (seperti pasir) dengan menentukan rasio antara bagian agregat bersih terhadap bagian yang mengandung lumpur atau debu.

Tabel 4.13 Hasil Setara Pasir Agregat Halus 0 – 5

No.	Uraian	Percobaan ke		Rata - Rata
		1	2	
1	Skala pembacaan lumpur (A)	6,4	6,5	6,45
2	Skala pembacaan pasir (B)	3,2	3,3	3,25
3	Nilai setara pasir = $\frac{B}{A} \times 100 \%$	50,00	50,77	50,38

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil pengujian setara pasir menggunakan agregat halus 0 – 5 dihitung menggunakan rumus :

$$\text{Nilai setara pasir} = \frac{B}{A} \times 100\%$$

Dimana :

B = Skala pembacaan pasir

A = Skala pembacaan lumpur

Perhitungan :

Percobaan sampel I :

$$\text{Nilai setara pasir} = \frac{B}{A} \times 100\%$$

$$\text{Nilai setara pasir} = \frac{3,2}{6,4} \times 100\%$$

$$\text{Nilai setara pasir} = 50\%$$

Percobaan sampel II :

$$\text{Nilai setara pasir} = \frac{B}{A} \times 100\%$$

$$\text{Nilai setara pasir} = \frac{3,3}{6,5} \times 100\%$$

$$\text{Nilai setara pasir} = 50,77\%$$

Dari percobaan sampel I dan II didapatkan nilai rata-rata setara pasir dalam agregat halus 0 – 5 sebesar 50,38%. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat nilai setara pasir dalam agregat halus $\geq 50 \%$. (Acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2).

Sehingga agregat halus 0 – 5 dapat digunakan dalam campuran berdasarkan pengujian setara pasir.



Gambar 4.9 Dokumentasi pengujian setara pasir

4.2.7 Hasil Pengujian Agregat Kasar, Sedang dan Halus

Rekapitulasi hasil pengujian agergat kasar dan halus dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.14 Hasil Pengujian Material Agregat

No.	Pengujian	Metode Pengujian	Syarat	Hasil	Satuan	Keterangan
AGREGAT HALUS						
1	Berat Jenis Agregat 0-5	SNI 1970 : 2016	$\geq 2,50$	2,58	-	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat 0-5		≤ 3	2,95	%	Memenuhi
3	Gum. Lempung & Butir Mudah Pecah	SNI 4141 : 2015	≤ 1	0,74	%	Memenuhi
4	Material lolos ayakan No. 200 (0 - 5)	SNI ASTM C117 : 2012	≤ 10	9,84	%	Memenuhi
5	Nilai Setara Pasir	SNI 03 - 4428 - 1997	≥ 50	50,38	%	Memenuhi
6	Berat Jenis Semen	SNI 2531 : 2015	-	3,06	-	-
AGREGAT KASAR						
7	Berat Jenis Ag. 5-10	SNI 1969 : 2016	$\geq 2,50$	2,64	-	Memenuhi
8	Berat Jenis Ag. 10-10		≤ 3	2,67	-	Memenuhi
11	Penyerapan Ag. 5-10			2,45	%	Memenuhi
12	Penyerapan Ag. 10-10			1,78	%	Memenuhi
15	Material lolos ayakan No. 200 (5 - 10)	ASTM C117 : 2012	≤ 1	0,94	%	Memenuhi
16	Material lolos ayakan No. 200 (10 - 10)			0,82	%	Memenuhi
19	Abrasi 100 Putaran	SNI 2417 : 2008	≤ 8	3,64	%	Memenuhi
20	Abrasi 500 Putaran		≤ 40	15,98	%	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian

Dari hasil pengujian agregat normal yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Institut Teknologi Nasional Malang, Jalan Bendungan Sigura – gura No.2 Malang, diketahui bahwa pengujian material agregat memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk digunakan sebagai bahan penyusun aspal porus seperti yang ditampilkan pada tabel 4.14.

4.3 Hasil Pengujian Aspal

4.3.1 Pengujian Penetrasi Aspal (SNI 2456 : 2011)

Tujuan pengujian ini adalah mengukur tingkat penetrasi bitumen, baik jenis keras maupun lunak (padat atau semi-padat), dengan cara menekan jarum standar ke dalam sampel aspal menggunakan beban dan waktu tertentu pada suhu yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, digunakan aspal Pertamina jenis penetrasi 60/70. Proses pengujian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang berlokasi di Jalan Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.15 Hasil Pengujian Penetrasi Bahan-Bahan Bitumen Sebelum Kehilangan Berat (SNI 2456 : 2011)

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan		Pembacaan suhu aspal	
	Mulai jam : 08.20 WIB		140 °C	
	Selesai jam : 09.10 WIB			
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath	
	Mulai jam : 09.10 WIB		25 °C	
	Selesai jam : 10.15 WIB			
Pemeriksaan	Penetrasi pada suhu 25°C		Pembacaan suhu termometer	
	Mulai jam : 10.15 WIB		25 °C	
	Selesai jam : 10.45 WIB			
Penetrasi pada 25°C dengan beban total 100 gr, jangka waktu 5 detik :				
Pengamatan		1	2	3
Benda uji I		77	68	65
Benda uji II		63	77	68
Benda uji III		60	64	64
Rata-rata		67,33 (10 ⁻¹ mm)		

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.16 Hasil Pengujian Penetrasi Bahan-Bahan Bitumen Setelah Kehilangan Berat (SNI 2456 : 2011)

Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath	
	Mulai jam : 18.00 WIB		25 °C	
	Selesai jam : 19.00 WIB			
Pemeriksaan	Penetrasi pada suhu 25°C		Pembacaan suhu termometer	
	Mulai jam : 19.30 WIB		25 °C	
	Selesai jam : 19.45 WIB			
Penetrasi pada 25°C dengan beban total 100 gr, jangka waktu 5 detik :				
Pengamatan		1	2	3
Benda uji I		60	62	65
Benda uji II		61	60	59
Benda uji III		63	62	60
Rata-rata		61,33 (10 ⁻¹ mm)		
Penetrasi setelah kehilangan berat (% semula) = 91,1%				

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian penetrasi sebagai berikut:

1. Hasil pengujian penetrasi aspal sebelum kehilangan berat minyak dan aspal didapatkan nilai rata-rata sebesar 67,33.
2. Hasil pengujian penetrasi aspal sebelum kehilangan berat minyak dan aspal didapatkan nilai rata-rata sebesar 61,33.
3. Sesuai hasil kedua pengujian tersebut didapatkan $\frac{67,33}{61,33} \times 100 = 91,1 \%$



Gambar 4.10 Dokumentasi pengujian daktilitas

4.3.2 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar (SNI 2433 : 2011)

Pengujian titik nyala dan bakar aspal dilakukan untuk mengetahui pada suhu berapa aspal bisa terbakar jika terkena api (titik nyala) dan kapan aspal benar-benar mulai menyala terus-menerus (titik bakar). Tujuannya adalah untuk memastikan aspal aman saat dipanaskan, disimpan, atau digunakan, sehingga tidak mudah terbakar dan menyebabkan kecelakaan. Titik nyala aspal merupakan suhu ketika aspal menghasilkan cukup uap untuk terbakar jika terpapar api atau panas. Nilai ini dapat berbeda-beda tergantung jenis dan fungsi aspal. Misalnya, aspal untuk konstruksi jalan umumnya memiliki titik nyala tinggi guna memastikan stabilitasnya saat terkena panas matahari dan beban kendaraan. Pengujian titik nyala dan titik bakar dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel :

Tabel 4.17 Hasil Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Persiapan contoh		Contoh dipanaskan		Pembacaan suhu aspal	
		Mulai jam	: 08.20 WIB	140 °C	
		Selesai jam	: 09.10 WIB		
Menuang contoh		Penuangan contoh		Pembacaan suhu menuang	
		Mulai jam	: 09.10 WIB	140 °C	
		Selesai jam	: 10.15 WIB		
Kenaikan suhu contoh		Sampai 56°C di bawah titik nyala			
		Mulai jam	: 13.00 WIB	15°C per menit	
		Selesai jam	: 13.26 WIB		
		antara 56 s/d 28°C di bawah titik nyala			
		Mulai jam	: 13.26 WIB	5°C s/d 6°C per menit	
		Selesai jam	: 14.36 WIB		
Titik nyala perkiraan °C	°C di bawah titik nyala	Menit	°C	Titik Nyala & Bakar	Keterangan
358 °C	56 °C	24	302 °C	-	-
	51 °C	28	307 °C	-	-
	46 °C	34	312 °C	-	-
	41 °C	51	317 °C	-	-
	36 °C	60	322 °C	-	-
	31 °C	65	327 °C	-	-
	28 °C	69	330 °C	-	-
	26 °C	72	332 °C	-	-
	24 °C	75	334 °C	-	-
	22 °C	76	336 °C	-	-
	20 °C	81	338 °C	-	-
	18 °C	84	340 °C	-	-
	16 °C	85	342 °C	-	-
	14 °C	89	344 °C	-	-
	12 °C	93	346 °C	-	-
	10 °C	91	348 °C	-	-
	8 °C	95	350 °C	-	-
	6 °C	97	352 °C	-	-
	4 °C	99	354 °C	325 °C	Titik Nyala
	2 °C	103	356 °C	330 °C	Titik Bakar

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan pengujian titik nyala dan titik bakar, aspal memiliki titik nyala pada suhu 325°C ketika uapnya menyala dengan nyala biru singkat, sedangkan titik bakarnya mencapai 330°C . Hasil ini memenuhi persyaratan Spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga 2018 yang menetapkan titik nyala minimal 232°C .



Gambar 4.11 Dokumentasi pengujian titik nyala dan titik bakar

4.3.3 Pengujian Titik Lembek (SNI 2434 : 2011)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui suhu titik lembek aspal dan ter, yang umumnya berada pada kisaran 30°C hingga 200°C . Titik lembek didefinisikan sebagai suhu ketika aspal atau ter yang berada dalam cincin khusus mulai melunak sehingga bola baja dengan berat tertentu dapat menekannya hingga menyentuh pelat dasar di bawahnya. Proses ini terjadi akibat pemanasan terkendali sesuai standar yang ditetapkan. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4.18 Hasil Pengujian Titik Lembek

Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu ruang	
	Mulai jam : 13.20 WIB		25 °C	
	Selesai jam : 14.20 WIB			
Mencapai suhu pemeriksaan	Didiamkan pada suhu 5°C		Pembacaan suhu es	
	Mulai jam : 14.20 WIB		0 °C	
	Selesai jam : 15.30 WIB			
Pemeriksaan titik lembek	Mulai jam : 15.30 WIB		5 °C	
	Selesai jam : 15.57 WIB			
Suhu yang diamati	Waktu (detik)		Titik lembek °C	
°C	Benda Uji I	Benda Uji II	Benda Uji I	Benda Uji II
5 °C	3,50	3,50	49 °C	49 °C
10 °C	4,37	4,37		
15 °C	6,22	6,22		
20 °C	7,49	7,49		
25 °C	9,15	9,15		
30 °C	10,43	10,43		
35 °C	12,21	12,21		
40 °C	13,55	13,55		
45 °C	15,40	15,40		
50 °C	-	-		
55 °C	-	-		
60 °C	-	-		
65 °C	-	-		
70 °C	-	-		
75 °C	-	-		
80 °C	-	-		
85 °C	-	-		

Sumber: Hasil Penelitian

Pengujian titik lembek aspal dilakukan untuk menganalisis sifat mekanis dan termal material tersebut, khususnya dalam menentukan suhu saat aspal mulai melunak. Hasil pengujian ini memberikan gambaran tentang ketahanan aspal terhadap beban dan deformasi pada berbagai kondisi suhu. Hasil pengujian titik lembek juga berperan dalam penyusunan standar mutu aspal, memastikan material tersebut memenuhi kriteria teknis yang berlaku untuk aplikasi konstruksi. Dengan demikian, pengujian ini tidak hanya mendukung pengembangan material yang lebih baik tetapi juga berkontribusi pada keamanan dan daya tahan infrastruktur jalan.

Berdasarkan hasil dari pengujian titik lembek aspal didapat sebesar 49°C. Maka dari itu titik lembek telah memenuhi syarat spesifikasi direktorat jendral bina marga 2018 yaitu minimal 48°C.



Gambar 4.12 Dokumentasi pengujian titik lembek

4.3.4 Pengujian Daktilitas Aspal (SNI 2432:2011)

Pengujian ini adalah untuk mengukur jarak terpanjang yang dapat ditarik antara dua cetakan yang berisi aspal sebelum putus pada suhu dan kecepatan tarik tertentu. Pengujian daktilitas dilakukan di Laboratorium Transportasi ITN Malang. Hasil penujian dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4.19 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal Sebelum Kehilangan Berat

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan	Pembacaan suhu aspal
	Mulai jam : 08.20 WIB	150 °C
	Selesai jam : 09.10 WIB	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang	Pembacaan suhu ruang
	Mulai jam : 09.10 WIB	25 °C
	Selesai jam : 10.15 WIB	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C	Pembacaan suhu water bath
	Mulai jam : 13.00 WIB	25 °C
	Selesai jam : 13.30 WIB	
Pemeriksaan Daktilitas	Mulai jam : 13.30 WIB	Pembacaan suhu alat
	Selesai jam : 14.00 WIB	25 °C
Daktilitas pada 25°C dengan kecepatan mesin 5 cm per menit :		
Pengamatan	1	2
Pembacaan	140 cm	140 cm
Rata-rata	140 cm	

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.20 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal Sesudah Kehilangan Berat

Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang	Pembacaan suhu ruang
	Mulai jam : 18.00 WIB	25 °C
	Selesai jam : 19.00 WIB	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C	Pembacaan suhu water bath
	Mulai jam : 19.00 WIB	25 °C
	Selesai jam : 19.15 WIB	
Pemeriksaan Daktilitas	Mulai jam : 20.00 WIB	Pembacaan suhu alat
	Selesai jam : 20.15 WIB	25 °C
Daktilitas pada 25°C dengan kecepatan mesin 5 cm per menit :		
Pengamatan	1	2
Pembacaan	140 cm	140 cm
Rata-rata	140 cm	

Sumber: Hasil Penelitian

Hasi pengujian daktilitas aspal sebelum kehilangan berat didapatkan nilai rata-rata sebessari 140 cm dan sesudah kehilangan berat sebesar 140 cm. Dari kedua hasil pengujian daktilitas memenuhi syarat spesifikasi direktorat jendral bina marga 2018 dengan nilai ≥ 100 cm untuk pengujian sebelum kehilangan berat dan ≥ 50 cm untuk pengujian sesudah kehilangan berat.



Gambar 4.13 Dokumentasi pengujian daktilitas

4.3.5 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal (SNI 2441:2011)

Pengujian berat jenis aspal berfungsi untuk menentukan perbandingan massa aspal terhadap massa air dengan volume yang sama pada suhu tertentu, yang berguna untuk menilai kualitas dan kemurnian aspal. Hasil pengujian ini membantu dalam merancang campuran aspal yang optimal untuk konstruksi jalan, serta mendeteksi adanya bahan pengotor. Caranya adalah dengan membandingkan berat aspal dan air dalam volume yang sama, di mana nilai berat jenis yang mendekati kisaran standar (biasanya 1,0–1,05) menunjukkan aspal berkualitas baik. Pengujian ini penting untuk memastikan kinerja aspal dalam pembangunan infrastruktur.

Tabel 4.21 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan		Pembacaan suhu aspal
	Mulai jam	: 08.20 WIB	140 °C
	Selesai jam	: 09.10 WIB	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu ruang
	Mulai jam	: 09.10 WIB	25 °C
	Selesai jam	: 10.15 WIB	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath
	Mulai jam	: 10.15 WIB	25 °C
	Selesai jam	: 10.30 WIB	
Pemeriksaan Berat Jenis	Mulai jam	: 10.30 WIB	Pembacaan suhu water bath
	Selesai jam	: 11.00 WIB	25 °C
Kode sampel	Sampel I		Sampel II
Berat piknometer + contoh (C)	57,545 gr		56,007 gr
Berat piknometer + penutup (A)	27,197 gr		23,758 gr
Berat contoh (C - A)	30,348 gr		32,249 gr
Berat piknometer + air (B)	64,963 gr		63,002 gr
Berat piknometer + penutup (A)	27,197 gr		23,758 gr
Berat air (B - A)	37,766 gr		39,244 gr
Berat pikno + air + contoh (D)	66,068 gr		64,347 gr
Berat piknometer + contoh (C)	57,545 gr		56,007 gr
Berat air saja (D - C)	8,523 gr		8,340 gr
Berat air (B - A) - (D - C)	29,243 gr		30,904 gr
WT	997,0 kg/m ³		997,0 kg/m ³
Berat jenis : $\frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$	1,038		1,044
Berat jenis rata - rata	1,041 (25°C)		
Berat isi : (Berat jenis x WT)	1034,673 kg/m ³		1040,391 kg/m ³
Berat isi rata - rata	1037,532 kg/m ³		

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian berat jenis aspal :

$$\text{Berat jenis} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)}$$

Dimana :

A = Massa piknometer dan penutup

B = Massa piknometer dan penutup berisi air

C = Massa piknometer, penutup dan benda uji

D = Massa piknometer, penutup, benda uji dan air

Perhitungan sampel I :

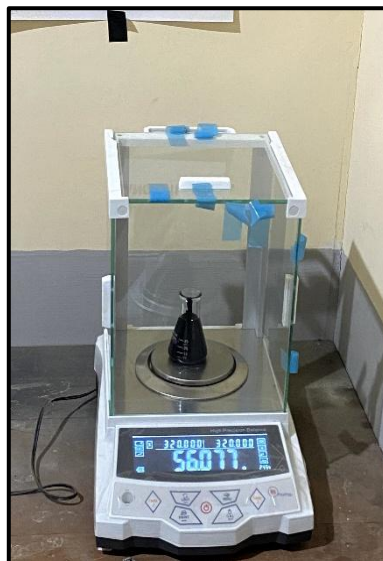
$$\begin{aligned}\text{Berat piknometer + air} &= 64,963 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer} &= 27,197 \text{ gr} \\ \text{Berat isi (isi piknometer)} &= 64,963 \text{ gr} - 27,197 \text{ gr} = 37,766 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + contoh} &= 57,545 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer} &= 27,197 \text{ gr} \\ \text{Berat contoh} &= 57,545 \text{ gr} - 27,197 \text{ gr} = 30,348 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + air + contoh} &= 66,608 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + contoh} &= 57,545 \text{ gr} \\ \text{Berat air saja} &= 66,608 \text{ gr} - 57,545 \text{ gr} = 8,523 \text{ gr} \\ \text{Isi bitumen} &= \text{Berat air (isi piknometer)} - \text{berat air saja} \\ &= 37,766 \text{ gr} - 8,523 \text{ gr} = 29,243 \text{ gr} \\ \text{Berat jenis} &= \frac{\text{Berat contoh}}{\text{Berat air isi bitumen}} = \frac{30,348 \text{ gr}}{29,243 \text{ gr}} = 1,038\end{aligned}$$

Perhitungan sampel II :

$$\begin{aligned}\text{Berat piknometer + air} &= 63,002 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer} &= 23,758 \text{ gr} \\ \text{Berat isi (isi piknometer)} &= 63,002 \text{ gr} - 23,758 \text{ g} = 39,244 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + contoh} &= 56,007 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer} &= 23,758 \text{ gr} \\ \text{Berat contoh} &= 56,007 \text{ gr} - 23,758 \text{ gr} = 32,249 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + air + contoh} &= 64,347 \text{ gr} \\ \text{Berat piknometer + contoh} &= 56,007 \text{ gr} \\ \text{Berat air saja} &= 64,347 \text{ gr} - 56,007 \text{ gr}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 8,340 \text{ gr} \\
 \text{Isi bitumen} &= \text{Berat air (isi piknometer)} - \text{berat air saja} \\
 &= 39,244 \text{ gr} - 8,340 \text{ gr} \\
 &= 30,904 \text{ gr} \\
 \text{Berat jenis} &= \frac{\text{Berat contoh}}{\text{Berat air isi bitumen}} \\
 &= \frac{32,249 \text{ gr}}{30,904 \text{ gr}} \\
 &= 1,044
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian berta jenis aspal pada sampel I didapatkan nilai sebesar 1,038 dan sampe II sebesar 1,044. Dari kedua sampel diambil nilai rata-rata sehingga didapatkan nilai berat jenis sebesar 1,41. Maka dari pengujian tersebut memenuhi syarat spesifikasi direktorat jendral bina marga 2018 dengan nilai $\geq 1,0$.



Gambar 4.14 Dokumentasi pengujian berat jenis

4.3.6 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal (SNI 06 – 2440 -1991).

Pengujian ini dimaksudkan untuk menetapkan kehilangan berat minyak dan aspal dengan cara pemanasan dan tebal tertentu, yang dinyakatan dalam proses berat semula.

Pengujian kehilangan berat minyak dan aspal dilakukan di laboratorium bahan konstruksi ITN Malang. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel.

Tabel 4.22 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan		Pembacaan suhu aspal
	Mulai jam : 08.20 WIB		140 °C
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu ruang
	Mulai jam : 09.10 WIB		25 °C
	Selesai jam : 10.15 WIB		
Pemeriksaan kehilangan berat pada 163°C	Mulai jam : 10.15 WIB		Pembacaan suhu contoh
	Selesai jam : 17.15 WIB		163 ± 1 °C
No sampel	Sampel I	Sampel II	Sampel III
Berat cawan + aspal keras	69,055	68,366	73,218
Berat cawan kosong	10,49	10,552	10,46
Berat aspal keras	58,565	57,814	62,758
Berat sebelum pemanasan	69,055	68,366	73,218
Berat sesudah pemanasan	68,682	68,357	73,213
Kehilangan berat	0,373	0,009	0,005
Kehilangan berat	0,540 %	0,013 %	0,007 %
Rata-rata	0,187 %		

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian kehilangan berat minyak dan aspal sebagai berikut :

$$\text{Hitung penurunan berat} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

Dimana :

A = Berat benda uji semula

B = Berat benda uji setelah pemanasan

Perhitungan sampel I :

A = 69,055 gr

B = 68,682 gr

$$\text{Penurunan berat} = \frac{69,055 - 68,682}{69,055} \times 100 = 0,540 \%$$

Dengan cara rata-rata dari hasil ketiga sampel pengujian didapatkan nilai sebesar 0,187%. Hasil dari pengujian kehilangan berat minyak dan aspal didapatkan nilai

sebesar 0,187%. Maka dari itu pengujian tersebut memenuhi syarat spesifikasi direktorat jendral bina marga 2018 dengan nilai $\leq 0,8 \%$.



Gambar 4.15 Dokumentasi pengujian kehilangan berat minyak aspal

4.3.7 Hasil Rekapitulasi Pengujian Aspal

Hasil rekapitulasi pengujian aspal dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.23 Hasil Rekapitulasi Pengujian Aspal

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat	Hasil	Satuan	Keterangan
1	Penetrasi Pada 25°C	SNI 2456 : 2011	60-70	67,33	10 ⁻¹ mm	Memenuhi
2	Berat Jenis Aspal	SNI 2441 : 2011	≥ 1,0	1,04	-	Memenuhi
3	Daktilitas Pada 25°C	SNI 2432 : 2011	≥ 100	140,0	cm	Memenuhi
4	Titik Nyala	SNI 2433 : 2011	≥ 230	325	°C	Memenuhi
5	Titik Bakar		-	330	°C	-
6	Titik Lembek Aspal	SNI 2434 : 2011	≥ 48	49,0	°C	Memenuhi
Pengujian Residu Hasil TFOT/RTFOT						
7	Kehilangan Berat	SNI 06-2440-1991	≤ 0,8	0,187	%	Memenuhi
8	Penetrasi Pada 25°C (% Semula)	SNI 2456 : 2011	≥ 54	85,81	%	Memenuhi
9	Daktilitas Pada 25°C	SNI 2432 : 2011	≥ 50	140	cm	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian

4.4 Perencanaan Komposisi Campuran

4.4.1 Perhitungan Presentase Agregat dengan Metode Grafis

Proses perhitungan persentase agregat menggunakan metode grafis diagonal pada campuran aspal porus melibatkan beberapa tahapan. Metode ini biasa digunakan untuk menentukan perbandingan agregat kasar dan halus dalam campuran aspal. Berikut adalah tahapan-tahapannya:

1. **Persiapan Sampel**

Persiapkan sampel campuran aspal yang akan dianalisis kemudian persiapan alat dan bahan yang akan digunakan seperti saringan dan timbangan.

2. **Penyaringan Agregat**

Penyaringan agregat kasar dan halus menggunakan saringan dengan ukuran yang telah ditentukan untuk memisahkan agregat kasar dan halus dari campuran kemudian timbang setiap fraksi agregat yang tertahan di setiap saringan.

3. **Persiapan Grafik Diagonal**

Buatlah grafik dengan sumbu X yang menunjukkan fraksi agregat halus (biasanya berupa pasir) dan sumbu Y yang menunjukkan fraksi agregat kasar (seperti kerikil atau batu pecah). Selanjutnya, tentukan titik-titik referensi pada grafik yang mencerminkan proporsi agregat kasar dan halus sesuai dengan spesifikasi campuran aspal yang dibutuhkan.

4. **Penentuan Presentase Agregat**

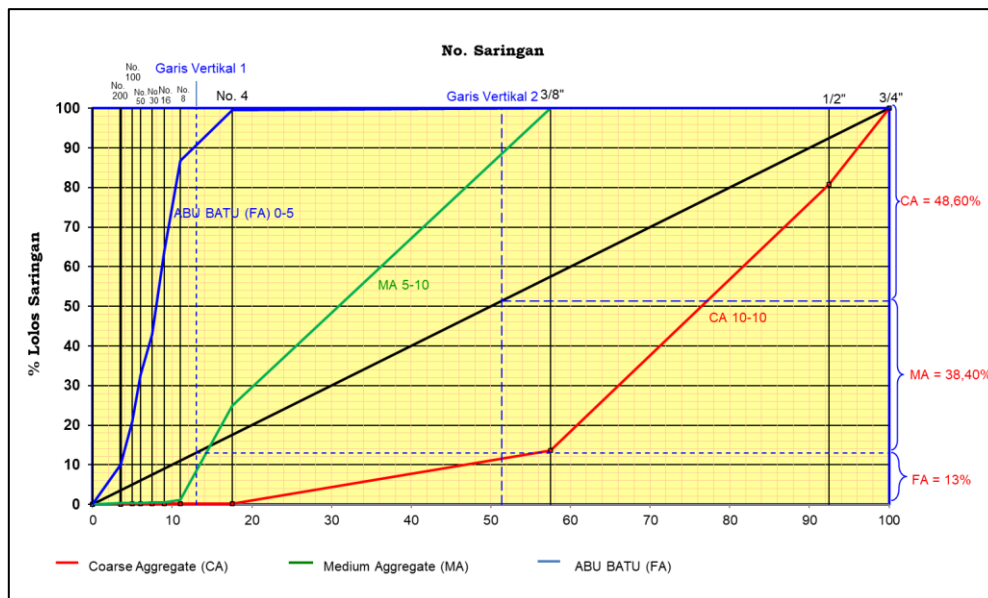
Masukan hasil uji sampel campuran aspal pada grafik diagonal yang telah disiapkan, sesuai dengan fraksi agregat kasar dan halus yang telah diukur. Kemudian, baca nilai persentase agregat kasar dan halus dari posisi sampel pada grafik tersebut. Persentase ini akan menunjukkan tingkat kesesuaian campuran dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

5. **Evaluasi dan Pelaporan Hasil**

Evaluasi hasil persentase agregat dan bandingkan dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Tentukan apakah campuran sudah memenuhi persyaratan atau memerlukan penyesuaian lebih lanjut. Selanjutnya, buat laporan yang jelas dan

terstruktur, mencakup hasil perhitungan persentase agregat, informasi tentang sampel yang digunakan, metode yang diterapkan, serta hasil analisis. Pendekatan ini memudahkan pemahaman visual mengenai proporsi agregat kasar dan halus dalam campuran aspal porus, sekaligus memastikan kesesuaiannya dengan spesifikasi proyek konstruksi.

Setelah dilakukan pemeriksaan analisis gradasi untuk menentukan persentase agregat yang melewati setiap saringan, langkah berikutnya adalah menghitung proporsi agregat dalam campuran. Perhitungan ini dilakukan menggunakan metode grafis, seperti yang ditunjukkan pada grafik komposisi campuran agregat berikut:



Gambar 4.16 Grafik Diagonal Komposisi Campuran Agregat Aspal Porus

Sumber : Hasil Penelitian

Dimana :

- Garis vertical 1 :

Fraksi agregat halus (FA) = fraksi agregat kasar (CA) + fraksi agregat sedang (MA)

$$9,5\% \text{ (FA)} = 0,5\% \text{ (CA)} + 9\% \text{ (MA)}$$

$$9,5\% \text{ (FA)} = 9,5\%$$

- Garis vertical 2 :

Fraksi agregat sedang (MA) = Fraksi agregat kasar (CA)

11,5% (MA) = 11,5% (CA)

Proporsi dari masing-masing agregat :

- Garis horizontal 1 dengan garis diagonal didapatkan FA = 13%
- Garis horizontal 2 dengan garis diagonal didapatkan CA = 48,60%
- Sehingga MA = 100% - CA (10/10) – FA (5/10)
= 100% - 48,60% - 13%
= 38,40%

4.4.2 Perhitungan Presentase Agregat dengan Metode Analitis

Setelah dilakukan pemeriksaan analisa gradasi untuk mengetahui berat dan presentase agregat yang lolos pada masing-masing saringan, maka selanjutnya dihitung proporsi agregat dalam campuran dengan menggunakan metode analitis dan tabel komposisi campuran agregat dibawah ini :

Tabel 4.24 Gradasi Agregat Gabungan Aspal Porus

Ukuran Saringan	10/10	5/10	0/5	Filler	10/10	5/10	0/5	Filler	Hasil Gabungan	Spek	Fak. Luas	Luas Perm.
	%lolos	%lolos	%lolos	%lolos	47,87	37,82	12,81	1,50				
3/4" (19 mm)	100,00	100,00	100,00	100,00	47,87	37,82	12,81	1,50	100,00	100,00	0,41	0,41
1/2" (12,5 mm)	80,78	100,00	100,00	100,00	38,67	37,82	12,81	1,50	90,80	85-100		
3/8" (9,5 mm)	13,64	100,00	100,00	100,00	6,53	37,82	12,81	1,50	58,66	45-70		
No.4 (4,75 mm)	0,16	24,89	99,56	100,00	0,08	9,41	12,75	1,50	23,74	10-25		
No.8 (2,36 mm)	0,15	1,07	86,83	100,00	0,07	0,40	11,12	1,50	13,09	7-15	0,82	0,11
No.16 (1,18 mm)	0,14	0,44	63,88	100,00	0,07	0,17	8,18	1,50	9,92	6-12	1,64	0,16
No.30 (0,6 mm)	0,14	0,42	42,93	100,00	0,07	0,16	5,50	1,50	7,22	5-10	2,87	0,21
No.50 (0,28 mm)	0,13	0,40	32,65	100,00	0,06	0,15	4,18	1,50	5,89	4-8	6,14	0,36
No.100 (0,15 mm)	0,11	0,37	20,92	100,00	0,05	0,14	2,68	1,50	4,37	3-7	12,29	0,54
No.200 (0,075 mm)	0,06	0,26	9,98	100,00	0,03	0,10	1,28	1,50	2,90	2-5	32,77	0,95
JUMLAH LUAS PERMUKAAN AGREGAT (m ² /kg)												2,74

Sumber: Hasil Penelitian

Berikut contoh perhitungan gradasi agregat gabungan ukuran 10/10 :

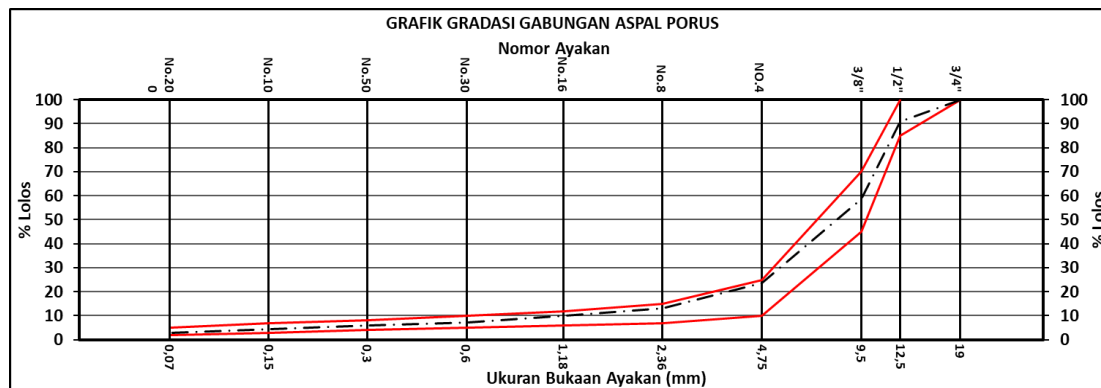
Saringan No. ½ :

Presentase lolos = 80,78 %

Gradasi agregat = $\frac{\text{Presentase lolos}}{100} \times \text{Proporsi agregat fraksi 10/10}$

$$= \frac{80,78}{100} \times 47,87$$

$$= 38,67 \%$$



Gambar 4.17 Grafik Diagonal Komposisi Campuran Agregat Aspal Porus

Sumber: Hasil Penelitian

Pada pemeriksaan gradasi gabungan yang ditampilkan pada tabel 2.24 dan juga gambar 4.17 dapat dilihat bahwa hasil gradasi gabungan memenuhi spesifikasi AAPA yaitu nilai gradasi gabungan (garis putus-putus) masih berada di dalam area spesifikasi (garis merah) sehingga agregat dapat digunakan sebagai campuran aspal porus.

4.5 Komposisi Campuran Normal Untuk Variasi Aspal

Setelah proporsi dari masing-masing agregat didapatkan, dilanjutkan dengan perhitungan kadar aspal rencana yang akan digunakan sebagai acuan dalam penentuan variasi kadar aspal. Variasi kadar aspal berdasarkan peraturan bina marga digunakan rumus sebagai berikut :

Hasil perhitungan :

Diketahui :

- Proporsi Fraksi Kasar CA = 13,09 %
- FF = 2,9 %
- K = 0,50
- Mencari nilai CA

$$\begin{aligned}
 CA &= 100 - \text{Proporsi fraksi kasar} \\
 &= 100 - 13,09 \\
 &= 86,91 \%
 \end{aligned}$$

- Mencari nilai FA

$$\begin{aligned}
 FA &= 100 - CA - FF \\
 &= 100 - 86,91 - 2,9 \\
 &= 10,19 \%
 \end{aligned}$$

Presentasi agregat komposisi spesifikasi aspal porus adalah sebagai berikut :

$$CA = 86,91 \%$$

$$FA = 10,19 \%$$

$$FF = 2,9 \%$$

Berdasarkan presentasi agregat komposisi campuran aspal porus didapatkan kadar aspal rencana sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P &= 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + K \\
 &= 0,035 (86,91) + 0,045 (10,19) + 0,18 (2,9) + 0,0 \\
 &= 4 \%
 \end{aligned}$$

Jika kadar aspal tengah yang diperoleh disebut Pb%, maka benda uji dibuat untuk kadar aspal (Pb-1)%, (Pb-0,5)%, Pb%, (Pb+1)%, (Pb+0,5)%. Untuk mencari kadar aspal optimum (KAO) dengan kadar aspal rencana 4% dibuat dengan 5 variasi kadar aspal sebagai berikut :

3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5%.

Contoh perhitungan untuk variasi kadar aspal 4%

Berat total campuran :

$$\begin{aligned}
 \text{Berat aspal} &= \frac{\text{Variasi aspal} \times \text{berat total campuran}}{100} \\
 &= \frac{4 \times 1200}{100} \\
 &= 48 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat kasar 10/10} &= \frac{\text{Komposisi kasar} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100}
 \end{aligned}$$

	$= \frac{47,87 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100}$ $= 551,5 \text{ gr}$
Berat agregat sedang 5/10	$= \frac{\text{Komposisi sedang} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100}$ $= \frac{37,82 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100}$ $= 435,7 \text{ gr}$
Berat agregat halus 0/5	$= \frac{\text{Komposisi halus} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100}$ $= \frac{12,81 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100}$ $= 147,5 \text{ gr}$
Berat filler	$= \frac{\text{Komposisi filler} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100}$ $= \frac{1,5 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100}$ $= 17,3 \text{ gr}$
Berat total campuran	$= 551,5 \text{ gr} + 435,7 \text{ gr} + 147,5 \text{ gr} + 17,3 \text{ gr}$ $= 1152 \text{ gr}$
Berat total campuran	$= \text{Berat total agregat} + \text{berat aspal}$ $= 1152 + 48$ $= 1200 \text{ gr}$

Tabel 4.25 Perencanaan Komposisi Campuran Aspal Porus

URAIAN					NILAI	SATUAN	
Proporsi Fraksi Kasar				CA	86,91	%	
Proporsi Fraksi Halus				FA	10,19	%	
Proporsi Bahan Pengisi				FF	2,90	%	
Total					100,00	%	
Nilai Konstanta				K	0,00	-	
Perkiraan Kadar Aspal				Pb	4,00	%	
Rumus Perkiraan Kadar Aspal (Pb): Pb = 0,035 x (CA) + 0,045 x (FA) + 0,18 x (FF) + Konstanta (laston : 0,5~1 & lataston : 1~2)						Campuran Gmm	
Jenis Material	% Proporsi Agg.	KADAR ASPAL RENCANA (%)					
		3,00 %	3,50 %	4,00 %	4,50 %		5,00 %
		% Proporsi Campuran					
10/10	47,87	46,43	46,20	45,96	45,72	45,48	45,96
5/10	37,82	36,69	36,50	36,31	36,12	35,93	36,31
0/5	12,81	12,42	12,36	12,29	12,23	12,16	12,29
Filler	1,50	1,46	1,45	1,44	1,43	1,43	1,44
Total	100,00	97,00	96,50	96,00	95,50	95,00	96,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Jenis Material	Komposisi (%)	KADAR ASPAL RENCANA (%)					
		3,00 %	3,50 %	4,00 %	4,50 %	5,00 %	4,00 %
		Berat Agregat (gr)					
10/10	47,87	557,2	554,3	551,5	548,6	545,7	505,5
5/10	37,82	440,3	438,0	435,7	433,5	431,2	399,4
0/5	12,81	149,1	148,3	147,5	146,7	146,0	135,2
Filler	1,50	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	15,8
Berat total Ag. Camp. (gr)		1164,0	1158,0	1152,0	1146,0	1140,0	1056,0
Berat aspal (gr)		36,0	42,0	48,0	54,0	60,0	44,0
Berat total campuran (gr)		1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1100,0

Sumber : Hasil Penelitian

4.6 Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Aspal Porus

Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran merupakan pengujian laboratorium yang bertujuan untuk mengetahui berat jenis maksimum dari campuran aspal tanpa adanya rongga udara di dalamnya. Pengujian ini dilakukan dengan metode vakum, di mana udara dalam campuran dihilangkan dan volume campuran diukur dalam keadaan jenuh air untuk menentukan berat jenisnya. Hasil pengujian berat jenis maksimum dalam campuran aspal porus dapat dilihat dalam tabel 4.26 sebagai berikut :

Tabel 4.26 Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal 4% Aspal Porus

No.	Uraian	I	II	Rata - rata
A	Berat piknometer + benda uji (gr)	2381,50	2382,50	2382
B	Berat piknometer (gr)	1326,30	1326,30	1326,3
C	Berat benda uji (A - B) (gr)	1055,20	1056,20	1055,7
D	Berat piknometer + air (gr)	4667,00	4667,00	4667
E	Berat piknometer + air + benda uji (gr)	5302,40	5301,10	5301,75
F	Volume benda uji (C + D - E) (cc)	419,80	422,10	420,95
E	Gmm (C / F)	2,514	2,502	2,508

Sumber : Hasil Penelitian

Contoh perhitungan untuk mencari berat jenis bulk maksimum kadar aspal 4% :

$$Gmm = \frac{C}{F} = \frac{1055}{419.8} = 2,514$$

Berdasarkan hasil pengujian Gmm (Berat Jenis Maksimum Campuran) tersebut, nilai Gmm diperoleh sebesar 2,508. Artinya, dalam setiap satuan volume campuran aspal tanpa rongga udara, beratnya adalah 2,508 gram/cm³. Nilai ini menunjukkan seberapa padat campuran aspal jika seluruh udara di dalamnya dihilangkan. Data ini penting untuk digunakan dalam perhitungan tingkat kepadatan dan rongga udara pada campuran aspal yang sebenarnya, sehingga kualitas dan kekuatan perkerasan jalan dapat dikontrol dan disesuaikan dengan standar teknis yang diinginkan.

4.7 Pengujian Marshall Test Untuk Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Porus

Tabel 4.27 Hasil Pengujian Marshall Untuk Mencari KAO Aspal Porus

Jenis Campuran : ASPAL PORUS						Berat jenis bulk agregat (S) : 2,65						Aspal : Minyak				Kalibrasi marshall (W) : 29,80							
Jumlah Tumbukan : 50						Gmm test (T) : 2,508						Penetrasi : 60/70				Luas Permukaan Ag. (X) : 2,74							
Suhu : 145 °C						Berat jenis efektif ag. (U) = (100-Pb) / ((100/T) - (Pb/V)) : 2,664						B. jenis (V) : 1,041				Partikel lolos sar. #200 (Y) : 2,90							
Perkiraan kadar aspal rencana (Pb): Pb = 0,035 x (CA) + 0,045 x (FA) + 0,18 x (FF) + Konstanta (laston = 0,5 - 1 & lataston = 2- 3) : 4,00 %																							
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Aspal	Berat benda uji (gram)			Volume benda uji	Berat isi	Bj. maks. camp.	% Rongga			Stabilitas		Flow	MQ	% Absorsi aspal	% Kadar aspal eff.	Rasio Part. lolos sar. #200	T. film
							kering udara	dalam air	s.s.d				Gmb	V . M . A	V . I . M	V . F . A	Bacaan dial						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L						M	N	O	P	Q	R
		1	2	3	4	Rata - Rata		Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100-A}{U} + \frac{A}{V}$	$\frac{100-F}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-I)}{I}$	Lab. Test	K. W. A.Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 \cdot U \cdot S \cdot V}{S \cdot U}$	$\frac{A(100-A)Q}{100}$	$\frac{Y}{P}$
1	62,8	62,2	62,4	62,0	62,35	3,00	1115,7	632,4	1198,9	566,5	1,969		27,94	22,62	19,01	38	526,80	4,53	116,29				
2	61,9	62,0	61,8	62,0	61,93		1118,4	623,9	1197,2	573,3	1,951		28,62	23,36	18,39	39	546,07	4,44	122,99				
3	61,2	61,7	61,6	61,2	61,43		1114,3	628,8	1199,6	570,8	1,952		28,57	23,30	18,43	35	495,96	4,52	109,73				
Rata - Rata											1,957	2,545	28,37	23,09	18,61	37	522,94	4,50	116,34	0,199	2,81	1,03	10,13
1	60,8	60,8	60,5	60,6	60,68	3,50	1115,3	625,2	1198,2	573,0	1,946		29,15	22,96	21,23	38	548,49	3,88	141,36				
2	61,7	61,4	61,3	61,8	61,55		1112,7	628,9	1201,8	572,9	1,942		29,30	23,12	21,07	40	565,10	4,19	134,87				
3	60,2	60,8	60,3	60,4	60,43		1107,9	624,9	1198,9	574,0	1,930		29,74	23,60	20,63	43	624,59	5,70	109,58				
Rata - Rata											1,940	2,526	29,39	23,23	20,98	40	579,39	4,59	128,60	0,199	3,31	0,88	12,00
1	60,4	60,2	60,3	60,2	60,28	4,00	1109,8	621,5	1196,6	575,1	1,930		30,12	23,05	23,45	46	670,72	5,79	115,84				
2	62,3	62,2	62,3	62,1	62,23		1110,3	631,5	1212,6	581,1	1,911		30,81	23,81	22,70	47	653,47	5,56	117,53				
3	61,1	61,3	61,2	61,2	61,20		1114,7	613,3	1196,7	583,4	1,911		30,81	23,81	22,70	52	740,89	5,76	128,63				
Rata - Rata											1,917	2,508	30,58	23,56	22,95	48	688,36	5,70	120,67	0,199	3,81	0,76	13,90

Jenis Campuran : ASPAL PORUS						Berat jenis bulk agregat (S) : 2,651						Aspal : Pertamina						Kalibrasi marshall (W) : 29,80						
Jumlah Tumbukan : 50						Gmm test (T) : 2,508						Penetrasi : 60/70						Luas Permukaan Ag. (X) : 2,74						
Suhu : 145 °C						Berat jenis efektif ag. (U) = (100-Pb) / ((100/T) - (Pb/V)) : 2,664						B. jenis (V) : 1,041						Partikel lolos sar. #200 (Y) : 2,90						
Perkiraan kadar aspal rencana (Pb): Pb = 0,035 x (CA) + 0,045 x (FA) + 0,18 x (FF) + Konstanta (laston = 0,5 - 1 & lataston = 2- 3) : 4,00 %																								
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Aspal	Berat benda uji (gram)			Volume benda uji	Berat isi	Bj. maks. camp.	% Rongga			Stabilitas		Flow	MQ	% Absorsi aspal	% Kadar aspal eff.	Rasio Part. lolos sar. #200	T. film	
							kering udara	dalam air	s.s.d				V . M . A	V . I . M	V . F . A	Bacaan dial	Koreksi							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R						
	1	2	3	4	Rata - Rata		Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100}{100-A + \frac{A}{U} V}$	$100 - \frac{F(100-A)}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-D)}{I}$	Lab. Test	K. W. A.Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 U.S.V}{S . U}$	$\frac{A(100-A)O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-O}{X V(100-A)}$	
1	63,6	63,2	62,8	63,0	63,15	4,50	1113,6	620,7	1196,1	575,4	1,935		30,28	22,26	26,47	42	571,71	5,80	98,57					
2	62,8	63,0	63,7	63,5	63,25		1109,1	627,1	1198,9	571,8	1,940		30,12	22,09	26,67	46	624,76	5,34	117,00					
3	63,9	64,1	64,5	64,2	64,18		1112,9	624,8	1197,3	572,5	1,944		29,97	21,92	26,86	52	691,99	5,09	135,95					
Rata - Rata												1,940	2,490	30,12	22,09	26,67	47	629,49	5,41	117,17	0,199	4,31	0,67	15,81
1	64,1	63,9	64,3	64,5	64,20	5,00	1110,6	620,3	1198,6	578,3	1,920		31,18	22,30	28,48	39	518,71	5,24	98,99					
2	63,8	63,1	63,0	63,4	63,33		1115,8	622,1	1199,8	577,7	1,931		30,78	21,85	29,00	47	637,27	3,89	163,82					
3	64,9	65,0	64,7	65,2	64,95		1111,3	621,5	1197,3	575,8	1,930		30,83	21,91	28,93	52	680,56	4,97	136,93					
Rata - Rata												1,927	2,472	30,93	22,02	28,80	46	612,18	4,70	133,25	0,199	4,81	0,60	17,74

Jenis Campuran : ASPAL PORUS						Berat jenis bulk agregat (S) : 2,651						Aspal : Pertamina						Kalibrasi marshall (W) : 29,80						
Jumlah Tumbukan : 50						Gmm test (T) : 2,387						Penetrasi : 60/70						Luas Permukaan Ag. (X) : 2,74						
Suhu : 145 °C						Berat jenis efektif ag. (U) = (100-Po) / ((100/T) - (Po/V)) : 2,523						B. jenis (V) : 1,041						Partikel lolos sar. #200 (Y) : 2,90						
Kadar aspal optimum (Po) : 4,00 %																								
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Aspal	Berat benda uji (gram)			Volume benda uji	Berat isi	Bj. maks. camp.	% Rongga			Stabilitas		Flow	MQ	% Absorsi aspal	% Kadar aspal eff.	Rasio Part. lolos sar. #200	T. film	
							kering udara	dalam air	s.s.d				V . M . A	V . I . M	V . F . A	Bacaan dial	Koreksi							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R						
	1	2	3	4	Rata - Rata		Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100}{100-A + \frac{A}{U} V}$	$100 - \frac{F(100-A)}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-D)}{I}$	Lab. Test	K. W. A.Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 U.S.V}{S . U}$	$\frac{A(100-A)O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-O}{X V(100-A)}$	
1	64,2	63,7	64,0	63,5	63,85	4,00	1113,6	620,7	1196,1	575,4	1,935		29,91	18,93	36,72	41	549,49	5,61	97,95					
2	63,8	64,0	64,3	63,6	63,93		1109,1	627,1	1198,9	571,8	1,940		29,76	18,75	37,00	44	588,73	5,43	108,42					
3	63,6	63,4	62,8	63,0	63,20		1112,9	624,8	1197,3	572,5	1,944		29,60	18,57	37,27	48	652,65	5,68	114,90					
Rata - Rata Perendaman Marshall 30 Menit												1,940	2,387	29,76	18,75	37,00	44	596,96	5,57	107,09	-1,986	5,91	0,49	21,89
1	64,5	64,3	65,0	64,8	64,65	4,00	1115,3	625,2	1198,2	573,0	1,946		29,51	18,46	37,44	46	605,90	4,13	146,71					
2	65,2	64,9	64,6	64,8	64,88		1112,7	628,9	1201,8	572,9	1,942		29,66	18,64	37,16	42	550,56	4,87	113,05					
3	64,5	64,0	63,8	63,9	64,05		1107,9	624,9	1198,9	574,0	1,930		30,10	19,15	36,40	47	627,15	4,32	145,17					
Rata - Rata Perendaman Marshall 24 Jam												1,940	2,387	29,76	18,75	37,00	45	594,54	4,44	134,98	-1,986	5,91	0,49	21,89

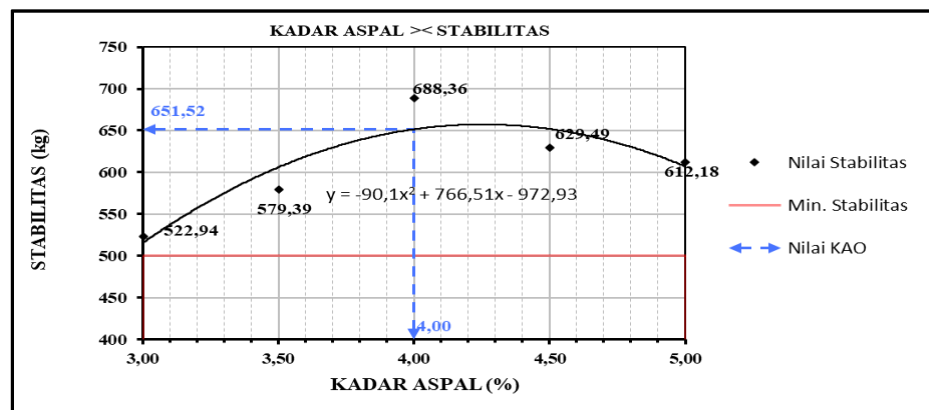
STABILITAS MARSHALL SISA PERENDAMAN 24 JAM = $\frac{594,54}{596,96}$ X 100 = 99,59 %

Sumber : Hasil Penelitian

4.8 Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal Porus

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) untuk campuran aspal porus dilakukan dengan menganalisis dan mengambil nilai rata-rata dari beberapa parameter Marshall yang meliputi stabilitas, flow, *Marshall Quotient* (MQ), VIM (*Voids in Mix*), VMA (*Voids in Mineral Aggregate*), dan VFA (*Voids Filled with Asphalt*). Seluruh parameter ini dihitung berdasarkan data hasil pengujian laboratorium, kemudian masing-masing nilai diplot dalam bentuk grafik terhadap kadar aspal. Dari grafik-grafik tersebut, ditentukan kadar aspal optimum masing-masing parameter, yaitu titik yang memenuhi atau mendekati kriteria ideal. Nilai KAO akhir diperoleh dengan mengambil rata-rata dari kadar optimum yang dihasilkan oleh setiap parameter, sehingga menghasilkan kadar aspal terbaik yang tidak hanya memenuhi persyaratan teknis tetapi juga memberikan keseimbangan antara kekuatan, daya tahan, dan porositas campuran aspal porus. Hasil pengujian marshall pada sampel aspal porus dapat dilihat pada grafik yang disajikan sebagai berikut :

4.8.1 Stabilitas



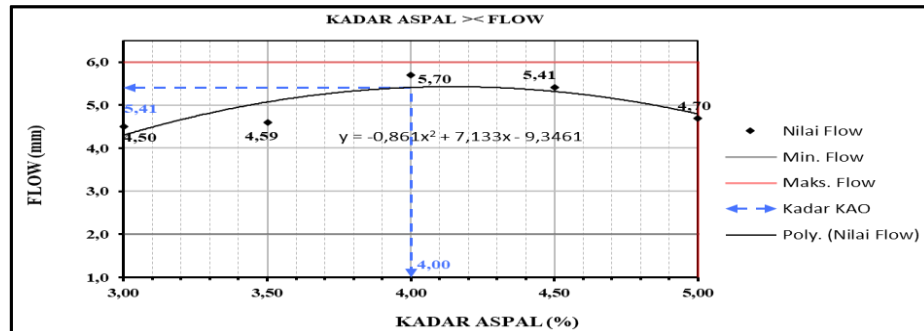
Gambar 4.18 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap stabilitas

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.18 dapat dilihat pada kadar aspal 4% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi yaitu sebesar 688,36 kg. Berdasarkan garis persamaan polinomial, nilai stabilitas pada kadar aspal optimum 4% sebesar 651,52 kg. Selain itu pada gambar 4.18 terlihat bahwa stabilitas meningkat seiring dengan pertambahan kadar aspal dari kadar

aspal 3% hingga titik puncak stabilitas yaitu pada kadar aspal 4%, kemudian menurun saat penambahan kadar aspal 4,5% dan 5% tetapi nilai stabilitas pada kadar aspal 3% hingga 5% masih memenuhi spesifikasi AAPA yaitu nilai stabilitas > 500 kg.

4.8.2 Flow

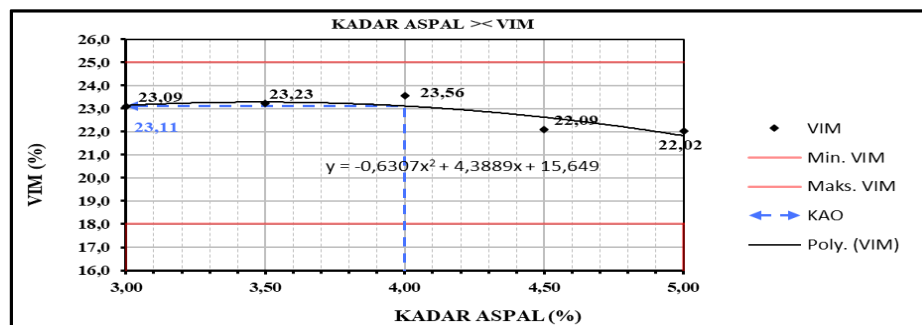


Gambar 4.19 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap flow

Sumber : Hasil Penelitian

Dari gambar 4.19 dapat dilihat pada kadar 4% menghasilkan nilai flow tertinggi yaitu 5,70 mm. Nilai flow pada kadar aspal optimum 4% berdasarkan garis polynomial didapatkan sebesar 5,41 mm. Pada gambar 4.19 terlihat bahwa flow mengalami peningkatan dari kadar aspal 3% hingga kadar aspal 4%, kemudian flow menurun saat penambahan kadar aspal 4,5% dan 5% tetapi kadar aspal 3% hingga 5% masih memenuhi spesifikasi AAPA yaitu $2 < \text{flow} < 6$ mm.

4.8.3 Void In Mix (VIM)

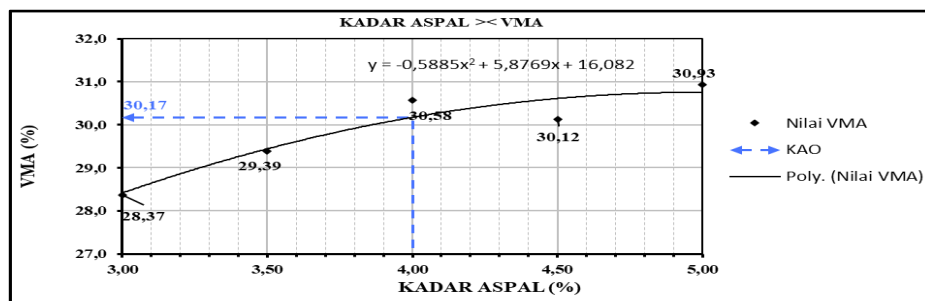


Gambar 4.20 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap VIM

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.20 dapat dilihat nilai VIM tertinggi berada pada kadar aspal 4% yaitu sebesar 23,56%. Berdasarkan garis persamaan polynomial, nilai stabilitas pada kadar aspal optimum 4% sebesar 23,11%. Pada gambar 4.7 terlihat bahwa VIM mengalami peningkatan dari kadar aspal 3% hingga 4%, kemudian menurun saat kadar aspal terus bertambah tetapi kadar aspal 3% hingga 5% masih memenuhi spesifikasi AAPA yaitu $18\% < VIM < 25\%$

4.8.4 Void in Mineral Aggregate (VMA)

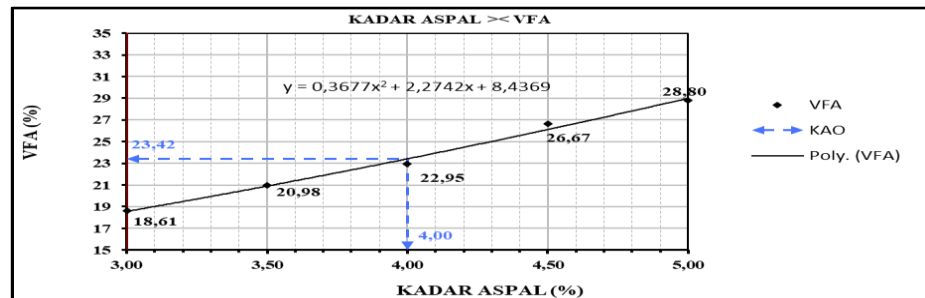


Gambar 4.21 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap VMA

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.21 dapat dilihat pada kadar aspal 5% menghasilkan VMA tertinggi yaitu sebesar 30,93%. Berdasarkan garis persamaan polynomial, nilai VMA pada Kadar Aspal Optimum (KAO) 4% sebesar 30,17%. Selain itu dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai VMA seiring dengan pertambahan kadar aspal. Dimana semakin tinggi kadar aspal maka nilai VMA semakin meningkat.

4.8.5 Void Filled with Asphalt (VFA)

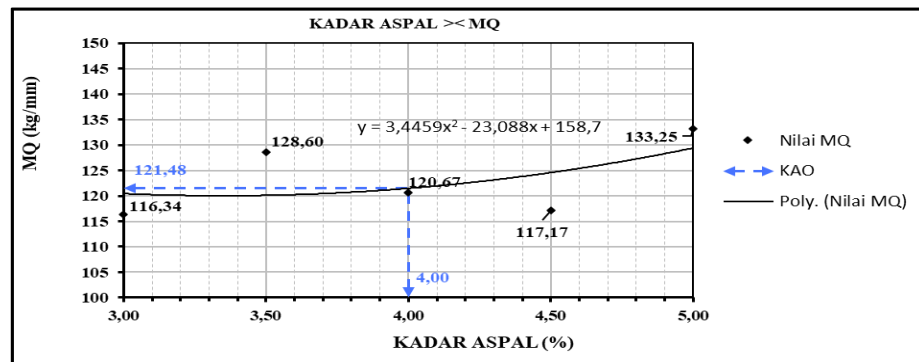


Gambar 4.22 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap VFA

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.22 dapat dilihat pada kadar aspal 5% menghasilkan nilai VFA tertinggi yaitu sebesar 28,80%. Berdasarkan garis persamaan polynomial, nilai VFA pada kadar aspal optimum 4% yaitu sebesar 23,42%. Selain itu dapat dilihat juga bahwa terjadi peningkatan nilai VFA seiring dengan penambahan kadar aspal dari 3% hingga 5%.

4.8.6 Marshall Quotient (MQ)

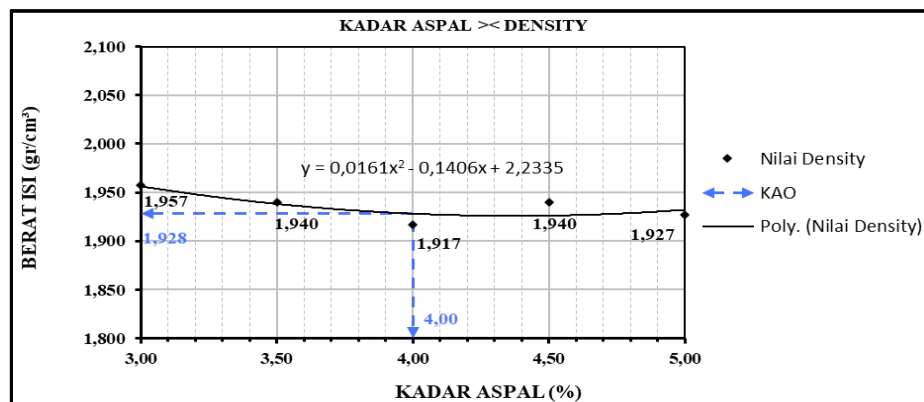


Gambar 4.23 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap MQ

Sumber : Hasil Penelitian

Dari gambar 4.23 dapat dilihat nilai MQ tertinggi berada pada kadar aspal 5% dengan nilai sebesar 133,25 kg/mm. Nilai MQ pada kadar aspal optimum 4% berdasarkan garis polynomial didapatkan sebesar 121,48 kg/mm.

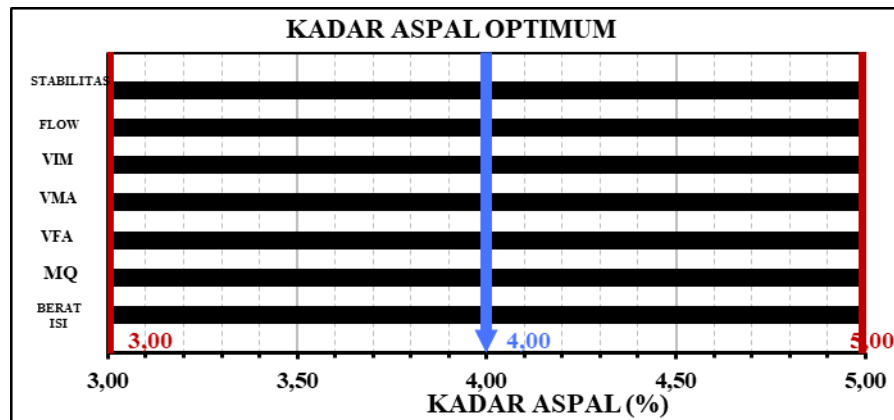
4.8.7 Berat Isi (Density)



Gambar 4.24 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap density

Sumber : Hasil Penelitian

Dari gambar 4.24 dapat dilihat nilai *density* berada pada range 1,917 gr/cm^3 sampai 1,957 gr/cm^3 pada kadar aspal mulai dari 3% sampai 5%. Nilai *density* pada kadar aspal optimum 4% berdasarkan garis polynomial didapatkan sebesar 1,928 gr/cm^3 .



Gambar 4.25 Grafik diagram batang kadar aspal optimum aspal porus

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk mendapatkan kadar aspal optimum (KAO) seperti yang terlihat pada gambar 4.25 yang dikelompokkan menjadi dua sisi yaitu sisi kiri sebagai batas minimum dan sisi kanan sebagai batas maksimum, sehingga dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{a + b}{2} &= \frac{\text{sisi kiri} + \text{sisi kanan}}{2} \\ &= \frac{3+5}{2} \\ &= 4 \% \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 4% yang kemudian akan digunakan sebagai campuran dengan bahan tambahan serbuk ban.

4.9 Pengujian Permeabilitas Pada Variasi Kadar Aspal

Pengujian parameter permeabilitas dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan campuran aspal porus dalam menyerap atau mengalirkan air. Permeabilitas merupakan sifat suatu material berpori yang memungkinkan cairan

melewati atau mengalir melalui media tersebut. Nilai pengujian permeabilitas pada setiap kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan grafik :

Tabel 4.28 Hasil Pengujian Permeabilitas Pada Setiap Kadar Aspal

Kadar Aspal	A (cm2)	L (cm)	Dia. Sampel (cm)	a (cm2)	t (detik)	h1 (cm)	h2 (cm)	A x L	a x t	log(h1/h2)	K (cm/dtk)	Rata-rata K (cm/dtk)
3%	3,63	7,21	10,53	87,042	4,19	70	15	26,172	364,7039	0,669006781	0,1104	0,1109
	3,63	7,34	10,44	85,560	4,18	70	15	26,644	357,6407	0,669006781	0,1146	
	3,63	7,24	10,73	90,379	4,16	70	15	26,281	375,978	0,669006781	0,1076	
3,5%	3,63	7,22	10,52	86,876	4,21	70	15	26,209	365,7491	0,669006781	0,1103	0,1133
	3,63	7,26	10,54	87,207	4,15	70	15	26,354	361,9087	0,669006781	0,1120	
	3,63	7,32	10,35	84,091	4,13	70	15	26,572	347,2965	0,669006781	0,1177	
4%	3,63	7,41	10,49	86,381	4,11	70	15	26,898	355,0279	0,669006781	0,1166	0,1144
	3,63	7,46	10,78	91,224	4,16	70	15	27,080	379,4902	0,669006781	0,1098	
	3,63	7,44	10,46	85,888	4,14	70	15	27,007	355,5768	0,669006781	0,1169	
4,5%	3,63	7,31	10,49	86,381	4,23	70	15	26,535	365,3937	0,669006781	0,1117	0,1125
	3,63	7,28	10,51	86,711	4,17	70	15	26,426	361,5856	0,669006781	0,1125	
	3,63	7,26	10,41	85,069	4,21	70	15	26,354	358,1403	0,669006781	0,1132	
5%	3,63	7,25	10,47	86,052	4,19	70	15	26,318	360,5596	0,669006781	0,1123	0,1120
	3,63	7,36	10,55	87,372	4,18	70	15	26,717	365,2169	0,669006781	0,1126	
	3,63	7,49	10,67	89,371	4,21	70	15	27,189	376,2535	0,669006781	0,1112	

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas digunakan rumus :

$$K = 2,3 \times \frac{A \times L}{a \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Dimana :

K = koefisien permeabilitas air (cm/dtk)

h₁ = tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)

h₂ = tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)

a = luas potongan spesimen (cm²)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h₁ ke h₂ (detik)

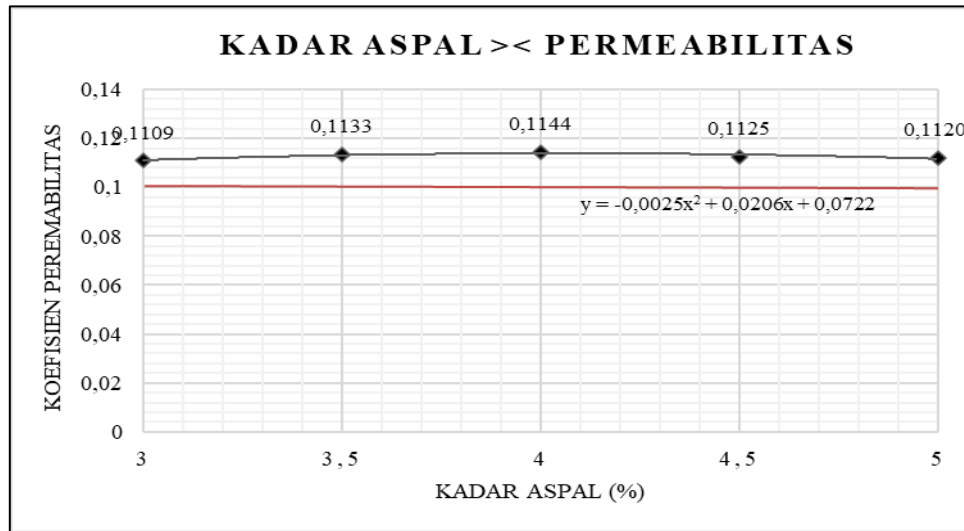
L = tebal benda uji (cm)

A = luas potongan melintang tabung (cm²)

Contoh Perhitungan :

$$K = 2,3 \times \frac{3,63 \times 7,12}{88,369 \times 4,32} \times \log \left(\frac{70}{15} \right)$$

$$= 0,1042 \text{ cm/dtk}$$



Gambar 4.26 Grafik pengaruh penambahan kadar aspal terhadap permeabilitas

Sumber : Hasil Penelitian

Dari hasil pengujian permeabilitas yang ditampilkan pada tabel 4.28 dan gambar 4.26 menunjukkan bahwa saat kadar aspal meningkat dari 3% hingga 5%, nilai koefisien permeabilitas hanya mengalami sedikit perubahan. Nilai tertinggi terjadi pada kadar aspal 4% yaitu 0,1144 cm/dtk, lalu sedikit menurun pada kadar aspal 4,5% dan 5%. Berarti penambahan aspal tidak terlalu berpengaruh besar terhadap permeabilitas, meskipun ada sedikit peningkatan di titik tertentu. Nilai koefisien permeabilitas pada kadar aspal 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5% memenuhi spesifikasi AAPA yaitu $0,1 \text{ cm/dtk} < K < 0,5 \text{ cm/dtk}$.

4.10 Komposisi Campuran Aspal Porus Dengan Bahan Tambahan Serbuk Ban.

Setelah diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 4%, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan komposisi campuran aspal porus dengan menambahkan serbuk ban sebagai bahan tambahan. Penambahan serbuk ban ini bertujuan untuk melihat pengaruhnya terhadap sifat dan kinerja campuran aspal, seperti kekuatan, daya tahan, serta tingkat porositas. Dalam penelitian ini, serbuk ban ditambahkan dalam beberapa variasi kadar, yaitu 0% (sebagai kontrol/tanpa campuran), 1%, 3%, 6%, dan 9%. Setiap variasi akan diuji untuk mengetahui

perubahan karakteristik campuran, sehingga dapat dianalisis apakah serbuk ban memberikan manfaat, misalnya meningkatkan stabilitas atau memperbaiki struktur rongga (*void*), dan juga untuk menentukan kadar serbuk ban yang paling optimal bagi campuran aspal porus. Hasil perhitungan komposisi campuran aspal porus dengan tambahan serbuk ban dapat dilihat pada tabel 4.29.

Tabel 4.29 Komposisi campuran aspal porus dengan bahan tambahan serbuk ban

Jenis Material	% Proporsi Agg.	KADAR ASPAL OPTIMUM (%)				
		4,00 %				
		% Proporsi Campuran				
		1	2	3	4	5
10/10	47,87	45,96	45,96	45,96	45,96	45,96
5/10	37,82	36,31	36,31	36,31	36,31	36,31
0/5	12,81	12,29	12,29	12,29	12,29	12,29
Filler	1,50	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
Total	100,00	96,00	96,00	96,00	96,00	96,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Jenis Material	Komposisi (%)	KADAR ASPAL OPTIMUM (%)				
		4,00 %				
		SAMPEL SERBUK BAN				
		0%	1%	3%	6%	9%
		Berat Agregat (gr)				
10/10	47,87	551,5	551,5	551,5	551,5	551,5
5/10	37,82	435,7	431,4	422,8	409,8	396,9
0/5	12,81	147,5	147,5	147,5	147,5	147,5
Filler	1,50	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
Serbuk Ban		-	4,31	12,942	25,88	38,83
Berat total Ag. Camp. (gr)		1152	1152,0	1152,0	1152,0	1152,0
Berat aspal (gr)		48	48	48	48,0	48,0
Berat total campuran (gr)		1200	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Sumber : Hasil Penelitian

Perhitungan komposisi campuran aspal porus dengan penambahan serbuk ban bekas dilakukan dengan cara yang sama seperti perhitungan komposisi campuran saat mencari Kadar Aspal Optimum (KAO). Bedanya, dalam tahap ini terdapat bahan tambahan berupa serbuk ban yang dimasukkan ke dalam campuran. Penambahan serbuk ban ini tidak menambah total berat campuran, melainkan menggantikan sebagian dari agregat ukuran 5/10, karena ukuran partikel serbuk ban dianggap setara atau mendekati ukuran agregat tersebut. Dengan kata lain, serbuk ban disubstitusikan sebagian berat agregat 5/10, sesuai dengan kadar variasi yang digunakan yaitu 1%, 3%, 6%, dan 9%.

4.11 Pengujian Marshall Test Untuk Aspal Porus Dengan Tambahan Serbuk Ban

Tabel 4.30 Hasil Pengujian Marshall Untuk Aspal Porus Dengan Bahan Tambahan Serbuk Ban

Jenis Campuran : ASPAL PORUS						Berat jenis bulk agregat (S) : 2,65						Aspal : Pertamina				Kalibrasi marshall (W) : 29,80								
Jumlah Tumbukan : 50						Gmm test (T) : 2,508						Penetrasi : 60/70				Luas Permukaan Ag. (X) : 2,74								
Suhu : 145 °C						Berat jenis efektif ag. (U) = (100-Pb) / ((100/T) - (Pb/V)) : 2,664						B. jenis (V) : 1,041				Partikel lolos sar. #200 (Y) : 2,90								
Perkiraan kadar aspal rencana (Pb): Pb = 0,035 x (CA) + 0,045 x (FA) + 0,18 x (FF) + Konstanta (laston = 0,5 - 1 & lataston = 2- 3) : 4,00 %																								
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Srebut Ban	Kadar Aspal	Berat benda uji (gram)			Volume benda uji	Berat isi Gmb	Bj. maks. camp.	% Rongga			Stabilitas		Flow	MQ	% Absorsi aspal	% Kadar aspal eff.	Rasio Part. lolos sar. #200	T. film
								kering udara	dalam air	s.s.d				V . M . A	V . I . M	V . F . A	Bacaan dial	Koreksi						
						A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
	1	2	3	4	Rata - Rata			Lah. Test	Lah. Test	Lah. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100-A}{U} + \frac{A}{V}$	$\frac{100}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-I)}{I}$	Lah. Test	K. W. A.Koreksi	Lah. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100-US}{S \cdot U}$	$\frac{A-(100-A)O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-O}{XV(100-A)}$
1	62,8	62,2	62,4	62,0	62,35	0%	4,00	1115,7	632,4	1198,9	566,5	1,969		28,68	21,47	25,13	38	526,80	4,53	116,29				
2	61,9	62,0	61,8	62,0	61,93			1118,4	623,9	1197,2	573,3	1,951		29,35	22,21	24,32	39	546,07	4,44	122,99				
3	61,2	61,7	61,6	61,2	61,43			1114,3	628,8	1199,6	570,8	1,952		29,30	22,16	24,38	35	495,96	4,52	109,73				
Rata - Rata												1,957	2,508	29,11	21,95	24,61	37	522,94	4,50	116,34	0,199	3,81	0,76	13,90
1	60,8	60,8	60,5	60,6	60,68	1%	4,00	1115,3	625,2	1198,2	573,0	1,946		29,51	22,39	24,14	57	822,74	5,77	142,59				
2	61,7	61,4	61,3	61,8	61,55			1112,7	628,9	1201,8	572,9	1,942		29,66	22,56	23,96	58	819,40	5,89	139,12				
3	60,2	60,8	60,3	60,4	60,43			1107,9	624,9	1198,9	574,0	1,930		30,10	23,04	23,47	50	726,26	5,87	123,72				
Rata - Rata												1,940	2,508	29,76	22,66	23,86	55	789,47	5,84	135,14	0,199	3,81	0,76	13,90
1	60,4	60,2	60,3	60,2	60,28	3%	4,00	1109,8	621,5	1196,6	575,1	1,930		30,12	23,05	23,45	63	918,59	5,78	158,93				
2	62,3	62,2	62,3	62,1	62,23			1110,3	631,5	1212,6	581,1	1,911		30,81	23,81	22,70	62	862,02	6,43	134,06				
3	61,1	61,3	61,2	61,2	61,20			1114,7	613,3	1196,7	583,4	1,911		30,81	23,81	22,70	51	726,64	5,64	128,84				
Rata - Rata												1,917	2,508	30,58	23,56	22,95	59	835,75	5,95	140,61	0,199	3,81	0,76	13,90

Jenis Campuran : ASPAL PORUS						Berat jenis bulk agregat (S) : 2,651						Aspal : Pertamina				Kalibrasi marshall (W) : 29,80								
Jumlah Tumbukan : 50						Gmm test (T) : 2,508						Penetrasi : 60/70				Luas Permukaan Ag. (X) : 2,74								
Suhu : 145 °C						Berat jenis efektif ag. (U) = (100-Pb) / ((100/T) - (Pb/V)) : 2,664						B. jenis (V) : 1,041				Partikel lolos sar. #200 (Y) : 2,90								
Perkiraan kadar aspal rencana (Pb): Pb = 0,035 x (CA) + 0,045 x (FA) + 0,18 x (FF) + Konstanta (laston = 0,5 - 1 & lastaton = 2- 3) : 4,00 %																								
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Serbuk Ban	Kadar Aspal	Berat benda uji (gram)			Volume benda uji	Berat isi	Bj. maks. camp.	% Rongga			Stabilitas		Flow	MQ	% Absorsi aspal	% Kadar aspal eff.	Rasio Part. lolos sar. #200	T. film
								kering udara	dalam air	s.s.d				V . M . A	V . I . M	V . F . A	Bacaan dial	Koreksi						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R						
	1	2	3	4	Rata - Rata			Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100-A}{U} + \frac{A}{V}$	$\frac{100}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-D)}{I}$	Lab. Test	K.W. A.Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100-U \cdot S \cdot V}{S \cdot U}$	$\frac{A-(100-A)O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-Q}{XV(100-A)}$
1	63,6	63,2	62,8	63,0	63,15	6%	4,00	1113,6	620,7	1196,1	575,4	1,935		29,91	22,83	23,68	52	707,83	4,95	143,00				
2	62,8	63,0	63,7	63,5	63,25			1109,1	627,1	1198,9	571,8	1,940		29,76	22,66	23,86	53	719,83	4,92	146,31				
3	63,9	64,1	64,5	64,2	64,18			1112,9	624,8	1197,3	572,5	1,944		29,60	22,49	24,03	56	745,22	4,88	152,71				
Rata - Rata												1,940	2,508	29,76	22,66	23,86	54	724,29	4,92	147,34	0,199	3,81	0,76	13,90
1	64,1	63,9	64,3	64,5	64,20	9%	4,00	1110,6	620,3	1198,6	578,3	1,920		30,45	23,42	23,08	45	598,51	4,87	122,90				
2	63,8	63,1	63,0	63,4	63,33			1115,8	622,1	1199,8	577,7	1,931		30,05	22,99	23,52	30	406,77	4,77	85,28				
3	64,9	65,0	64,7	65,2	64,95			1111,3	621,5	1197,3	575,8	1,930		30,11	23,04	23,46	32	418,81	5,04	83,10				
Rata - Rata												1,927	2,508	30,20	23,15	23,35	36	474,69	4,89	97,09	0,199	3,81	0,76	13,90

Sumber : Hasil Penelitian

4.12 Hasil Pengujian Marshall Aspal Porus Dengan Bahan Tambahan Serbuk Ban

Penentuan kadar serbuk ban yang optimum untuk campuran aspal porus dilakukan dengan mengambil nilai rata-rata dari parameter Marshall, yaitu stabilitas, flow, MQ, VIM, VMA, dan VFA, berdasarkan hasil perhitungan parameter Marshall yang disajikan dalam grafik berikut :

4.12.1 Stabilitas



Gambar 4.27 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap stabilitas

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.27 terlihat bahwa penambahan serbuk ban dari 1% dan 3% menyebabkan peningkatan nilai stabilitas, yang berarti campuran menjadi lebih kuat dan mampu menahan beban lebih baik. Stabilitas tertinggi terjadi pada kadar serbuk ban 3% yaitu sebesar 835,75 kg, menunjukkan bahwa pada titik ini campuran memiliki daya ikat dan struktur terbaik. Namun, setelah kadar serbuk ban melebihi 3% yaitu pada kadar serbuk ban 6% dan 9%, nilai stabilitas mulai menurun, yang disebabkan oleh kelebihan bahan elastis dari serbuk ban sehingga struktur campuran menjadi kurang stabil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kadar serbuk ban 3% adalah yang paling baik untuk meningkatkan stabilitas campuran aspal porus dan penambahan serbuk ban sebesar 9% tidak memenuhi spesifikasi AAPA yaitu stabilitas > 500 kg.

4.12.2 Flow



Gambar 4.28 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap flow

Sumber : Hasil Penelitian

Dari gambar 4.28 dapat dilihat nilai flow berada pada range 4,50 mm sampai 6,17 mm pada kadar serbuk ban mulai dari 0%, 1%, 3%, 6%, dan 9%. Nilai flow tertinggi berada pada kadar serbuk ban 9% yaitu sebesar 6,17 mm. Pada kadar 0%, 1%, 3%, 6% serbuk ban mendapatkan nilai flow yang memenuhi spesifikasi AAPA yaitu $2 \text{ mm} < \text{flow} < 6 \text{ mm}$ sedangkan kadar 9% tidak memenuhi spesifikasi AAPA. Dari grafik dapat dilihat bahwa penambahan kadar serbuk ban menyebabkan peningkatan nilai flow, yang berarti semakin banyak serbuk ban yang ditambahkan maka campuran aspal menjadi lebih elastis atau lebih mudah berubah bentuk saat menerima beban.

4.12.3 Void in Mix (VIM)



Gambar 4.29 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap VIM

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.29 menunjukkan penambahan serbuk ban terhadap nilai VIM (*Voids in Mix*), yaitu persentase rongga udara dalam campuran aspal porus. Terlihat bahwa penambahan serbuk ban dari 0% hingga 9% menyebabkan perubahan nilai VIM

yang relatif kecil, dengan kecenderungan sedikit meningkat. Nilai VIM tetap berada dalam rentang standar, yaitu antara 18% hingga 25%, yang ditandai oleh dua garis merah pada grafik. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun serbuk ban ditambahkan hingga 9%, porositas campuran masih tetap terjaga dan tidak terjadi penyumbatan rongga secara signifikan, sehingga fungsi drainase pada aspal porus tetap dapat berfungsi dengan baik. Pada setiap penambahan kadar serbuk ban mendapatkan nilai flow yang memenuhi spesifikasi AAPA yaitu $18\% < \text{VIM} < 25\%$.

4.12.4 Void in Mineral Aggregate (VMA)



Gambar 4.30 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap VMA

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.30 menunjukkan pengaruh serbuk ban terhadap nilai VMA (*Void in Mineral Aggregate*) dalam campuran aspal porus. Terlihat bahwa nilai VMA mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar serbuk ban, dari 29,11% pada kadar 0% hingga mencapai 30,54% pada kadar 9%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban membuat susunan agregat menjadi sedikit lebih renggang, sehingga ruang kosong antar agregat bertambah. Hal ini masuk akal karena serbuk ban memiliki bentuk dan tekstur yang lebih ringan dan elastis dibanding agregat batuan, sehingga tidak mengisi ruang seefisien agregat mineral. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar serbuk ban, semakin besar nilai VMA, yang berarti semakin banyak volume kosong yang tersedia untuk diisi aspal dan udara dalam campuran.

4.12.5 Voids Filled with Asphalt (VFA)



Gambar 4.31 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap VFA

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.31 menunjukkan pengaruh serbuk ban terhadap nilai VFA (*Voids Filled with Asphalt*), yaitu persentase rongga antar agregat yang terisi oleh aspal. Dari grafik terlihat bahwa nilai VFA sedikit menurun pada awal penambahan serbuk ban, dari 24,61% pada kadar serbuk ban 0% kemudian menurun menjadi 23,29% pada kadar serbuk ban 3%, kemudian cenderung stabil dan sedikit meningkat menjadi 23,67% pada kadar serbuk ban 9%. Berdasarkan nilai VFA, pengaruh penambahan kadar serbuk ban tidak terlalu signifikan dan nilai VFA tetap berada dalam rentang yang tidak terlalu jauh dari kadar awal. Artinya, penambahan serbuk ban tidak memberikan perubahan besar terhadap VFA, dan efeknya cenderung kecil serta stabil.

4.12.6 Marshall Quotient (MQ)

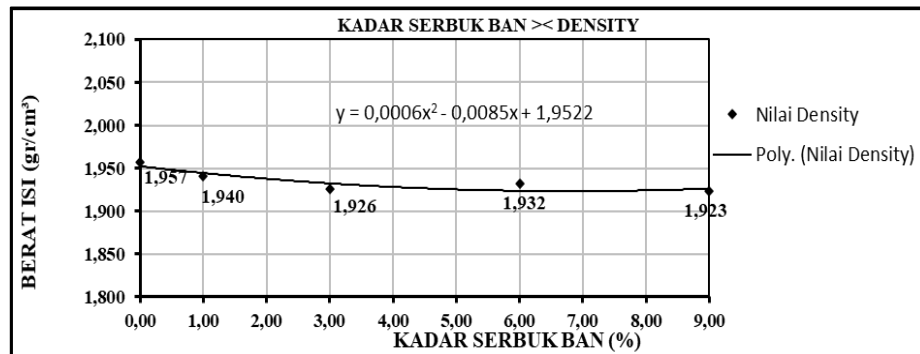


Gambar 4.32 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap MQ

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.32 menunjukkan pengaruh serbuk ban terhadap nilai MQ (*Marshall Quotient*), yaitu rasio antara stabilitas dan flow yang menggambarkan kekakuan campuran aspal. Terlihat bahwa nilai MQ meningkat dari 116,34 kg/mm pada 0% serbuk ban menjadi 137,38 kg/mm pada 2%, dan mencapai puncaknya di 140,61 kg/mm pada 3%, yang menunjukkan bahwa campuran menjadi paling kaku dan kuat pada kadar ini. Setelah itu, nilai MQ mulai menurun menjadi 121,52 kg/mm pada 6% dan turun drastis ke 77,06 kg/mm pada 9%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban dalam jumlah sedang dapat meningkatkan kekakuan campuran, tetapi jika terlalu banyak justru menyebabkan campuran menjadi lebih lunak dan kurang stabil.

4.12.7 Berat Isi (*Density*)



Gambar 4.33 Grafik pengaruh penambahan kadar serbuk ban terhadap *density*

Sumber : Hasil Penelitian

Dari gambar 4.33, grafik tersebut menunjukkan pengaruh serbuk ban terhadap berat isi (*density*) campuran aspal porus dalam satuan gr/cm³. Terlihat bahwa semakin tinggi kadar serbuk ban, nilai *density* cenderung menurun. Pada kadar 0%, nilai *density* tercatat sebesar 1,957 gr/cm³, kemudian menurun menjadi 1,940 gr/cm³ pada 1%, 1,926 gr/cm³ pada 3%, dan mencapai titik terendah 1,926 gr/cm³ pada kadar tersebut. Setelah itu, terjadi sedikit kenaikan menjadi 1,932 gr/cm³ pada 6%, lalu turun lagi menjadi 1,923 gr/cm³ pada 9%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban cenderung menurunkan berat isi campuran karena serbuk ban memiliki massa jenis

yang lebih ringan dibandingkan agregat mineral, sehingga semakin banyak serbuk ban yang digunakan, semakin ringan dan berpori campuran tersebut.

4.13 Perhitungan Kadar Serbuk Ban Optimum Pada Campuran Aspal Porus

Setelah mendapatkan hasil pengujian dan analisis grafik dari campuran aspal porus dengan menggunakan bahan tambahan serbuk ban, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan kadar serbuk ban optimum dalam campuran aspal porus. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.31 sebagai berikut :

Tabel 4.31 Hasil Perhitungan kadar serbuk ban optimum pada campuran aspal porus

Parameter	a	b	c	x optimum (%)	y optimum
Stabilitas	-12,993	95,431	654,580	3,67	829,8104
Flow	-0,0332	0,4289	4,8765	6,46	6,2617
VIM	-0,0462	0,4578	22,097	4,95	23,2311
VMA	-0,0262	0,3709	29,257	7,08	30,5697
VFA	-0,1159	0,8858	24,673	3,82	26,3655
MQ	-1,3660	5,9040	134,80	2,16	141,1794
Density	0,0006	-0,0085	1,9522	7,08	1,9221

Perhitungan dilakukan menggunakan rumus persamaan polynomial sebagai berikut :

$$X \text{ optimum} = - \frac{b}{2 \times a}$$

$$Y \text{ optimum} = a \times X^2 + b \times X + c$$

Contoh perhitungan :

$$\begin{aligned}
 X \text{ optimum} &= - \frac{b}{2 \times a} \\
 &= - \frac{95,431}{2 \times (-12,993)} \\
 &= 3,67
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y \text{ optimum} &= a \times X^2 + b \times X + c \\
 &= -12,993 \times 3,67^2 + 95,431 \times 3,67 + 654,580 \\
 &= 829,81
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan X optimum dan Y optimum, didapatkan nilai Y optimum pada flow sebesar 6,26 mm yang melebihi batas maksimum flow yaitu 6 mm, tetapi pada parameter lain masih memenuhi spesifikasi AAPA. Sehingga setelah

didapatkan semua nilai X optimum dari semua parameter pengujian marshall, di ambil nilai rata-rata dari nilai X optimum yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{X optimum (Kadar serbuk ban optimum)} &= \frac{3,67+6,46+4,95+7,08+3,82+2,16+7,08}{2} \\ &= 5,03 \% \approx 5\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan hasil 5% sebagai nilai optimum penggunaan serbuk ban.

4.14 Pengujian Permabilitas Pada Aspal Porus Dengan Bahan Tambahan Serbuk Ban

Pengujian parameter permeabilitas dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan campuran aspal porus dengan bahan tambahan serbuk ban dalam menyerap atau mengalirkan air. Pengujian permeabilitas ini dilakukan pada setiap kadar penambahan serbuk ban untuk mengetahui penyerapan air pada aspal porus dengan tambahan serbuk ban. Pengujian ini dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Nasional Malang. Permeabilitas merupakan sifat suatu material berpori yang memungkinkan cairan melewati atau mengalir melalui media tersebut. Nilai pengujian permeabilitas pada setiap kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan grafik :

Tabel 4.32 Hasil Pengujian Permeabilitas Pada Setiap Kadar Serbuk Ban

Kadar Serbuk Ban	A (cm2)	L (cm)	Dia. Sampel (cm)	a (cm2)	t (detik)	h1 (cm)	h2 (cm)	A x L	a x t	log(h1/h2)	K (cm/dtk)	Rata-rata K (cm/dtk)
0%	3,63	7,41	10,49	86,381	4,11	70	15	26,898	355,0279	0,669006781	0,1166	0,1144
	3,63	7,46	10,78	91,224	4,16	70	15	27,080	379,4902	0,669006781	0,1098	
	3,63	7,44	10,46	85,888	4,14	70	15	27,007	355,5768	0,669006781	0,1169	
1%	3,63	7,37	10,61	88,369	4,08	70	15	26,753	360,5459	0,669006781	0,1142	0,1148
	3,63	7,34	10,44	85,560	4,07	70	15	26,644	348,2291	0,669006781	0,1177	
	3,63	7,38	10,73	90,379	4,05	70	15	26,789	366,0363	0,669006781	0,1126	
3%	3,63	7,22	10,52	86,876	4,12	70	15	26,209	357,9302	0,669006781	0,1127	0,1155
	3,63	7,26	10,54	87,207	4,01	70	15	26,354	349,6997	0,669006781	0,1160	
	3,63	7,32	10,35	84,091	4,13	70	15	26,572	347,2965	0,669006781	0,1177	
6%	3,63	7,41	10,49	86,381	4,67	70	15	26,898	403,4015	0,669006781	0,1026	0,1058
	3,63	7,41	10,78	91,224	4,54	70	15	26,898	414,1551	0,669006781	0,0999	
	3,63	7,44	10,46	85,888	4,21	70	15	27,007	361,5889	0,669006781	0,1149	
9%	3,63	7,25	10,47	86,052	5,01	70	15	26,318	431,1226	0,669006781	0,0939	0,0921
	3,63	7,36	10,55	87,372	5,12	70	15	26,717	447,347	0,669006781	0,0919	
	3,63	7,49	10,67	89,371	5,18	70	15	27,189	462,9438	0,669006781	0,0904	

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas digunakan rumus :

$$K = 2,3 \times \frac{A \times L}{a \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Dimana :

K = koefisien permeabilitas air (cm/dtk)

h_1 = tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)

h_2 = tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)

a = luas potongan spesimen (cm²)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h_1 ke h_2 (detik)

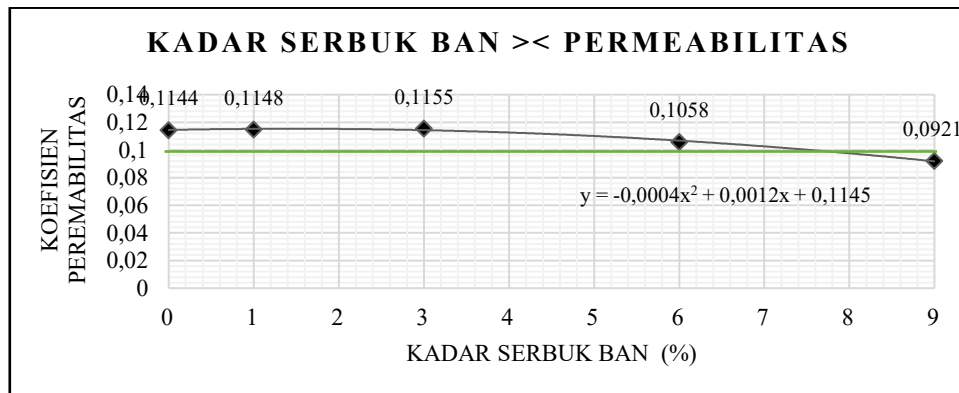
L = tebal benda uji (cm)

A = luas potongan melintang tabung (cm²)

Contoh Perhitungan :

$$K = 2,3 \times \frac{3,63 \times 7,41}{86,381 \times 4,11} \times \log \left(\frac{70}{15} \right)$$

$$= 0,1166 \text{ cm/dtk}$$



Gambar 4.34 Grafik hubungan antar kadar serbuk ban dan permabilitas

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar 4.34 terlihat bahwa nilai permeabilitas cenderung menurun seiring dengan peningkatan kadar serbuk ban. Pada kadar 0%, nilai koefisien permeabilitas sebesar 0,1144 cm/dtk, lalu sedikit meningkat menjadi 0,1148 cm/dtk pada 1% dan 0,1155 cm/dtk pada 3%, namun kemudian menurun menjadi 0,1058 cm/dtk pada 6% dan 0,0921 cm/dtk pada 9%. Berdasarkan spesifikasi AAPA, nilai permeabilitas yang disyaratkan berada pada rentang $0,1 \text{ cm/dtk} < K < 0,5 \text{ cm/dtk}$, sehingga campuran

dengan kadar serbuk ban 0%, 1%, 3%, dan 6% masih memenuhi syarat tersebut. Namun pada kadar 9%, nilai 0,0921 cm/dtk sudah berada di bawah batas minimum, sehingga tidak memenuhi spesifikasi AAPA. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban secara berlebihan dapat mengurangi kemampuan aspal porus untuk mengalirkan air.

4.15 Rekap Perbandingan Hasil Parameter Pengujian Marshall dan Permeabilitas

Rekap perbandingan hasil parameter pengujian antara campuran aspal porus kadar aspal optimum (KAO) dan campuran yang telah ditambahkan serbuk ban dengan berbagai variasi kadar. Tujuan dari pembahasan ini adalah untuk melihat perbandingan nilai hasil pengujian yang dipengaruhi oleh penambahan serbuk ban terhadap sifat-sifat fisik dan mekanik dari campuran aspal porus, yang meliputi parameter seperti stabilitas, flow, kadar rongga (VIM, VMA, VFA), nilai *Marshall Quotient* (MQ), densitas, dan permeabilitas.

Tabel 4.33 Rekap Perbandingan Hasil Parameter Pengujian KAO dan Campuran Serbuk Ban Pada Aspal Porus

Parameter Pengujian	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Kadar Serbuk Ban			
	4%	1%	3%	6%	9%
Stabilitas (Kg)	688,36	789,47	835,75	724,29	474,69
Flow (mm)	5,70	5,75	5,95	5,96	6,17
VIM (%)	23,56	22,64	23,22	22,96	23,31
VMA (%)	30,58	29,74	30,26	30,35	30,54
VFA (%)	22,95	23,88	23,29	23,31	23,67
MQ (Kg/mm)	120,67	137,38	140,61	121,52	77,06
Density gr/cm ³	1,917	1,940	1,926	1,932	1,923
Permeabilitas	0,1144	0,1148	0,1155	0,1058	0,0921

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan tabel rekap perbandingan hasil parameter pengujian Kadar Aspal Optimum (KAO) dan campuran serbuk ban pada aspal porus, dapat disimpulkan bahwa penambahan serbuk ban memberikan pengaruh terhadap karakteristik campuran aspal porus. Terlihat bahwa nilai-nilai parameter seperti stabilitas, flow, dan nilai VIM mengalami perubahan setelah ditamhakkannya serbuk ban, sehingga adanya

modifikasi sifat mekanik dan fisik campuran. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk ban dapat berperan sebagai bahan tambahan yang memengaruhi kinerja aspal porus, baik dalam meningkatkan daya tahan maupun mengubah struktur pori campuran aspal tersebut.

4.16 Pengujian Hipotesis

Hasil pengujian hipotesis diperoleh melalui analisis statistik dengan mengamati nilai P-value yang tercantum pada tabel masing-masing parameter marshall. Uji ANOVA ini digunakan untuk menilai seberapa signifikan pengaruh variabel X (variasi kadar serbuk ban) terhadap variabel Y (parameter karakteristik marshall campuran aspal porus). Hasil nilai P-value $< 0,05$ menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan dalam variasi tersebut. Pengujian ANOVA dalam penelitian ini menggunakan *software* minitab versi 22.

4.16.1 Stabilitas

Tabel 4.34 Hasil ANOVA terhadap nilai stabilitas

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	254245	63561	12,51	0,001
Error	10	50817	5082		
Total	14	305063			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.34 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai stabilitas yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,001 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa perubahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi stabilitas. Pengaruh yang dihasilkan dari variasi serbuk ban cenderung positif karena mengalami kenaikan nilai stabilitas yaitu pada kadar serbuk ban 1% dan 3%. Sehingga dapat dipertimbangkan sebagai bahan campuran aspal porus menggunakan kadar serbuk ban tersebut.

4.16.2 Flow

Tabel 4.35 Hasil ANOVA terhadap nilai Flow

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	5,3748	1,34369	36,34	0,00001
Error	10	0,3698	0,03698		
Total	14	5,7446			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.35 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai flow yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,00001 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa perubahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi flow yang dihasilkan. Pengaruh yang dihasilkan dari variasi serbuk ban cenderung positif karena mengalami kenaikan nilai flow dari kadar 1%, 3%, dan 6%.

4.16.3 Void in Mix (VIM)

Tabel 4.36 Hasil ANOVA terhadap nilai VIM

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	2,7596	0,68990	7,21	0,005
Error	10	0,9564	0,09564		
Total	14	3,7160			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.36 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VIM yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,005 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa perubahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi VIM yang dihasilkan. Pengaruh yang dihasilkan dari variasi serbuk ban cenderung positif karena mengalami kenaikan nilai VIM yaitu pada kadar 1% dan 3% kemudian mengalami penurunan pada kadar 6% dan 9%.

4.16.4 *Void in Mineral Aggregate (VMA)*

Tabel 4.37 Hasil ANOVA terhadap nilai VMA

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	4,0158	1,00396	14,48	0,0004
Error	10	0,6932	0,06932		
Total	14	4,7091			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.37 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VMA yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,0004 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa perubahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi VMA yang dihasilkan. Pengaruh yang dihasilkan dari penambahan serbuk ban pada campuran aspal porus cenderung positif karena mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kadar serbuk ban.

4.16.5 *Void Filled with Asphalt (VFA)*

Tabel 4.38 Hasil ANOVA terhadap nilai VFA

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	17,186	4,2964	31,20	0,00001
Error	10	1,377	0,1377		
Total	14	18,563			

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil ANOVA pada tabel 4.38 diperoleh nilai P-value sebesar $0,00001 < 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban berpengaruh secara signifikan terhadap nilai VFA (*Void Filled with Asphalt*). Pengaruh yang dihasilkan dari penambahan serbuk ban pada campuran aspal porus cenderung positif karena mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kadar serbuk ban.

4.16.6 Marshall Quotient (MQ)

Tabel 4.39 Hasil ANOVA terhadap nilai MQ

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	8402	2100,4	14,17	0,0004
Error	10	1482	148,2		
Total	14	9884			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.39 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai MQ yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,0004 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa perubahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi nilai MQ yang dihasilkan. Pengaruh yang diberikan dari kadar serbuk ban terhadap nilai MQ cenderung positif karena nilai MQ mengalami peningkatan dari kadar serbuk ban 1% dan 3%.

4.16.7 Berat Isi (*Density*)

Tabel 4.40 Hasil ANOVA terhadap nilai *density*

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	4	0,002289	0,000572	8,43	0,003
Error	10	0,000679	0,000068		
Total	14	0,002967			

Sumber : Hasil Penelitian

Pada tabel 4.40 menunjukkan bahwa variasi kadar serbuk ban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *density* yang dinyatakan dalam P-value sebesar $0,003 < 0,05$. Hal ini berarti bahwa penambahan kadar serbuk ban dalam campuran secara nyata dan signifikan memengaruhi nilai *density* yang dihasilkan.