

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Pemeriksaan Mutu Bahan**

Penelitian ini menggunakan beberapa material utama yaitu agregat kasar dan halus, aspal minyak penetrasi 60/70, filler dari semen, serta serat tambahan berbahan synthetic fiber (nylon). Seluruh material agregat dan aspal diperoleh dari Asphalt Mixing Plant (AMP) milik PT. SRIWIJAYA 87 Malang, sedangkan seluruh proses pengujian laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang Dan Laboratorium Transportasi ITN Malang yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh bahan memenuhi spesifikasi teknis dalam perkerasan aspal porous.

#### **4.2 Pengujian Agregat**

Agregat terdiri dari fraksi kasar dan halus dengan gradasi yang disesuaikan untuk campuran berpori. Berdasarkan hasil uji analisis saringan, agregat memiliki distribusi ukuran partikel yang memenuhi syarat SNI dan spesifikasi Bina Marga untuk aspal porous. Agregat juga lolos uji kekekalan (soundness) dan keausan (abrasi), yang menunjukkan daya tahan terhadap cuaca dan beban. Kondisi agregat bersih dari kotoran, bebas dari bahan organik, dan memiliki bentuk butiran yang baik untuk stabilitas campuran. Sebelum dilakukan pengujian, agregat yang digunakan diamati secara visual untuk memastikan kondisi fisiknya sesuai standar. Secara umum, agregat berada dalam kondisi bersih, kering, tidak mengandung tanah, lumpur, atau bahan organik, serta tidak menunjukkan perubahan warna yang mencurigakan.

Agregat kasar memiliki bentuk butiran bersudut tajam, permukaan kasar, dan kekerasan tinggi. Ciri ini mendukung kemampuan agregat untuk saling mengunci (interlocking) dalam campuran dan memberikan kekuatan struktural yang baik. Sebaliknya, agregat halus memiliki bentuk butiran lebih kecil dan agak membulat, namun tetap bertekstur kasar. Agregat halus berfungsi mengisi

rongga antar butiran agregat kasar serta membantu meningkatkan kepadatan campuran.

#### 4.2.1 Pengujian Analisa Saringan Agregat 0 – 5

Perhitungan :

##### Sampel 1

Ukuran Saringan No 8 (2,36 mm)

Berat Tertahan = 63,8 gram ( Hasil Analisa )

Berat Kumulatif = Berat Tertahan + Berat Kumulatif  
(sebelumnya)

$$= 63,8 + 2,19$$

$$= 65,94 \text{ gram}$$

Presentase Tertahan = Berat kumulatif x 100 / Total Berat tertahan

$$= 65,94 \times 100 / 539,4$$

$$= 12,22 \text{ gram}$$

Presentase Lolos = 100 – Presentse tertahan

$$= 100 - 12,22$$

$$= 87,78 \text{ gram}$$

Dan begitu juga untuk perhitungan untuk agregat 5/10 , 10/10.

Berdasarkan perhitungan di atas, nilai-nilai tersebut digunakan untuk memperoleh hasil pengujian agregat pada sampel yang diuji. Perhitungan berat tertahan pada masing-masing saringan menunjukkan distribusi ukuran agregat dalam campuran. Nilai kumulatif tertahan yang didapatkan selanjutnya dihitung untuk menentukan persentase tertahan dan persentase lolos pada setiap ukuran saringan.

**Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 0 - 5**

Ukuran saringan	Berat tertahan (gram)		Kumulatif (gram)		Prosentase				Rata - Rata Prosentase Lolos
					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
⅜" (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

Hasil analisis saringan agregat 0-5 menunjukkan bahwa material tergolong sebagai agregat halus, ditandai dengan rata-rata persentase lolos saringan No. 4 sebesar 99,56%. Selain itu, persentase lolos saringan No. 200 sebesar 9,98% masih berada di bawah batas maksimal 10% menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Dengan demikian, agregat yang digunakan dinyatakan memenuhi spesifikasi dan layak untuk digunakan dalam campuran aspal porous.

**Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 5 – 10**

Ukuran saringan	Berat tertahan (gram)		Kumulatif (gram)		Prosentase				Rata - Rata Prosentase Lolos
					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)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
⅜" (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

Berdasarkan hasil pengujian analisa saringan, agregat 5–10 tergolong sebagai agregat kasar, ditunjukkan oleh nilai rata-rata persentase lolos saringan No. 4 sebesar 24,89%, sehingga sebagian besar butiran tertahan di atas saringan No. 4. Selain itu, persentase lolos saringan No. 200 hanya sebesar 0,26%, masih berada jauh di bawah batas maksimum 1% untuk agregat kasar menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Dengan demikian, agregat ini memenuhi persyaratan spesifikasi dan sesuai digunakan dalam campuran.

**Gambar 4. 3** Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat 10 – 10

Ukuran saringan	Berat tertahan (gram)		Kumulatif (gram)		Prosentase				Rata - Rata Prosentase Lolos
	I	II	I	II	tertahan		Lolos		
					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
3/8" (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

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3, agregat 10–10 dikategorikan sebagai agregat kasar, ditunjukkan oleh rata-rata persentase lolos saringan No. 4 sebesar 0,16%, yang berarti hampir seluruh partikel tertahan di atas saringan tersebut. Selain itu, nilai rata-rata persentase lolos saringan No. 200 adalah 0,14%, masih jauh di bawah batas maksimum 1% untuk agregat kasar sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.. Dengan demikian, agregat ini telah memenuhi syarat spesifikasi dan layak digunakan dalam campuran aspal porus.

Hasil pengujian material menunjukkan bahwa agregat kasar dan halus yang digunakan telah sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Berdasarkan standar tersebut, persentase butiran yang lolos saringan No.200

maksimal adalah 1% untuk agregat kasar dan 10% untuk agregat halus. Dari hasil pengujian, agregat kasar tidak menunjukkan adanya butiran yang lolos saringan No.200 (0%), sementara agregat halus memiliki persentase lolos sebesar 5,52%.

Penggunaan agregat dengan kadar partikel halus yang tinggi dalam campuran beton aspal dapat berdampak negatif terhadap kualitas campuran. Hal ini dikarenakan butiran halus dapat melapisi permukaan agregat kasar, yang menyebabkan menurunnya ikatan antara agregat dan aspal sebagai bahan perekat. Dampaknya, kekuatan ikatan menjadi lemah dan mudah terlepas. Data hasil analisis saringan terhadap agregat kasar, sedang, dan halus ini nantinya akan digunakan sebagai dasar dalam proses perancangan campuran (Mix Design) untuk menentukan proporsi material yang paling optimal.

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

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis curah (bulk), berat jenis dalam kondisi jenuh permukaan kering (saturated surface dry/SSD), berat jenis semu (apparent), serta tingkat penyerapan air (absorpsi) pada agregat kasar. Kegiatan pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang yang beralamat di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang.

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 :

Bk = Berat benda uji kering oven (gr)

Bj = Berat contoh keringa permukaan jenuh (gr)

B = Berat piknometer berisi air (gr)

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

Percobaan Sampel I : Bk = 485,81  
 : Bj = 500,06  
 : B = 667,04  
 : Bt = 978,74

Maka Perhitungan :

Berat jenis (*bulk*)  $= \frac{Bk}{B + Bj - Bt}$   
 $= \frac{485,81}{667,06 + 500,06 - 978,74}$   
 $= 2,58$

Berat jenis permukaan jenuh  $= \frac{Bj}{B + Bj - Bt}$   
 $= \frac{500,06}{667,04 + 500,06 - 978,74}$   
 $= 2,65$

Berat jenis semu (*apparent*)  $= \frac{Bk}{B + Bk - Bt}$   
 $= \frac{485,81}{667,04 + 485,81 - 978,74}$   
 $= 2,79$

Penyerapan (*absorpsi*)  $= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$   
 $= \frac{500,06 - 485,81}{485,81} \times 100\%$   
 $= 2,93 \%$

**Tabel 4.1** Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus 0 – 5

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B <sub>k</sub>	485,81	492,28	489,05
Berat contoh kering permukaan jenuh	B <sub>j</sub>	500,06	500,09	500,08
Berat piknometer diisi air pada 25°C	B	667,04	647,21	657,13
Berat piknometer + contoh + air (25°C)	B <sub>t</sub>	978,74	958,55	968,65
Berat Jenis (bulk)	$\frac{B_k}{(B + B_j - B_t)}$	2,58	2,61	2,59
Berat jenis kering permukaan jenuh	$\frac{B_j}{(B + B_j - B_t)}$	2,65	2,65	2,65
Berat jenis semu (apparent)	$\frac{B_k}{(B + B_k - B_t)}$	2,79	2,72	2,76
Penyerapan (absorbpsi)	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100 \%$	2,93%	1,59%	2,26%

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian terhadap berat jenis dan daya serap agregat ukuran 0 – 5 mm, diperoleh nilai rata-rata dari dua sampel dengan berat jenis sebesar 2,59 dan tingkat penyerapan air sebesar 2,26%. Dengan demikian, hasil tersebut telah memenuhi ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni berat jenis harus lebih dari 2,5 dan penyerapan air kurang dari 3%.

**Tabel 4.2** Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar 5 – 10

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B <sub>k</sub>	2794,4	2552	2673,2
Berat contoh kering permukaan jenuh	B <sub>j</sub>	2864,4	2613	2738,7
Berat contoh di dalam air	B <sub>a</sub>	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 (absorbpsi)	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100 \%$	2,51%	2,39%	2,45%

Sumber: Hasil Penelitian

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).

**Tabel 4.3** Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar 10 -10

URAIAN		I	II	Rata-rata
Berat contoh kering oven	B <sub>k</sub>	3321,5	3235	3278,25
Berat contoh kering permukaan jenuh	B <sub>j</sub>	3381,1	3292	1668,275
Berat contoh di dalam air	B <sub>a</sub>	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

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat ukuran 10 – 10 mm menunjukkan bahwa rata-rata dari dua sampel memiliki berat jenis sebesar 2,67 dan tingkat penyerapan sebesar 1,78%. Berdasarkan nilai tersebut, agregat telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berat jenis lebih dari 2,5 dan penyerapan air kurang dari 3%.

#### **4.2.3 Pengujian Keausan Agregat Normal dengan Menggunakan Alat Abrasi Los Angeles ( SNI 2417 – 2008 )**

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat ketahanan agregat kasar berukuran kurang dari 37,5 mm (1 ½”) terhadap keausan dengan menggunakan mesin Los Angeles. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Hasil pengujian tersebut dapat dijabarkan melalui perhitungan berikut:

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

Keterangan:

A = Berat benda uji semula (gram)

B = berat benda uji tertahan di saringan No.12 dan No. 4 (gram)

Hasil Pengujian agregat dengan menggunakan alat abrasi los angeles (100) putaran dan (500) putaran sebagai berikut:

Perhitungan keausan Los Angeles (100) Putaran

$$\text{Percobaan Sampel I} = \frac{5000 - 4833,4}{5000,0} \times 100\% = 3,33$$

$$\text{Percobaan Sampel II} = \frac{5000 - 4803,0}{5000,0} \times 100\% \times 100\% = 3,94$$

$$\text{Nilai Rata-rata Keausan} = 3,64$$

**Tabel 4.4** Hasil pengujian agregat Normal 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")				
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")	2500		2500	
9,50 mm (3/8")	6,30 mm (1/4")	2500		2500	
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			
Catatan :					
Keausan = 3,64 % ≤ 8 %					

Sumber : Hasil Penelitian

Pengujian abrasi Los Angeles dilakukan terhadap agregat normal fraksi 10–10 mm menggunakan alat Los Angeles dengan 500 putaran untuk mengetahui tingkat keausan agregat. Berdasarkan hasil pengujian, berat awal benda uji untuk masing-masing sampel adalah 5000 gram. Setelah pengujian, diperoleh berat tertahan pada saringan No. 12 sebesar 4833,4 gram untuk sampel I dan 4803,0 gram untuk sampel II. Dari data tersebut, diperoleh nilai keausan masing-masing sampel sebesar 3,33% dan 3,94%, dengan rata-rata keausan sebesar 3,64%. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum 8% sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Dengan demikian, agregat yang diuji memiliki daya tahan aus

yang baik dan layak digunakan dalam campuran aspal porus atau konstruksi perkerasan jalan.

**Tabel 4.5** Hasil pengujian agregat Normal 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")	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		-	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			
Catatan :					
Keausan = 15,98 % ≤ 40 %					

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian pada sampel I dan sampel II, diperoleh rata-rata tingkat keausan sebesar 3,64% untuk abrasi dengan 100 kali putaran, dan sebesar 15,98% untuk abrasi dengan 500 kali putaran. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mensyaratkan nilai abrasi maksimum 8% untuk 100 putaran dan maksimum 40% untuk 500 putaran.

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

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengukur kadar material halus yang melewati saringan 0,075 mm (No. 200) pada agregat mineral melalui metode pencucian. Selama proses pencucian, partikel lempung, agregat halus yang terlarut, serta bahan lain yang dapat larut dalam air akan terpisah dari agregat utama. Pengujian terhadap material yang lolos saringan No. 200 ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang beralamat di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel. Hasil Pengujian Material Lolos Ayakan No.200 Agregat Kasar dan Agregat Halus sebagai 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)

Perhitungan bahan Lolos Ayakan No.200 Agregat Kasar 10/10:

Sampel I

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

$$\text{Lolos No. 200 (A)} = \frac{3384,0 - 3347,7}{3384} \times 100 \%$$

$$= 1,0$$

**Tabel 4.6** Hasil Pengujian Material Agregat Normal Lolos Ayakan No.200 Agregat 10/10

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W <sub>1</sub> )	(gram)	381,8	186,2
Berat tempat + contoh awal	(W <sub>2</sub> )	(gram)	3765,8	3995,8
Berat contoh awal	W <sub>3</sub> = W <sub>1</sub> - W <sub>2</sub>	(gram)	3384,0	3809,6
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W <sub>4</sub> )	(gram)	3729,5	3969,4
Berat contoh oven	W <sub>5</sub> = W <sub>4</sub> - W <sub>1</sub>	(gram)	3347,7	3783,2
Jumlah bahan lewat saringan no. 200	$W_6 = \frac{W_3 - W_5}{W_3} \times 100\%$		1,07	0,69
Jumlah bahan lewat saringan no. 200 rata - rata %			0,88	

Sumber: Hasil Penelitian

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah material halus yang lolos saringan No. 200 pada agregat normal ukuran 10/10. Berdasarkan hasil pengujian, sampel I memiliki berat awal contoh sebesar 3384,0 gram, sedangkan sampel II sebesar 3809,6 gram. Setelah melalui proses pencucian dan pengeringan, diperoleh berat contoh oven masing-masing sebesar 3347,7 gram untuk sampel I dan 3783,2 gram untuk sampel II. Hasilnya, jumlah bahan yang lolos saringan No. 200 adalah 1,07% untuk sampel I dan 0,69% untuk sampel II, dengan rata-rata sebesar 0,88%. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum 1% untuk agregat kasar sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga agregat tersebut dinyatakan memenuhi syarat kualitas.

**Tabel 4.7** Hasil Pengujian Material Agregat Normal Lolos Ayakan No.200  
*Agregat 5/10*

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W <sub>1</sub> )	(gram)	343,1	343,1
Berat tempat + contoh awal	(W <sub>2</sub> )	(gram)	2721,6	2923,1
Berat contoh awal	W <sub>3</sub> = W <sub>1</sub> - W <sub>2</sub>	(gram)	2378,5	2580,0
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W <sub>4</sub> )	(gram)	2699,6	2898,4
Berat contoh oven	W <sub>5</sub> = W <sub>4</sub> - W <sub>1</sub>	(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

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase material halus pada agregat ukuran 5/10 yang lolos saringan No. 200. Berat awal contoh pada sampel I sebesar 2378,5 gram, dan pada sampel II sebesar 2580,0 gram. Setelah dilakukan pencucian dan pengeringan, diperoleh berat contoh oven masing-masing sebesar 2356,5 gram (sampel I) dan 2555,3 gram (sampel II). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jumlah bahan yang lolos saringan No. 200 adalah 0,92% untuk sampel I dan 0,96% untuk sampel II, dengan rata-rata sebesar 0,94%. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum 1% untuk agregat kasar menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Dengan demikian, agregat 5/10 yang diuji memenuhi syarat kelulusan gradasi halus dan layak digunakan dalam campuran aspal.

**Tabel 4.8** Hasil Pengujian Material Agregat Normal Lolos Ayakan No.200 Agregat 0/5

Nomor test			I	II
Berat tempat	(W <sub>1</sub> )	(gram)	119,1	119,1
Berat tempat + contoh awal	(W <sub>2</sub> )	(gram)	801,6	802,2
Berat contoh awal	W <sub>3</sub> = W <sub>1</sub> - W <sub>2</sub>	(gram)	682,5	683,0
Data contoh setelah pencucian dengan air, kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven stlh cuci	(W <sub>4</sub> )	(gram)	733,5	735,9
Berat contoh oven	W <sub>5</sub> = W <sub>4</sub> - W <sub>1</sub>	(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

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui persentase material yang lolos ayakan No. 200 pada agregat halus (pasir). Berat contoh awal pada sampel I sebesar 682,5 gram dan sampel II sebesar 683,0 gram. Setelah proses pencucian dan pengeringan, diperoleh berat contoh oven masing-masing sebesar 614,4 gram dan 616,8 gram. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa persentase material yang lolos saringan No. 200 adalah 9,98% (sampel I) dan 9,70% (sampel II), dengan rata-rata sebesar 9,84%. Nilai ini masih berada dalam batas maksimum 10% menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk agregat halus. Oleh karena itu, agregat halus yang digunakan dapat dikategorikan sebagai agregat halus yang baik dan sesuai standar.

Berdasarkan hasil pengujian pada sampel I dan II, diperoleh rata-rata persentase material yang lolos saringan No. 200 untuk agregat kasar 10/10 sebesar 0,88%. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat tersebut memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan batas maksimum lolos saringan No. 200 sebesar  $\leq 1\%$ .

#### 4.2.5 Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir – Butir Mudah Pecah dalam Agregat Normal ( SNI 4141 – 2015 )

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui persentase gumpalan serta butiran agregat yang mudah hancur. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang yang beralamat di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Hasil dari pengujian disajikan dalam bentuk tabel.

Berikut merupakan hasil pengujian terhadap gumpalan lempung dan butiran yang mudah hancur pada agregat halus normal ukuran 0 – 5. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus 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 saringan setelah dilakukan penyaringan basah (gr)  
Perhitungan gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam

Sampel I:

$$P = \frac{264,0 - 262,1}{264,0} \times 100\%$$

$$= 0,72$$

**Tabel 4.9** Hasil Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir mudah pecah dalam agregat Normal 0/5

Nomor Test			I	II
Berat tempat	(W <sub>1</sub> )	(gram)	126,4	133,6
Berat tempat + contoh awal	(W <sub>2</sub> )	(gram)	390,4	394,9
Berat contoh awal	(W <sub>3</sub> ) = (W <sub>2</sub> ) - (W <sub>1</sub> )	(gram)	264,0	261,3
Data contoh setelah di ayak saringan No. 20 , kemudian dikeringkan dengan oven				
Berat tempat + contoh oven	(W <sub>4</sub> )	(gram)	388,5	392,9
Berat contoh oven	W <sub>5</sub> = W <sub>4</sub> - W <sub>1</sub>	(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 terhadap kedua sampel agregat normal menunjukkan bahwa rata-rata persentase gumpalan lempung dan butiran yang mudah pecah adalah sebesar 0,74%. Dengan demikian, hasil ini telah memenuhi ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu nilai maksimum sebesar  $\leq 1\%$ .

#### **4.2.6 Pengujian Setara Pasir Untuk Menguji Agregat Halus yang Mengandung Bahan Plastis ( SNI 03 – 4428 – 1997 )**

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:

$$\begin{aligned}\text{Nilai setara pasir} &= \frac{B}{A} \times 100\% \\ &= \frac{3}{4} \times 100\% \\ &= 75\% \\ \% &= 76,32 \%\end{aligned}$$

Pengujian setara pasir adalah metode yang digunakan untuk menilai kualitas agregat halus, seperti pasir, dengan menentukan rasio antara kandungan agregat bersih dan material pengotor seperti debu atau lumpur.

**Tabel 4.10** Hasil Setara Pasir Agregat Halus 0 – 5

No.	Uraian	Percobaan ke		Rata - Rata
		1	2	
1	Skala pembacaan lumpur (A)	4	3,8	3,90
2	Skala pembacaan pasir (B)	3	2,9	2,95
3	Nilai setara pasir = $\frac{B}{A} \times 100 \%$	75,00	76,32	75,66

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian pada sampel I dan II, diperoleh nilai rata-rata setara pasir untuk agregat halus ukuran 0 – 5 sebesar 75,66%. Dengan demikian, hasil tersebut telah memenuhi persyaratan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mensyaratkan nilai setara pasir untuk agregat halus minimal sebesar 50%.

#### 4.2.7 Hasil Pengujian Agregat Normal

Rekap hasil keseluruhan pengujian agregat disajikan dalam tabel beriku

**Tabel 4.11** Hasil Pengujian Material Agregat Normal

No.	Pengujian	Metode Pengujian	Syarat	Hasil	Satuan	Keterangan
<b>AGREGAT HALUS</b>						
1	Berat Jenis Agregat 0-5	SNI 1970 : 2016	$\geq 2,50$	2,59	-	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat 0-5		$\leq 3$	2,26	%	Memenuhi
3	Gum. Lempung & Butir Mudah Pecah	SNI 4141 : 2015	$\leq 1$	0,74	%	Memenuhi
4	Material lolos ayakan No. 200 (0 - 5)	SNI ASTM C117 : 2012	$\leq 10$	9,84	%	Memenuhi
5	Nilai Setara Pasir	SNI 03 - 4428 - 1997	$\geq 50$	75,66	%	Memenuhi
6	Berat Jenis Semen	SNI 2531 : 2015	-	3,06	-	-
<b>AGREGAT KASAR</b>						
7	Berat Jenis Ag. 5-10	SNI 1969 : 2016	$\geq 2,50$	2,64	-	Memenuhi
8	Berat Jenis Ag. 10-10			2,67	-	Memenuhi
9	Penyerapan Ag. 5-10		$\leq 3$	2,45	%	Memenuhi
10	Penyerapan Ag. 10-10			1,78	%	Memenuhi
11	Material lolos ayakan No. 200 (5 - 10)	ASTM C117 : 2012	$\leq 1$	0,94	%	Memenuhi
12	Material lolos ayakan No. 200 (10 - 10)			0,88	%	Memenuhi
13	Abrasi 100 Putaran	SNI 2417 : 2008	$\leq 8$	3,64	%	Memenuhi
14	Abrasi 500 Putaran		$\leq 40$	15,98	%	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian agregat normal yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, yang berlokasi di Jalan Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang, diketahui bahwa material agregat tersebut telah memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 dan layak digunakan sebagai bahan dalam campuran aspal porus.

### **4.3 Filler**

Filler dalam penelitian ini menggunakan semen Portland, yang memiliki kehalusan tinggi dan sifat pengikat yang baik. Penggunaan semen sebagai filler bertujuan untuk mengisi rongga halus di antara agregat serta memperkuat struktur campuran. Semen membantu meningkatkan kepadatan dan stabilitas Marshall campuran aspal porous.

### **4.4 Hasil Pengujian Aspal**

Aspal yang digunakan adalah aspal minyak dengan penetrasi 60/70, jenis yang umum dipakai pada perkerasan jalan di iklim tropis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal memenuhi standar spesifikasi dari segi penetrasi, titik lembek, titik nyala, serta berat jenis. Nilai-nilai tersebut mencerminkan kualitas aspal yang mampu menjaga fleksibilitas dan kekuatan ikatan dalam campuran aspal

#### **4.4.1 Pengujian Penetrasi Aspal ( SNI 2456 : 2011 )**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau kelembekan bitumen, baik dalam kondisi padat maupun setengah padat, dengan cara menusukkan jarum berukuran tertentu ke dalam sampel bitumen menggunakan beban dan waktu tertentu pada suhu yang telah ditetapkan. Jenis aspal yang digunakan dalam pengujian ini adalah aspal Pertamina dengan tingkat penetrasi 60/70. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut :

**Tabel 4.12** Pengujian bahan – bahan Bitumen Sebelum Kehilangan ( SNI 2456 :2011 )

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan	Pembacaan suhu aspal	
	Mulai : 08.20 jam WIB	140 °C	
	Selesai : 09.10 jam WIB		
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C	Pembacaan suhu water bath	
	Mulai : 09.10 jam WIB	25 °C	
	Selesai : 10.15 jam WIB		
Pemeriksaan	Penetrasi pada suhu 25°C	Pembacaan suhu termometer	
	Mulai : 10.15 jam WIB	25 °C	
	Selesai : 10.45 jam 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 <sup>-1</sup> mm)		

Sumber : Hasil penelitian

**Tabel 4.13** Pengujian Penetrasi Bahan-Bahan Bitumen Setelah Kehilangan ( SNI 2456 : 2011 )

Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C	Pembacaan suhu water bath	
	Mulai jam : 18.00 WIB	25 °C	
	Selesai : 19.00 jam WIB		
Pemeriksaan	Penetrasi pada suhu 25°C	Pembacaan suhu termometer	
	Mulai jam : 19.30 WIB	25 °C	
	Selesai : 19.45 jam 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 <sup>-1</sup> 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 setelah kehilangan berat minyak dan aspal didapatkan nilai rata – rata sebesar 61,33.
- 3) Sesuai hasil kedua pengujian tersebut didapatkan  $\frac{67.33}{61.33} \times 100 \%$  maka diperoleh hasil sebesar 91,1 %.

#### 4.4.2 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar (SNI 2433:2011)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui titik nyala dan titik bakar dari berbagai produk minyak bumi, kecuali minyak bakar dan bahan lain yang memiliki titik nyala dalam oven cup di bawah 75°C. Titik nyala sendiri didefinisikan sebagai suhu ketika muncul nyala singkat di atas permukaan aspal. Pengujian titik nyala dan titik bakar ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan

Konstruksi ITN Malang, yang beralamat di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Kota Malang. Hasil pengujian ditampilkan dalam tabel beriku:

**Tabel 4.14** Hasil Pengujian Titik Ntala 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	
Catatan :					
		Titik nyala =	325 °C		
		Titik bakar =	330 °C		

Sumber : Hasil penelitian

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa aspal memiliki titik nyala pada suhu 325°C, ditandai dengan munculnya nyala singkat berwarna biru saat uap dari benda uji terbakar. Sementara itu, titik bakarnya tercatat pada suhu

330°C. Dengan demikian, aspal tersebut telah memenuhi persyaratan dari Spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga 2018 yang menetapkan titik nyala minimum sebesar 232°C. Titik nyala aspal merupakan suhu di mana aspal mulai menghasilkan uap yang cukup untuk terbakar apabila terdapat sumber panas atau api. Nilai titik nyala ini dapat bervariasi tergantung pada jenis aspal dan tujuan penggunaannya. Misalnya, aspal untuk konstruksi jalan umumnya memiliki titik nyala tinggi agar tetap stabil terhadap paparan sinar matahari dan tekanan lalu lintas. Karakteristik aspal, termasuk titik nyalanya, dipengaruhi oleh komposisi kimia serta struktur molekul yang dikandungnya. Aspal terdiri dari campuran senyawa hidrokarbon kompleks dengan berbagai fraksi, seperti komponen berat maltena dan asphaltena.

#### **4.4.3 Pengujian Titik Lembek (SNI 2434:2011)**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui suhu titik lembek dari aspal dan ter, yang berada dalam rentang 30°C hingga 200°C. Titik lembek sendiri didefinisikan sebagai suhu saat bola baja dengan berat tertentu menekan dan menyebabkan sampel aspal atau ter yang diletakkan dalam cincin standar melunak hingga menyentuh pelat logam di bawahnya, akibat proses pemanasan dengan laju tertentu. Uji titik lembek ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang berlokasi di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Hasil dari pengujian disajikan dalam bentuk tabel.

**Tabel 4.15** 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		
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	-	-	49 °C	49 °C
Catatan :				
Titik lembek = 49.00 °C				

Sumber : Hasil penelitian

Uji titik lembek pada aspal bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik mekanis dan termalnya, khususnya berkaitan dengan suhu titik lembek. Hasil dari pengujian ini memberikan gambaran penting mengenai sejauh mana aspal mampu menahan beban dan deformasi pada berbagai kondisi suhu. Dengan mengetahui titik lembeknya, para ahli teknik dan material dapat menilai kinerja aspal di lapangan, memastikan konstruksi jalan tetap aman dan berkelanjutan, serta merancang campuran aspal yang sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan spesifik penggunaan. Selain itu, temuan dari pengujian ini turut berperan dalam penyusunan standar mutu aspal agar material yang digunakan memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai titik lembek aspal sebesar 48°C. Nilai ini telah memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga 2018, yaitu minimal sebesar 48°C.

#### 4.4.4 Pengujian Daktilitas Aspal (SNI 2432:2011)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa jauh bitumen keras dapat ditarik di antara dua cetakan sebelum mengalami putus, dengan kondisi suhu dan kecepatan penarikan yang telah ditentukan. Uji daktilitas aspal ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang beralamat di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel.

**Tabel 4.16** Hasil Pengujian Daktilitas Aspal Sebelum 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	
Catatan :		

Sumber : Hasil Penelitian

**Tabel 4.17** Hasil Pengujian Daktilitas Aspal Sesudah 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	
Catatan :		

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil Pengujian Daktilitas Aspal sebagai berikut :

- 1) Hasil pengujian daktilitas aspal sebelum kehilangan berat didapatkan nilai rata – rata sebesar 140 cm, dan sesudah kehilangan berat sebesar 140 cm.
- 2) Dari kedua hasil pengujian daktilitas memenuhi syarat Spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga 2018 dengan nilai  $\geq 100$  cm untuk pengujian sebelum kehilangan berat dan  $\geq 50$  cm untuk pengujian sesudah kehilangan berat.

#### 4.4.5 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen Keras (SNI 2441:2011)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis bitumen keras menggunakan alat piknometer. Berat jenis bitumen didefinisikan sebagai perbandingan antara massa bitumen dengan massa air suling dalam volume yang sama pada suhu tertentu. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi ITN Malang, yang terletak di Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang. Hasil Pengujian Berat jenis Bitumen keras :

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

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

Berat piknometer + Air = 64,963 gr

Berat piknometer = 27,197 gr

Berat air (isi piknometer) = 64,963 – 27,197  
= 37,766 gr

Berat piknometer + contoh = 57,545 gr

Berat Piknometer = 27,197 gr

Berat Contoh = 57,545 – 27,197 gr  
= 30,348 gr

Berat Piknometer + Air + contoh = 66,068 gr

Berat Piknometer + contoh = 57,545 gr

Berat Air Saja = 66,068 – 57,545 gr  
= 8,523 gr

Isi bitumen air saja = Berat air (isi piknometer) – Berat

$$= 37,766 \text{ gr} - 8,523 \text{ gr}$$

$$= 29,243 \text{ gr}$$

Berat Jenis =  $\frac{\text{Berat Contoh}}{\text{Berat Air Isi Bitumen}}$

$$= \frac{30,348}{29,243}$$

$$= 1,038$$

**Tabel 4. 18** Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen Keras

Persiapan contoh	Contoh dipanaskan		Pembacaan suhu aspal 140 °C
	Mulai jam	: 08.20 WIB	
	Selesai jam	: 09.10 WIB	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu ruang 25 °C
	Mulai jam	: 09.10 WIB	
	Selesai jam	: 10.15 WIB	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath 25 °C
	Mulai jam	: 10.15 WIB	
	Selesai jam	: 10.30 WIB	
Pemeriksaan Berat Jenis	Mulai jam		Pembacaan suhu water bath 25 °C
	Selesai jam	: 11.00 WIB	
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 <sup>3</sup>		997.0 kg/m <sup>3</sup>
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 <sup>3</sup>		1040.391 kg/m <sup>3</sup>
Berat isi rata - rata	1037.532 kg/m <sup>3</sup>		
Catatan :			

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis aspal Pertamina dengan penetrasi 60/70, diperoleh nilai sebesar 1,038 pada sampel I dan 1,044 pada sampel II. Dari kedua hasil tersebut dihitung nilai rata-rata, yaitu sebesar 1,04. Dengan demikian, hasil pengujian ini telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga 2018, yaitu minimal sebesar 1,0.

#### **4.4.6 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal (SNI 06 - 2440 - 1991).**

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan jumlah kehilangan berat dari minyak dan aspal akibat proses pemanasan dengan ketebalan lapisan tertentu, yang dinyatakan dalam persen terhadap berat awal. Uji penurunan berat minyak dan aspal ini dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Nasional Malang.

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

$$A = 69,005$$

$$B = 68,682$$

$$\begin{aligned} \text{Penurunan Berat} &= \frac{69,005 - 68,682}{69,005} \times 100 \\ &= 0,468 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan rata-rata dari hasil ketiga sampel pengujian, diperoleh nilai sebesar 0,468 %

$$\text{Rata - rata} = \frac{0,540 - 0,013 - 0,007}{3} = 0,187 \%$$

**Tabel 4. 19** 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
<b>Berat aspal keras</b>	58.565	57.814	62.758
Berat sebelum pemanasan	69.055	68.366	73.218
Berat sesudah pemanasan	68.682	68.357	73.213
<b>Kehilangan berat</b>	0.373	0.009	0.005
<b>Kehilangan berat</b>	0.540 %	0.013 %	0.007 %
<b>Rata-rata</b>	0.187 %		
Catatan :			

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil dari pengujian kehilangan berat minyak dan aspal didapatkan nilai sebesar 0,468 %. Maka dari itu pengujian tersebut memenuhi syarat Spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga 2018 dengan nilai  $\leq 0,8$  %

#### 4.4.7 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70

Ringkasan hasil pengujian aspal Pertamina disajikan dalam tabel berikut.

**Tabel 4.20** Hasil Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat	Hasil	Satuan	Keterangan
1	Penetrasi Pada 25°C	SNI 2456 : 2011	60-70	67.33	10 <sup>-1</sup> 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
<b>Pengujian Residu Hasil TFOT/RTFOT</b>						
7	Kehilangan Berat	SNI 06-2440-1991	≤ 0,8	0.187	%	Memenuhi
8	Penetrasi Pada 25°C (% Semula)	SNI 2456 : 2011	≥ 54	91.09	%	Memenuhi
9	Daktilitas Pada 25°C	SNI 2432 : 2011	≥ 50	140	cm	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian yang konsisten dan sesuai dengan spesifikasi, aspal Pertamina penetrasi 60/70 terbukti memenuhi standar yang ditetapkan dalam aspek penetrasi, kekerasan, serta ketahanan terhadap suhu. Konsistensi kualitas inimenunjukkan bahwa aspal tersebut layak digunakan sebagai material konstruksi yang kuat dan tahan lama.

## **4.5 Perencanaan Komposisi Campuran**

### **4.5.1 Perhitungan Persentase Agregat dengan Metode Grafis**

Perhitungan persentase agregat dalam campuran aspal porus dengan menggunakan metode grafis diagonal dilakukan melalui beberapa tahapan. Metode ini umum digunakan untuk menentukan proporsi agregat kasar dan halus dalam campuran aspal. Adapun langkah-langkah yang biasanya dilakukan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

1. **Persiapan Sampel**

Langkah awal adalah menyiapkan sampel campuran aspal yang akan dianalisis. Pastikan seluruh peralatan seperti saringan dan neraca/timbangan dalam kondisi siap pakai untuk proses pengujian.

2. **Proses Penyaringan Agregat**

Agregat kasar dan halus disaring menggunakan rangkaian saringan berukuran tertentu guna memisahkan fraksi berdasarkan ukuran butir. Setiap fraksi agregat yang tertahan pada masing-masing saringan kemudian ditimbang untuk mendapatkan distribusi ukuran.

3. **Pembuatan Grafik diagonal**

Selanjutnya, buat grafik dengan sumbu horizontal (X) merepresentasikan fraksi agregat halus (biasanya pasir), dan sumbu vertikal (Y) mewakili fraksi agregat kasar (seperti kerikil atau batu pecah). Tentukan titik-titik referensi pada grafik untuk menggambarkan perbandingan fraksi agregat sesuai dengan spesifikasi campuran aspal yang ditargetkan.

4. **Menentukan dan penyusunan laporan**

Plot hasil analisis gradasi ke dalam grafik diagonal sesuai dengan proporsi agregat kasar dan halus yang telah diperoleh. Dari posisi titik tersebut, baca nilai persentase masing-masing fraksi agregat. Nilai ini menggambarkan seberapa baik campuran memenuhi gradasi yang dipersyaratkan.

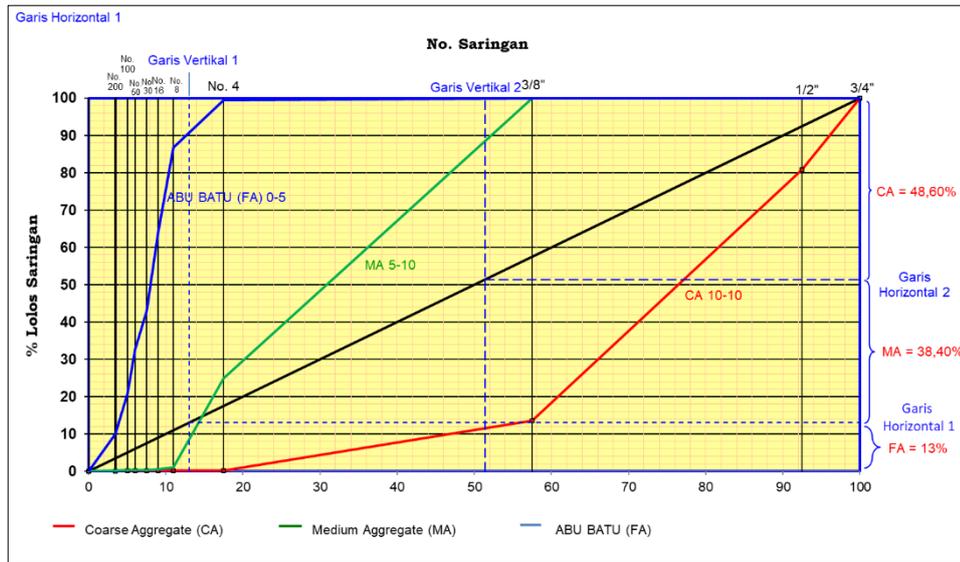
5. Evaluasi dan penyusunan laporan

Bandingkan komposisi hasil pengujian dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Jika diperlukan, lakukan penyesuaian pada proporsi campuran. Setelah evaluasi selesai, susun laporan secara runtut dan informatif, meliputi data hasil perhitungan, deskripsi sampel, prosedur pengujian, serta hasil analisis. Metode grafis ini memberikan visualisasi yang jelas mengenai keseimbangan antara agregat kasar dan halus dalam campuran aspal porous, sekaligus membantu memastikan campuran tersebut telah memenuhi standar konstruksi yang berlaku. Setelah dilakukan analisis gradasi untuk mengetahui berat jenis agregat serta persentase agregat yang lolos pada setiap ukuran saringan, langkah selanjutnya adalah menghitung proporsi agregat dalam campuran. Perhitungan ini dilakukan menggunakan metode grafis, yang hasilnya dapat dilihat pada grafik dan tabel komposisi campuran agregat berikut.

**Tabel 4. 21** Gradasi Agregat Untuk Campuran Aspal Porous

Nomor Saringan	Ukuran Saringan (mm)	Spesifikasi % berat yang lolos
3/4	19	100
1/2	13,2	85-100
3/8	9,5	45-100
No. 4	4,75	10-25
No. 8	2,36	7-15
No. 16	1,18	6-12
No. 30	0,6	5-10
No. 50	0,3	4-8
No. 100	0,15	3-7
N0. 200	0,075	2-5

Sumber: Australian Asphalt Pavement Association (AAPA)



**Gambar 4.4** Diagonal Komposisi Campuran Agregat Normal Aspal Porus

Sumber : Hasil Penelitian

Dimana:

- Garis Vertikal 1:

Fraksi Agregat Halus (FA) = Fraksi Agregat Sedang (MA) + Fraksi Agregat Kasar (CA)

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

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

- Garis Vertikal 2:

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

$$11,5\% \text{ (MA)} = 11,5\% \text{ (CA)}$$

Proporsi dari masing-masing agregat:

- Gradasi 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)  

$$= 100\% - 48,60\% - 13\%$$

$$= 38,40\%$$

#### 4.5.2 Perhitungan Presentase Agregat dengan Metode Analisis

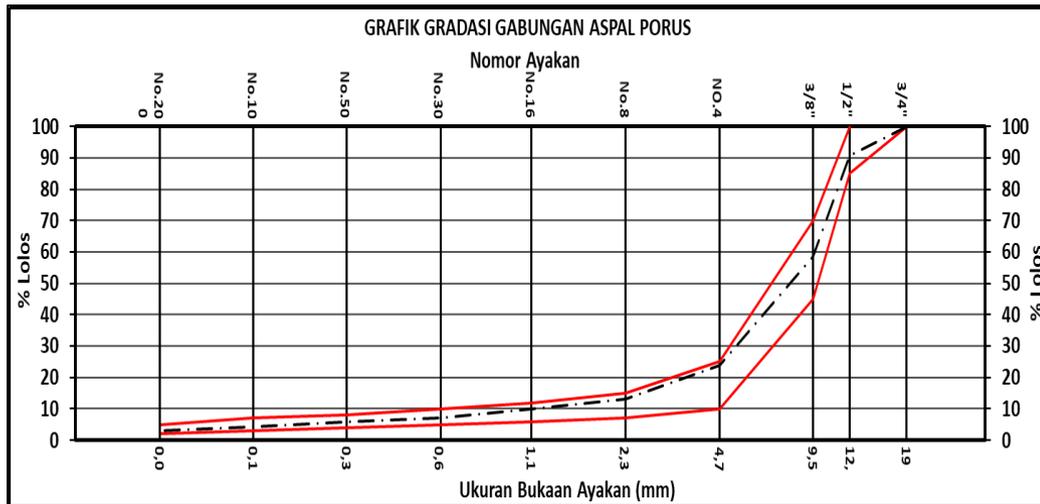
Setelah dilakukan uji gradasi untuk mengetahui berat dan persentase agregat yang lolos pada masing-masing ukuran saringan, tahap selanjutnya adalah menentukan proporsi agregat dalam campuran. Penentuan ini dilakukan melalui pendekatan analitis, yang hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel komposisi campuran agregat di bawah ini.

**Tabel 4.22** 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
<b>JUMLAH LUAS PERMUKAAN AGREGAT (m<sup>2</sup>/kg)</b>												2,74

Sumber : Hasil penelitian

Dari hasil analisis gradasi gabungan yang ditampilkan pada tabel dan grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa gradasi tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam spesifikasi AAPA.



**Gambar 4.5** Grafik Diagonal Komposisi Campuran Agregat Aspal Porus

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.6 Kombinasi Campuran Normal Untuk Variasi Aspal Porous

Hasil Perhitungan:

Diketahui

- Proporsi Fraksi Kasar (CA) = 13,09 %
- FF = 2,90 %
- K = 0,50

Mencari Nilai CA

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

Mencari FA

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

Persentase agregat komposisi spesifikasi Aspal Porus sebagai berikut:

$$CA = 86,91 \%$$

$$FA = 10,19 \%$$

$$FF = 2,9 \%$$

Berdasarkan persentase agregat komposisi campuran Aspal Porus didapat kadar aspal rencana sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P &= 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + K \\ &= 0,035 (86,91) + 0,045 (10,19) + 0,18 (2,90) + 0,50 \\ &= 4 \%$$

Apabila kadar aspal tengah yang diperoleh dinyatakan sebagai Pb%, maka benda uji dibuat dengan lima variasi kadar aspal, yaitu (Pb-1)%, (Pb-0,5)%, Pb%, (Pb+0,5)%, dan (Pb+1)%. Sebagai contoh, untuk kadar aspal rencana sebesar 4%, variasi kadar aspal yang digunakan yaitu: 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, dan 5%. Contoh perhitungan untuk variasi kadar aspal 4%: Berat total campuran = 100,00 gram.

$$\begin{aligned} \text{Berat Aspal} &= \frac{\text{Variasi Aspal} \times \text{Berat Total Campuran}}{100} \\ &= \frac{4,0 \times 1200}{100} \\ &= 48 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Agregat Kasar 10/10} &= \frac{\text{Komposisi kasar} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100} \\ &= \frac{47,87 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100} \\ &= 551,5 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat agregat sedang 5/10} &= \frac{\text{Komposisi sedang} (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100} \\ &= \frac{37,82 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100} \\ &= 435,7 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat halus 0/5} &= \frac{\text{Komposisi halus } (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100} \\
 &= \frac{12,81 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100} \\
 &= 147,5 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat filler} &= \frac{\text{Komposisi filler } (1200 - \frac{1200 \times \text{variasi aspal}}{100})}{100} \\
 &= \frac{1,5 (1200 - \frac{1200 \times 4}{100})}{100} \\
 &= 17,3 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat total campuran} &= 551,5 \text{ gr} + 435,7 \text{ gr} + 147,5 \text{ gr} + 17,3 \text{ gr} \\
 &= 1152 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat total campuran} &= \text{Berat total agregat} + \text{berat aspal} \\
 &= 1152 + 48 \\
 &= 1200 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

**Tabel 4.23** 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): $Pb = 0,035 \times (CA) + 0,045 \times (FA) + 0,18 \times (FF) +$ Konstanta (laston : 0,5~1 & lataston : 1~2)			<b>Campuran Gmm</b>				
Jenis Material	% Proporsi Agg.	KADAR ASPAL RENCANA (%)					<b>4,00 %</b>
		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	<b>45,96</b>
5/10	37,82	36,69	36,50	36,31	36,12	35,93	<b>36,31</b>
0/5	12,81	12,42	12,36	12,29	12,23	12,16	<b>12,29</b>
Filler	1,50	1,46	1,45	1,44	1,43	1,43	<b>1,44</b>
Total	100,00	97,00	96,50	96,00	95,50	95,00	<b>96,00</b>
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	<b>100,00</b>
Jenis Material	Komposisi (%)	KADAR ASPAL RENCANA (%)					<b>4,00 %</b>
		3,00 %	3,50 %	4,00 %	4,50 %	5,00 %	
		Berat Agregat (gr)					
10/10	47,87	557,2	554,3	551,5	548,6	545,7	<b>505,5</b>
5/10	37,82	440,3	438,0	435,7	433,5	431,2	<b>399,4</b>
0/5	12,81	149,1	148,3	147,5	146,7	146,0	<b>135,2</b>
Filler	1,50	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	<b>15,8</b>
Berat total Ag. Camp. (gr)		1164,0	1158,0	1152,0	1146,0	1140,0	<b>1056,0</b>
Berat aspal (gr)		36,0	42,0	48,0	54,0	60,0	<b>44,0</b>
Berat total campuran (gr)		1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	<b>1100,0</b>

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.7 Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Aspal Porus

**Tabel 4.24** 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 aspal 4% aspal porus.

$$Gmm = \frac{C}{F} = \frac{1055,20}{419,80} = 2,514$$

Dimana:

C = Berat Benda Uji (gr)

F = Volume Benda Uji

#### 4.8 Pengujian Marshall Test Untuk Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal

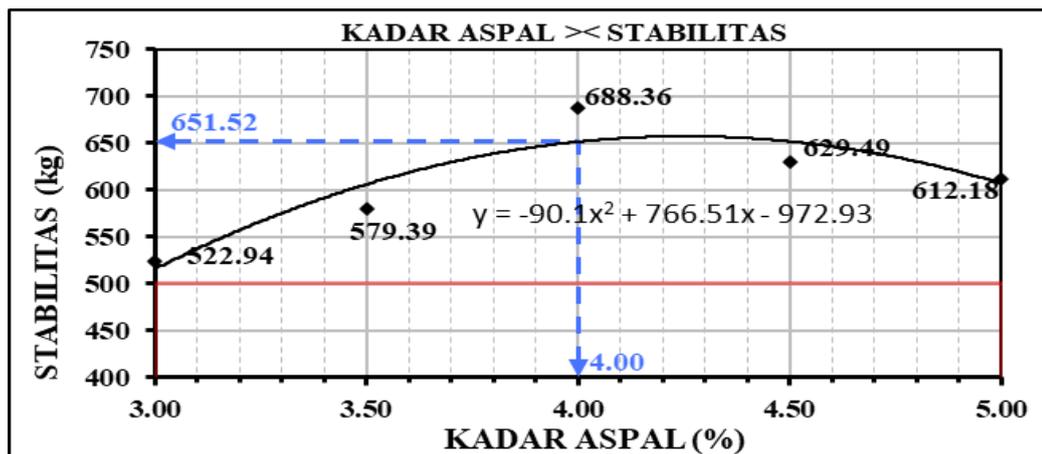
**Tabel 4.25** Hasil Pengujian Test Marshall Mencari Kadar Aspal Optimum Aspal Porus

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): $Pb = 0,035 \times (CA) + 0,045 \times (FA) + 0,18 \times (FF) + \text{Konstanta (laston} = 0,5 - 1 \text{ \& lataston} = 2 - 3) : 4,00 \%$																							
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					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	Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100 - A}{U} + \frac{A}{V}$	$\frac{100 - F(100-A)}{S}$	$\frac{100(G - F)}{G}$	$\frac{100(H - I)}{I}$	Lab. Test	K. W. A. Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 \cdot U \cdot S \cdot V}{S \cdot U}$	$\frac{A - (100 \cdot A) \cdot O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A - O \cdot 1000}{X \cdot V(100 - A)}$		
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					
<b>Rata - Rata</b>										<b>1,957</b>	<b>2,545</b>	<b>28,37</b>	<b>23,09</b>	<b>18,61</b>	<b>37</b>	<b>522,94</b>	<b>4,50</b>	<b>116,34</b>	<b>0,199</b>	<b>2,81</b>	<b>1,03</b>	<b>10,13</b>	
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					
<b>Rata - Rata</b>										<b>1,940</b>	<b>2,526</b>	<b>29,39</b>	<b>23,23</b>	<b>20,98</b>	<b>40</b>	<b>579,39</b>	<b>4,59</b>	<b>128,60</b>	<b>0,199</b>	<b>3,31</b>	<b>0,88</b>	<b>12,00</b>	
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					
<b>Rata - Rata</b>										<b>1,917</b>	<b>2,508</b>	<b>30,58</b>	<b>23,56</b>	<b>22,95</b>	<b>48</b>	<b>688,36</b>	<b>5,70</b>	<b>120,67</b>	<b>0,199</b>	<b>3,81</b>	<b>0,76</b>	<b>13,90</b>	

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): $Pb = 0,035 \times (CA) + 0,045 \times (FA) + 0,18 \times (FF) + \text{Konstanta (laston} = 0,5 - 1 \text{ \& lataston} = 2 - 3) : 4,00 \%$																							
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	$\frac{G}{J}$	$\frac{100-A}{U} + \frac{A}{V}$	$\frac{100-(100-A)}{S}$	$\frac{100(G-F)}{G}$	$\frac{100(H-I)}{I}$	Lab. Test	K. W. A.Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 U-S}{S \cdot U}$	$\frac{A-(100-A)O}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-O}{XV(100-A)}$	
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	

#### 4.9 Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Porus

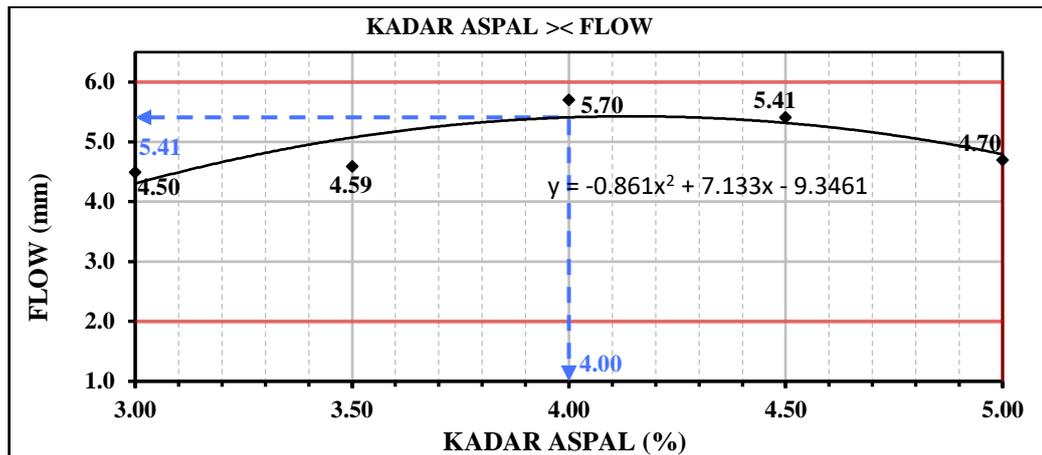
Menentukan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran aspal porous dilakukan dengan cara mengambil nilai tengah dari masing-masing parameter Marshall, yaitu stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFA. Penentuan ini didasarkan pada hasil perhitungan parameter Marshall yang disajikan dalam bentuk grafik di bawah ini.



Tabel 4. 26 Grafik hubungan antara kadar aspal dan stabilitas aspal Porous

Sumber : hasil penelitian

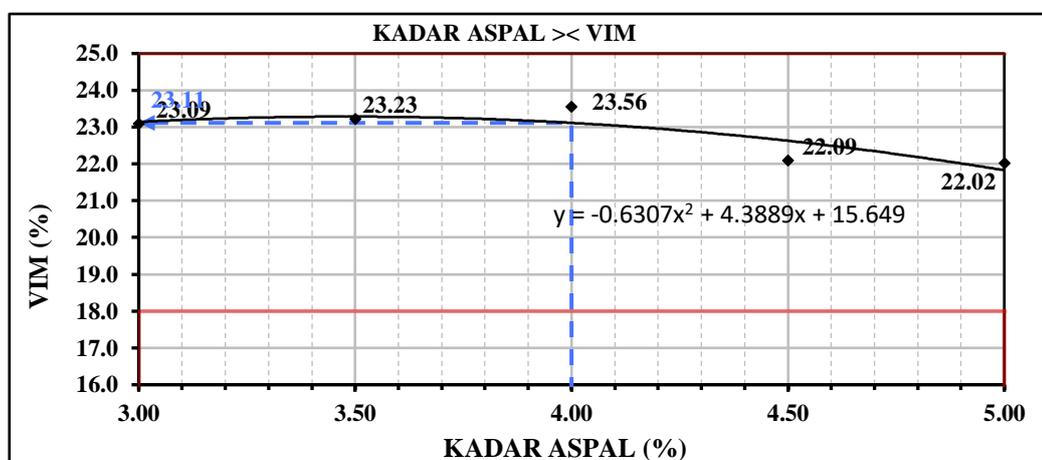
Berdasarkan Grafik 4.29 yang memperlihatkan hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas, diketahui bahwa stabilitas berada dalam kisaran 552,94 kg hingga 612,18 kg untuk kadar aspal antara 3% hingga 5%. Nilai stabilitas tertinggi tercapai pada kadar aspal optimum sebesar 4%, yaitu sebesar 688,36 kg. Setelah kadar optimum tersebut, terlihat adanya penurunan nilai stabilitas pada kadar aspal yang lebih tinggi.



**Gambar 4.6** Grafik hubungan antara kadar aspal dan flow Aspal Porus

Sumber: hasil penelitian

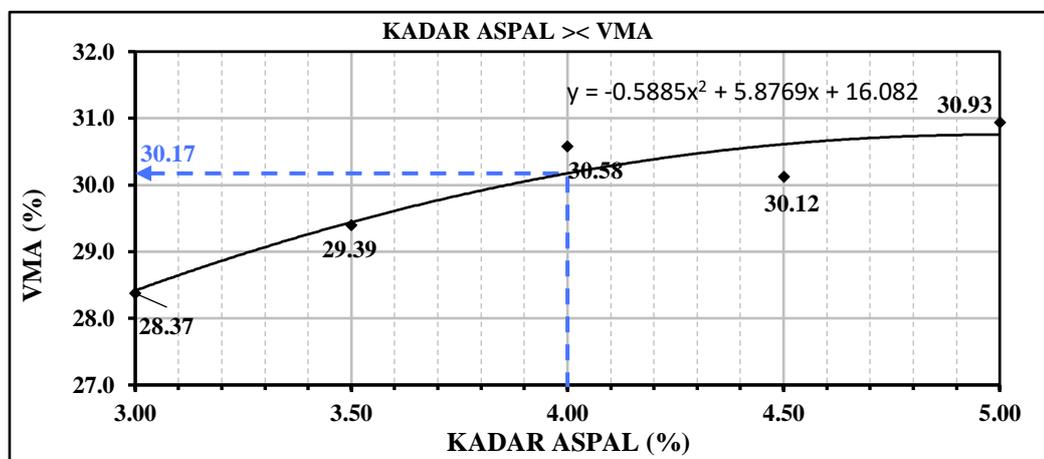
Gambar di atas menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai flow pada campuran aspal porous. Dari grafik terlihat bahwa nilai flow mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar aspal hingga mencapai titik maksimum. Nilai flow tertinggi terjadi pada kadar aspal 4,00% yaitu sebesar 5,70 mm. Setelah titik tersebut, nilai flow mulai menurun, seperti yang ditunjukkan pada kadar aspal 5,00% dengan flow sebesar 4,70 mm. Pola ini menunjukkan bahwa kadar aspal berpengaruh signifikan terhadap nilai flow, di mana penambahan aspal hingga titik tertentu dapat meningkatkan flow, namun setelah melewati kadar optimum, nilai flow justru menurun.



**Gambar 4.7** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VIM Aspal Porus

Sumber: hasil penelitian

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai VIM (Void in Mix) pada campuran aspal porous. Terlihat bahwa nilai VIM mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar aspal, hingga mencapai nilai maksimum sebesar 23,56% pada kadar aspal 4,00%. Sebelumnya, pada kadar aspal 3,50%, nilai VIM tercatat sebesar 23,23%. Setelah melewati kadar optimum, nilai VIM mulai menurun, dengan nilai terendah sebesar 22,02% pada kadar aspal 5,00%. Tren ini menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal pada awalnya meningkatkan kadar rongga dalam campuran, namun setelah titik optimum, rongga cenderung tertutup oleh aspal berlebih sehingga VIM menurun. Garis merah pada grafik menunjukkan batas minimum VIM yang disyaratkan, dan seluruh data masih berada di atas ambang batas tersebut.

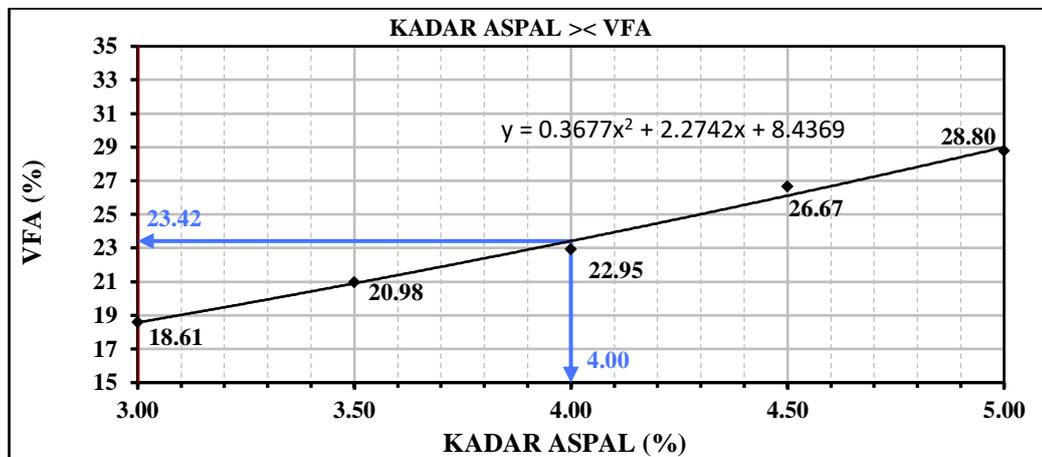


**Gambar 4.8** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VMA Aspal Porus

Sumber : hasil penelitian

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai VMA (Void in Mineral Aggregate) pada campuran aspal porous. Terlihat bahwa nilai VMA meningkat seiring dengan penambahan kadar aspal. Nilai VMA tertinggi tercapai pada kadar aspal 5,00% sebesar 30,93%, sedangkan pada kadar aspal 4,00%, nilai VMA sebesar 30,58%. Sementara itu, pada kadar aspal 3,00%, nilai VMA tercatat 30,17%, sebagaimana ditunjukkan oleh garis bantu biru pada grafik. Nilai VMA terendah terjadi pada kadar aspal 3 % dengan nilai 28,37%, kemudian terus meningkat pada kadar aspal berikutnya. Pola grafik ini

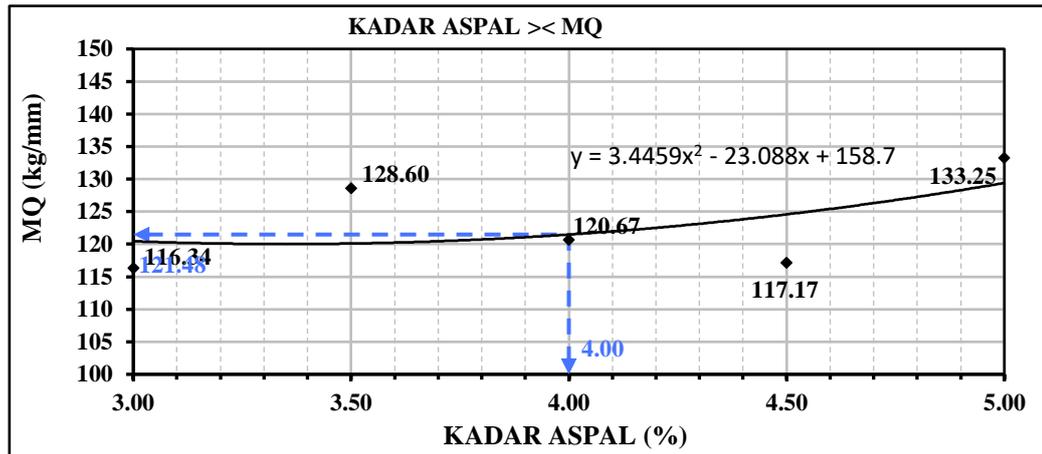
memperlihatkan bahwa penambahan kadar aspal mampu meningkatkan nilai VMA, yang berarti volume rongga antar agregat menjadi lebih besar. Seluruh nilai VMA yang dihasilkan masih berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan untuk campuran aspal porous.



**Gambar 4.9** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VFA Aspal Porus

Sumber: hasil penelitian

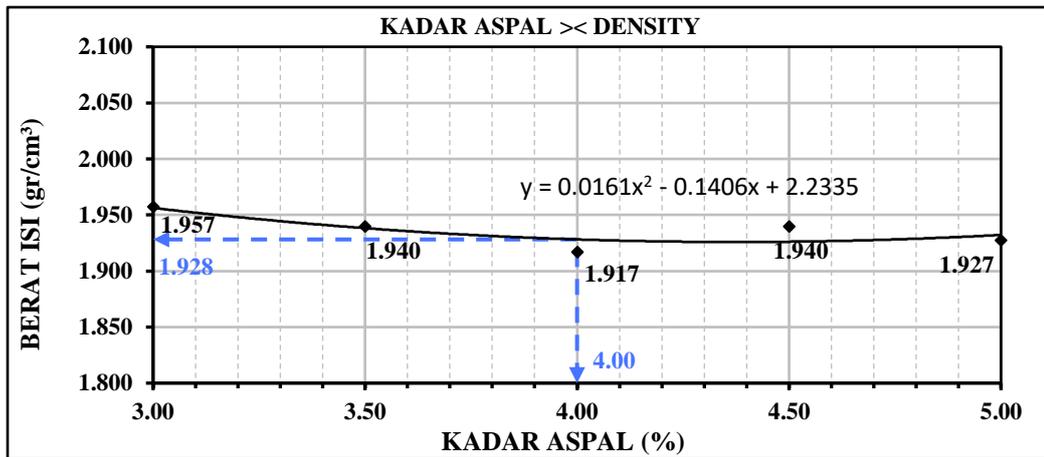
Grafik 4.6 menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai VFA (Void Filled with Asphalt) pada campuran aspal porous. Terlihat bahwa nilai VFA meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Pada kadar aspal 3,00%, nilai VFA terendah tercatat sebesar 18,61%, dan terus meningkat hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 28,80% pada kadar aspal 5,00%. Pada kadar aspal 4,00%, nilai VFA berada di angka 22,95%, seperti ditunjukkan oleh garis bantu biru. Berdasarkan grafik ini, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar aspal yang digunakan, semakin besar persentase rongga antar agregat yang terisi oleh aspal, yang tercermin dari peningkatan nilai VFA.



**Gambar 4. 10** Grafik hubungan antara kadar aspal dan MQ Aspal Porus

Sumber : hasil penelitian

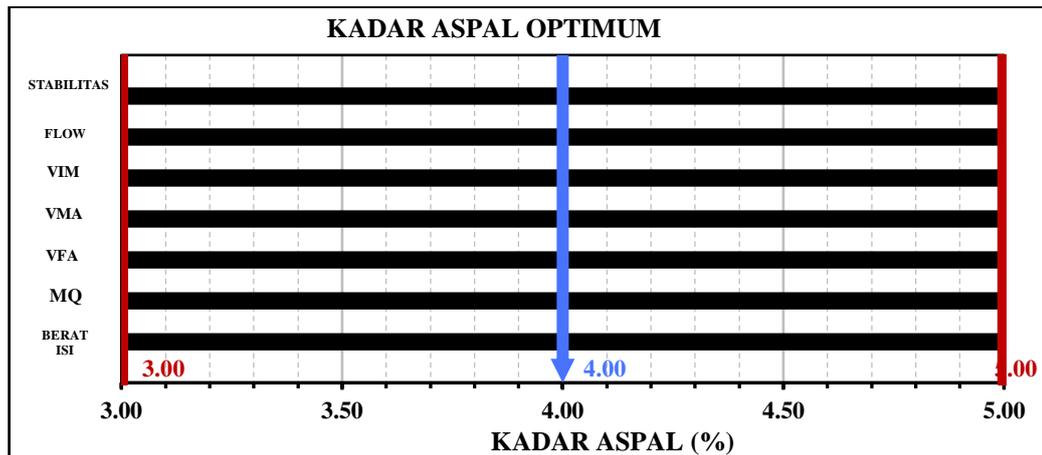
Grafik 4.7 menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai Marshall Quotient (MQ) pada campuran aspal porous. Secara umum, nilai MQ mengalami fluktuasi seiring dengan variasi kadar aspal. Pada kadar aspal 3,00%, nilai MQ tercatat sebesar 116,84 kg/mm, kemudian meningkat menjadi 128,60 kg/mm pada kadar 3,50%. Namun, pada kadar aspal 4,00%, nilai MQ menurun menjadi 120,67 kg/mm, yang ditunjukkan oleh garis bantu biru pada grafik. Nilai MQ mengalami penurunan lebih lanjut pada kadar aspal 4,50% sebesar 117,17 kg/mm, sebelum kembali meningkat pada kadar aspal 5,00% dengan nilai 133,35 kg/mm, yang merupakan nilai tertinggi dari seluruh variasi. Perubahan nilai MQ ini menunjukkan bahwa kekuatan dan kekakuan campuran tidak selalu meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Meskipun penambahan aspal dapat meningkatkan daya ikat antar agregat, kelebihan aspal juga dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan mengurangi kekakuan. Dengan demikian, kadar aspal optimum perlu dipertimbangkan secara seimbang untuk mendapatkan nilai MQ yang ideal.



**Tabel 4. 27** Grafik hubungan antara kadar aspal dan Density Aspal Porus

Sumber: hasil penelitian

Grafik 4.30 menunjukkan hubungan antara kadar aspal (%) dan berat isi (density) campuran (gr/cm<sup>3</sup>). Terlihat bahwa nilai berat isi mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Data menunjukkan bahwa pada kadar aspal 3,0% berat isi adalah 1,957 gr/cm<sup>3</sup>, dan menurun hingga mencapai titik terendah pada kadar aspal 4,0% yaitu sebesar 1,917 gr/cm<sup>3</sup>. Setelah itu, berat isi kembali mengalami sedikit peningkatan hingga mencapai 1,927 gr/cm<sup>3</sup> pada kadar aspal 5,0%. Dari grafik juga tampak bahwa titik berat isi terendah terjadi pada kadar aspal sekitar 4,0%, yang diindikasikan dengan panah biru. Hal ini menunjukkan bahwa kadar aspal tersebut dapat menjadi titik kritis dalam desain campuran, karena densitas minimum dapat berkaitan dengan porositas maksimum, yang berpengaruh terhadap kekuatan dan ketahanan campuran aspal.



**Gambar 4. 11** Diagram Batang Kadar Aspal Optimum Aspal Porus

Sumber:hasil penelitian

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan berdasarkan hasil uji Marshall terhadap campuran aspal porous dengan variasi kadar aspal sebesar 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, dan 5%, Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada penelitian ini mengacu pada hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Eka Rahma Tana dengan judul penelitian “Studi Penelitian Karakteristik Marshall dan Permeabilitas Pada Aspal Porous” dengan pertimbangan bahwa karakteristik material dan kondisi pengujian memiliki kesamaan. Nilai KAO tersebut digunakan sebagai dasar dalam penambahan variasi kadar serat tali pada campuran aspal porous." Setiap variasi diuji menggunakan tiga sampel untuk memperoleh nilai rata-rata dari parameter stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFA

Data hasil pengujian kemudian dianalisis melalui grafik hubungan antara kadar aspal terhadap masing-masing parameter. Dari hasil analisis grafik, terlihat bahwa pada kadar aspal 4%, campuran menunjukkan performa terbaik. Nilai stabilitas berada mendekati maksimum, sementara flow masih berada dalam rentang spesifikasi. Selain itu, nilai VIM, VMA, dan VFA pada kadar aspal 4% juga memenuhi persyaratan untuk campuran aspal porous. Berdasarkan keseimbangan antara kekuatan, fleksibilitas, dan karakteristik rongga, maka kadar aspal 4% dipilih sebagai kadar aspal optimum (KAO) dan digunakan sebagai dasar campuran pada tahap penelitian selanjutnya, yaitu penambahan serat tali tampar.

#### 4.10 Pengujian Marshall Test Untuk Aspal Porus Dengan Tambahkan Serat Tampar

**Tabel 4. 28** Hasil Pengujian Test Marshall Untuk Aspal Porus Dengan Bahan Tambahan Serat tali tampar

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): $Pb = 0,035 \times (CA) + 0,045 \times (FA) + 0,18 \times (FF) + \text{Konstanta (laston} = 0,5 - 1 \text{ \& lataston} = 2 - 3)$										: 4.00 %																
No. Benda uji	Tebal benda uji (mm)					Kadar Srebuk 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								
	1	2	3	4	Rata - Rata	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R			
						Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100}{U - V}$	$\frac{100 - A}{S}$	$\frac{100(G - F)}{G}$	$\frac{100(H - I)}{I}$	Lab. Test	K. W. A. Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{100 U - S}{S \cdot U}$	$\frac{A - (100 - A)Q}{100}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A - Q}{XV(100 - A)}$				
1	60.4	60.2	60.3	60.2	60.28	0%	4.00	1109.8	621.5	1196.6	575.1	1.930	6.000	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		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		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			
1	63.4	63.2	63.3	63.2	63.28	0.10%	4.00	1129.8	639.5	1195.7	556.2	2.031		26.44	19.01	28.12	47	637.98	2.98	214.09						
2	65.3	65.2	65.3	65.1	65.23			1130.3	635.0	1206.6	571.6	1.977		1.977	28.39	21.15	25.49	52	676.60	3.48	194.43					
3	64.1	64.3	64.2	64.0	64.20			1130.7	623.3	1199.2	575.9	1.963		1.963	28.90	21.71	24.86	57	758.11	3.42	221.67					
Rata - Rata											1.991	2.508	27.91	20.62	26.16	52	690.90	3.29	210.06	0.199	3.81	0.76	13.90			
1	64.50	64.20	64.40	64.60	64.43	0.20%	4.00	1139.7	620.9	1197.6	576.7	1.976		28.43	21.20	25.44	54	714.72	2.39	299.05						
2	65.30	65.70	65.30	65.60	65.48			1134.7	639.2	1199.7	560.5	2.024		2.024	26.69	19.28	27.76	49	634.21	2.27	279.39					
3	64.50	64.60	64.30	64.20	64.40			1133.9	640.1	1209.1	569.0	1.993		1.993	27.83	20.54	26.20	62	821.05	3.29	249.56					
Rata - Rata											1.998	2.508	27.65	20.34	26.47	55	723.33	2.65	276.00	0.199	3.81	0.76	13.90			
1	70.80	71.10	70.82	71.71	71.11	0.25%	4.00	1148.1	633.2	1201.2	568.0	2.021		26.80	19.40	27.60	68	781.78	1.98	394.84						
2	69.10	69.30	69.73	69.73	69.47			1139.2	644.2	1195.5	551.3	2.066		2.066	25.17	17.61	30.05	57	679.04	2.79	243.38					
3	70.56	70.32	70.40	70.48	70.44			1142.4	639.6	1197.3	557.7	2.048		2.048	25.82	18.32	29.04	70	816.68	2.48	329.31					
Rata - Rata											2.045	2.508	25.93	18.44	28.90	65	759.17	2.42	322.51	0.199	3.81	0.76	13.90			

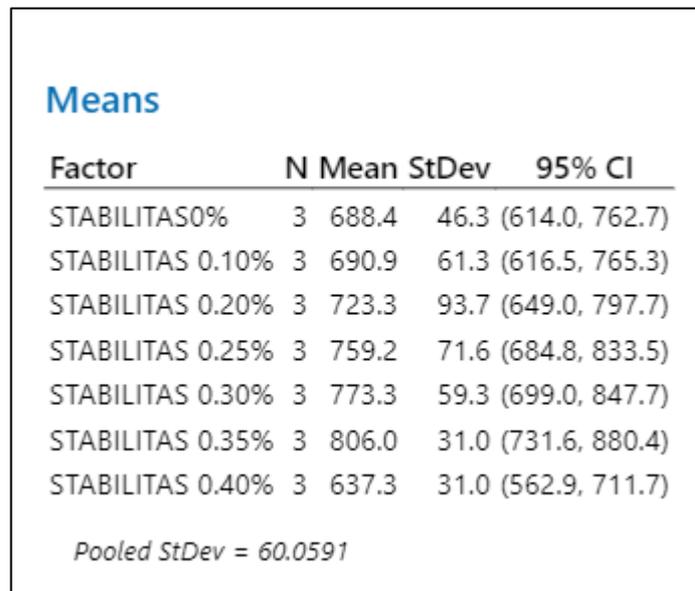
Jenis Campuran : ASPAL PORUS		Berat jenis bulk agregat ( S ) : 2.651				Aspal : Pertamina			Kalibrasi marshall ( W ) : 29.80															
Jumlah Tumbukan : 50		Gmm test ( T ) : 2.508				Penetrasi : 60/70			Luas Permukaan Ag. ( X ) : 2.74															
Suhu : 145 °C		Berat jenis efektif ag. ( U ) = $(100-Pb) / ((100/T) - (Pb/V))$ : 2.664				B. jenis ( V ) : 1.041			Partikel lolos sar. #200 ( Y ) : 2.90															
####										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						
	1	2	3	4	Rata - Rata	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
						Lab. Test	Lab. Test	Lab. Test	D - C	$\frac{G}{J}$	$\frac{100}{100-A + \Delta U V}$	$\frac{100 - F(100-A) S}{100(G - F) G}$	$\frac{100(H - I) I}{100(H - I) I}$	Lab. Test	K. W. A. Koreksi	Lab. Test	$\frac{L}{M}$	$\frac{A-(100-A)O}{100 U-S V S . U}$	$\frac{Y}{P}$	$\frac{A-O}{X V(100-A)}$				
1	71.22	71.80	71.65	71.90	71.64			1141.7	630.9	1195.4	564.5	2.022		26.76	19.36	27.66	65	738.34	2.97	248.60				
2	72.74	72.10	73.76	72.78	72.85	0.30%	4.00	1149.6	641.2	1197.7	556.5	2.066		25.19	17.63	30.01	67	739.83	1.88	393.53				
3	72.60	72.70	72.66	72.90	72.72			1141.9	639.7	1194.6	554.9	2.058		25.48	17.95	29.56	76	841.86	2.30	366.03				
Rata - Rata											2.049	2.508	25.81	18.31	29.08	69	773.34	2.38	336.05	0.199	3.81	0.76	13.90	
1	73.45	73.74	73.40	73.40	73.50			1144.7	645.9	1192.7	546.8	2.093		24.19	16.53	31.68	76	825.75	2.32	355.93				
2	73.86	73.76	73.10	73.50	73.56	0.35%	4.00	1141.6	649.2	1194.6	545.4	2.093		24.20	16.54	31.66	71	770.30	2.48	310.61				
3	73.36	72.10	73.56	73.60	73.16			1139.9	645.9	1195.2	549.3	2.075		24.85	17.25	30.56	75	821.90	2.12	387.69				
Rata - Rata											2.087	2.508	24.41	16.77	31.30	74	805.99	2.31	351.41	0.199	3.81	0.76	13.90	
1	73.91	73.80	73.90	73.79	73.85			1144.5	633.2	1190.2	557.0	2.055		25.59	18.07	29.39	57	613.76	2.51	244.52				
2	73.78	72.97	73.70	73.82	73.57	0.40%	4.00	1142.5	628.4	1191.7	563.3	2.028		26.55	19.13	27.96	62	672.45	3.18	211.46				
3	74.50	74.60	74.10	74.50	74.43			1141.9	632.5	1190.6	558.1	2.046		25.90	18.42	28.91	59	625.72	2.89	216.51				
Rata - Rata											2.043	2.508	26.01	18.54	28.75	59	637.31	2.86	224.17	0.199	3.81	0.76	13.90	

Sumber : Hasil Penelit

#### 4.11 Analisis Interval Kepercayaan Campuran Aspal Porus dengan penambahan Serat

Interval kepercayaan (confidence interval) adalah rentang nilai yang digunakan untuk mengestimasi parameter populasi berdasarkan data sampel, dengan tingkat keyakinan tertentu. Interval ini memberikan batas bawah dan batas atas yang diharapkan mencakup nilai parameter populasi sebenarnya. Misalnya, interval kepercayaan 95% berarti kita yakin sebesar 95% bahwa nilai parameter populasi berada dalam rentang tersebut. Interval kepercayaan tidak menjamin 100% kebenaran, melainkan menggambarkan tingkat keyakinan berdasarkan variasi data sampel. Semakin besar ukuran sampel atau semakin kecil tingkat kesalahan yang diinginkan, maka interval kepercayaan akan semakin sempit, menunjukkan estimasi yang lebih presisi.

##### 1. Stabilitas



**Means**

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
STABILITAS0%	3	688.4	46.3	(614.0, 762.7)
STABILITAS 0.10%	3	690.9	61.3	(616.5, 765.3)
STABILITAS 0.20%	3	723.3	93.7	(649.0, 797.7)
STABILITAS 0.25%	3	759.2	71.6	(684.8, 833.5)
STABILITAS 0.30%	3	773.3	59.3	(699.0, 847.7)
STABILITAS 0.35%	3	806.0	31.0	(731.6, 880.4)
STABILITAS 0.40%	3	637.3	31.0	(562.9, 711.7)

*Pooled StDev = 60.0591*

**Gambar 4. 12** Interval Kepercayaan 95% Nilai Stabilitas Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Data :

$$\text{Mean } \bar{x} = 688.4$$

$$\text{Pooled standard deviation } S_p = 60.0591$$

$$\text{Jumlah sampel per kelompok } n = 3$$

$$\text{Total kelompok } k = 7$$

$$\text{Total Observasi } N = 3 \times 7 = 21$$

$$\begin{aligned} \text{Derajat kebebasan error } df &= N - k \\ &= 21 - 7 = 14 \end{aligned}$$

$$\text{Nilai } t \text{ dua sisi untuk } \alpha = 0.05 \text{ dan } df = 14$$

$$t_{0.025, 14} \approx 2.144787$$

contoh Perhitungan :

**Langkah 1** Hitung standard error (SE)

$$\text{Hitung Standard error (SE)} = \frac{S_p}{\sqrt{n}} = \frac{60,0591}{\sqrt{3}} = 34,6710$$

**Langkah 2** Hitung margin of error

$$\text{Margin} = t \times \text{SE} = 2.144787 \times 34.6710 \approx 74.385$$

**Langkah 3** Hitung Interval Kepercayaan 95%

$$CI_{95\%} = \bar{x} \pm \text{Margin}$$

$$CI_{\text{lower}} = 688.4 - 74.385 \approx 614.015$$

$$CI_{\text{upper}} = 688.4 + 74.385 \approx 762.785$$

$$\text{Jadi } CI_{95\%} \approx (614.02, 762.79)$$

Berdasarkan hasil perhitungan interval kepercayaan 95% pada Gambar 4.12, nilai rata-rata stabilitas yang diperoleh untuk setiap kadar perlakuan berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kadar stabilitas memenuhi kriteria yang diharapkan pada tingkat kepercayaan 95%, sehingga variasi yang terjadi masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima secara statistik. Dengan demikian, hasil pengujian dapat dianggap konsisten dan representatif terhadap kondisi sebenarnya.

## 2. Flow

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
FLOW 0%	3	5.7033	0.1250	(5.2317, 6.1750)
FLOW 0.10%	3	3.293	0.273	(2.822, 3.765)
FLOW 0.20%	3	2.650	0.557	(2.178, 3.122)
FLOW 0.25%	3	2.417	0.409	(1.945, 2.888)
FLOW 0.30%	3	2.383	0.550	(1.912, 2.855)
FLOW 0.35%	3	2.307	0.180	(1.835, 2.778)
FLOW 0.40%	3	2.860	0.336	(2.388, 3.332)

*Pooled StDev = 0.380914*

**Gambar 4. 13** Interval Kepercayaan 95% Nilai Flow Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai rata-rata flow pada setiap kadar berada dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kadar flow memenuhi kriteria pada tingkat kepercayaan tersebut, sehingga variasi antar sampel masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima secara statistik. Dengan demikian, hasil pengujian nilai flow dapat dianggap valid, konsisten, dan representatif terhadap kondisi sebenarnya.

### 3. VIM

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
VIM 0%	3	23.560	0.439	(22.445, 24.676)
VIM 0.10%	3	20.624	1.429	(19.508, 21.739)
VIM 0.20%	3	20.339	0.977	(19.224, 21.455)
VIM 0.25%	3	18.443	0.905	(17.328, 19.559)
VIM 0.30%	3	18.310	0.919	(17.195, 19.426)
VIM 0.35%	3	18.246	0.596	(17.131, 19.362)
VIM 0.40%	3	16.751	0.687	(15.635, 17.866)

*Pooled StDev = 0.900827*

**Gambar 4. 14** Interval Kepercayaan 95% Nilai VIM Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata VIM pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh kadar VIM memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data VIM yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspal porus pada setiap kadar serat tali.

#### 4. VMA

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
VMA 0%	3	30.576	0.399	(29.563, 31.589)
VMA 0.10%	3	27.909	1.298	(26.896, 28.922)
VMA 0.20%	3	27.651	0.887	(26.638, 28.664)
VMA 0.25%	3	25.929	0.822	(24.916, 26.942)
VMA 0.30%	3	25.808	0.834	(24.795, 26.822)
VMA 0.35%	3	25.750	0.542	(24.737, 26.763)
VMA 0.40%	3	24.392	0.624	(23.379, 25.405)

*Pooled StDev = 0.818143*

**Gambar 4. 15** Interval Kepercayaan 95% Nilai VMA Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata VMA pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh kadar VMA memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data VMA yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspal porus

## 5. VFA

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
VFA 0%	3	22.950	0.434	(21.512, 24.388)
VFA 0.10%	3	26.158	1.726	(24.721, 27.596)
VFA 0.20%	3	26.469	1.185	(25.031, 27.906)
VFA 0.25%	3	28.896	1.229	(27.458, 30.334)
VFA 0.30%	3	29.080	1.247	(27.642, 30.517)
VFA 0.35%	3	29.153	0.833	(27.715, 30.591)
VFA 0.40%	3	31.345	1.052	(29.907, 32.783)

*Pooled StDev = 1.16105*

**Gambar 4. 16** Interval Kepercayaan 95% Nilai VFA Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata VFA pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh kadar VFA memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data VFA yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspal porus .

## 6. MQ

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
MQ 0%	3	120.67	6.95	(64.54, 176.79)
MQ 0.10%	3	210.06	14.06	(153.94, 266.18)
MQ 0.20%	3	276.0	24.9	(219.9, 332.1)
MQ 0.25%	3	322.5	76.0	(266.4, 378.6)
MQ 0.30%	3	336.1	77.0	(279.9, 392.2)
MQ 0.35%	3	351.4	38.7	(295.3, 407.5)
MQ 0.40%	3	224.2	17.8	(168.0, 280.3)

*Pooled StDev = 45.3232*

**Gambar 4. 17** Interval Kepercayaan 95% Nilai MQ Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata Marshall Quotient (MQ) pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kadar MQ memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data MQ yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspalporus.

## 7. DENSITY

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
DENSITY 0%	3	1.91704	0.01100	(1.88907, 1.94502)
DENSITY 0.10%	3	1.9907	0.0359	(1.9627, 2.0187)
DENSITY 0.20%	3	1.9978	0.0245	(1.9699, 2.0258)
DENSITY 0.25%	3	2.0454	0.0227	(2.0174, 2.0733)
DENSITY 0.30%	3	2.0487	0.0230	(2.0207, 2.0767)
DENSITY 0.35%	3	2.05032	0.01496	(2.02234, 2.07829)
DENSITY 0.40%	3	2.08783	0.01724	(2.05985, 2.11580)

*Pooled StDev = 0.0225920*

**Gambar 4. 18** Interval Kepercayaan 95% Nilai Density Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata density pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kadar density memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data density yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspal porus pada setiap kadar serat tali.

## 8. Permeabilitas

Means				
Factor	N	Mean	StDev	95% CI
PERMEABILITAS 0%	3	0.102655	0.000773	(0.100663, 0.104646)
PERMEABILITAS 0,10%	3	0.10001	0.00191	(0.09802, 0.10200)
PERMEABILITAS 0,20%	3	0.10133	0.00224	(0.09934, 0.10332)
PERMEABILITAS 0,25%	3	0.10079	0.00254	(0.09879, 0.10278)
PERMEABILITAS 0,30%	3	0.098131	0.001000	(0.096139, 0.100123)
PERMEABILITAS 0,35%	3	0.098898	0.001076	(0.096907, 0.100890)
PERMEABILITAS 0,40%	3	0.097526	0.000499	(0.095535, 0.099518)

*Pooled StDev = 0.00160844*

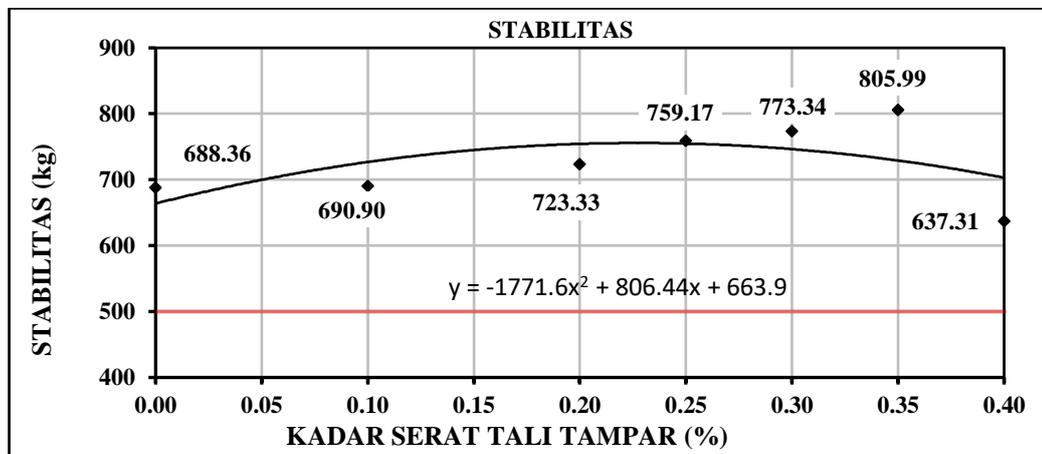
**Gambar 4. 19** Interval Kepercayaan 95% Nilai Permeabilitas Aspal Porus Menggunakan Pooled Standard Deviation

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil perhitungan, setiap nilai rata-rata permeabilitas pada masing-masing kadar serat tali berada di dalam rentang batas bawah dan batas atas interval kepercayaan 95% yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kadar permeabilitas memenuhi kriteria konsistensi data pada tingkat kepercayaan tersebut. Dengan demikian, variasi antar sampel tergolong wajar dan dapat diterima secara statistik, sehingga data permeabilitas yang diperoleh dianggap valid dan representatif untuk menggambarkan karakteristik campuran aspal porus pada setiap kadar serat tali.

## 4.12 Hasil pengujian Marshall pada campuran Aspal porous dengan Penambahan serat tali

### 4.12.1 Stabilitas



**Gambar 4.20** Grafik hubungan antara kadar aspal dan Stabilitas Aspal Porus

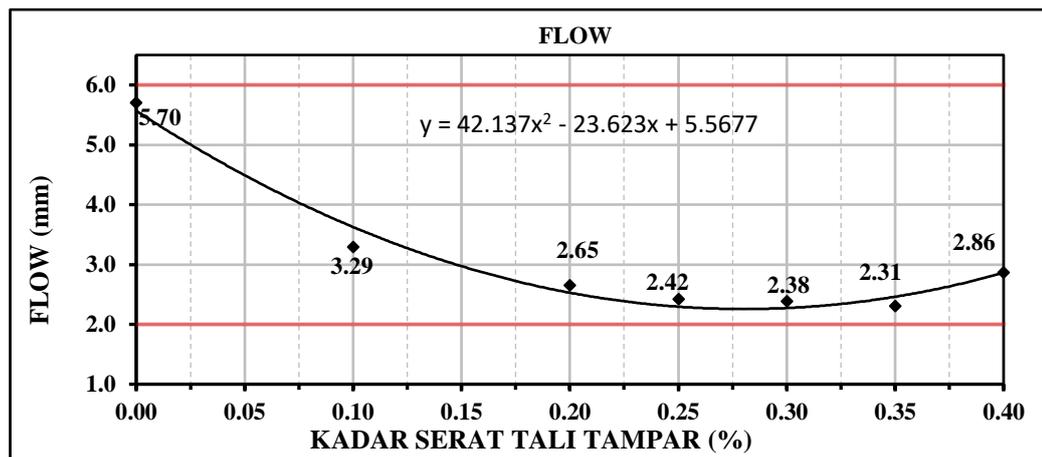
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.17 menunjukkan hubungan antara kadar aspal (%) terhadap stabilitas Marshall (kg) pada campuran aspal porous yang ditambahkan serat tali tamar. Dari grafik terlihat bahwa nilai stabilitas mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar aspal, hingga mencapai nilai maksimum, lalu mengalami penurunan kembali. Nilai stabilitas tertinggi terjadi pada kadar aspal 0,35%, yaitu sebesar 805,99 kg. Sedangkan nilai stabilitas terendah terjadi pada kadar aspal 0,40%, yaitu sebesar 637,31 kg.

Penambahan kadar serat tali tamar dari 0,10% hingga 0,40% memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas, karena aspal berfungsi sebagai bahan pengikat antar agregat dan serat, sehingga memperkuat struktur campuran. Namun, ketika kadar serat tali tamar ditambah hingga 0,40%, nilai stabilitas justru menurun namun masih memenuhi standart AAPA yaitu >500 kg.

Berdasarkan hasil perhitungan grafik polynomial (tabel 4.17), nilai stabilitas optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,23%. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai puncak stabilitas eksperimental tercatat pada kadar aspal 0,35%, secara matematis kadar serat optimum yang menghasilkan performa stabilitas terbaik berada pada kisaran 0,23%.

#### 4.12.2 Flow



**Gambar 4.21** Grafik hubungan antara kadar aspal dan Flow Aspal Porus

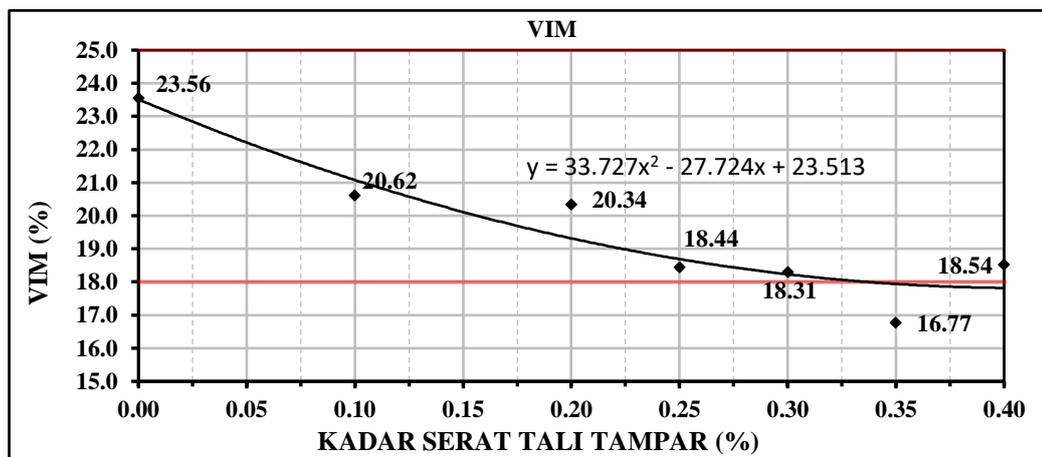
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.18 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tampar terhadap nilai flow pada campuran aspal porous dengan kadar aspal optimum sebesar 4%. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa penambahan serat tali tampar berpengaruh terhadap perubahan nilai flow yang menunjukkan tingkat deformasi plastis campuran saat menerima beban.

Pada kadar serat 0%, nilai flow tercatat sebesar 5,70 mm, yang menandakan bahwa campuran memiliki sifat plastis yang tinggi atau cenderung lunak. Seiring dengan penambahan serat tali tampar, nilai flow mengalami penurunan. Pada kadar serat 0,25%, flow turun menjadi 2,42 mm dan mencapai titik terendah sebesar 2,31 mm pada kadar serat 0,35%. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan serat mampu meningkatkan kekakuan campuran dan mengurangi deformasi saat menerima beban. Namun setelah melewati kadar 0,35%, nilai flow kembali mengalami kenaikan, yaitu 2,86 mm

pada kadar serat 0,40% Meskipun demikian, seluruh nilai flow yang diperoleh masih berada dalam rentang standar spesifikasi, yaitu antara 2 mm hingga 6 mm, sehingga campuran aspal porous yang ditambahkan serat tali tampar masih memenuhi kriteria kelayakan dari segi flow. Untuk parameter Flow, hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai Flow optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,28%. Nilai ini berada dalam rentang yang memenuhi kriteria Marshall, di mana Flow yang ideal mencerminkan kemampuan deformasi plastis campuran tanpa mengalami kerusakan struktural.

#### 4.12.3 Void In Mix (VIM)



**Gambar 4.22** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VIM Aspal Porous

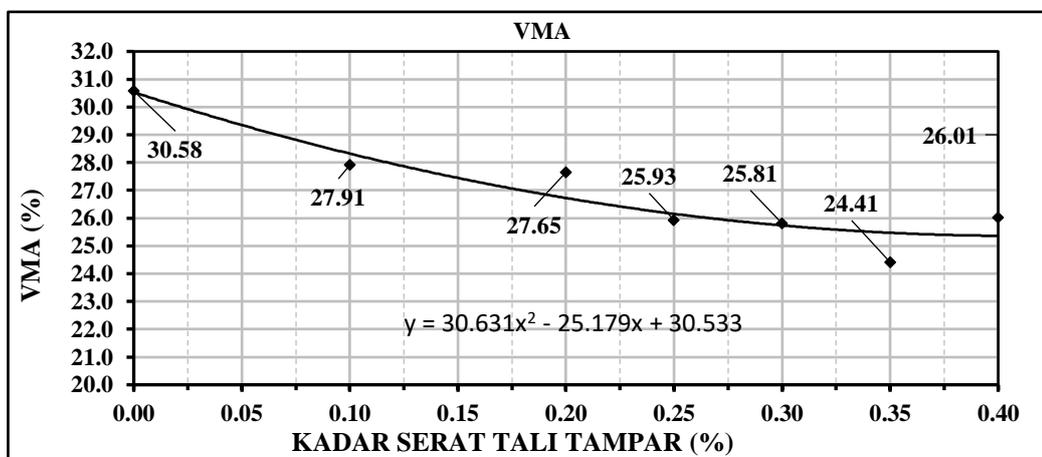
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.19 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tampar terhadap nilai Void in Mixture (VIM) pada campuran aspal porous dengan kadar aspal tetap sebesar 4%. Dari grafik terlihat bahwa penambahan serat tali tampar menyebabkan nilai VIM cenderung menurun. Pada kadar serat 0%, nilai VIM tercatat sebesar 23,56%, kemudian menurun secara bertahap menjadi 20,62% pada kadar 0,10%, hingga mencapai Penurunan yang paling signifikan terjadi pada kadar serat 0,35% yaitu 16,77%.

Penurunan nilai VIM ini menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran semakin sedikit akibat pengisian ruang kosong oleh serat tali tampar. Hal ini dapat meningkatkan kekompakan campuran, tetapi jika nilai VIM terlalu rendah, maka dapat mengurangi permeabilitas dan berisiko menyebabkan bleeding. Berdasarkan spesifikasi untuk aspal porous, nilai VIM harus berada di atas 17% agar tetap memenuhi syarat sebagai campuran berpori. Dengan demikian, campuran dengan kadar serat hingga 0,40% masih memenuhi standar, namun pada kadar 0,35%, nilai VIM turun menjadi 16,77%, yang berarti sudah berada di bawah batas minimum dan tidak lagi memenuhi syarat sebagai aspal porous yang baik.

Untuk parameter VIM (Void in Mix), hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,41%. Nilai ini menunjukkan bahwa rongga dalam campuran masih cukup terbuka untuk memungkinkan aliran air, sesuai dengan karakteristik campuran aspal porous yang memerlukan nilai VIM minimum sekitar 18% menurut beberapa referensi. Meskipun sedikit di bawah batas ideal, nilai tersebut masih menunjukkan performa drainase yang baik dan konsisten dengan fungsi utama aspal porous.

#### 4.12.4 Void in Mineral Aggregate (VMA)



**Gambar 4.23** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VMA Aspal Porous

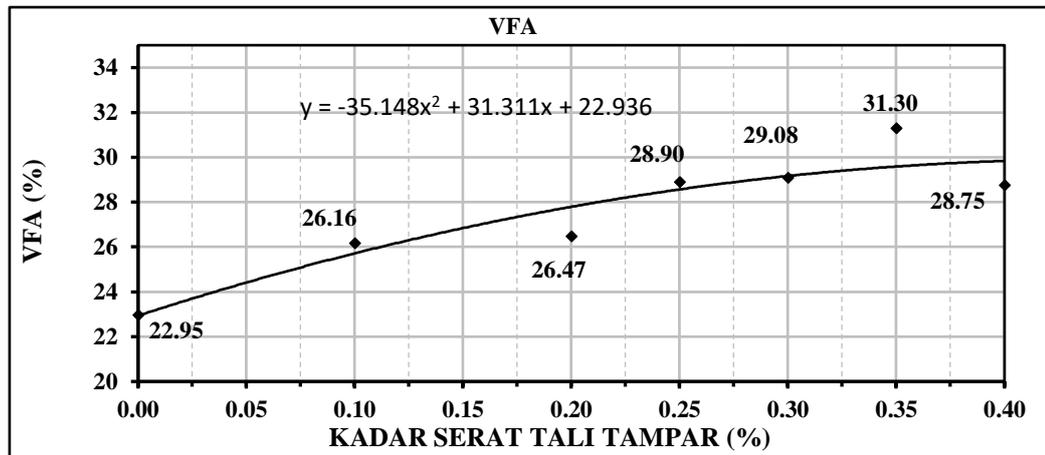
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.20 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tamper terhadap nilai VMA (Voids in Mineral Aggregate) pada campuran aspal porous dengan kadar aspal tetap sebesar 4%. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa nilai VMA mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar serat. Pada kadar serat 0%, nilai VMA tercatat sebesar 30,58%, kemudian menurun menjadi 27,91% pada kadar 0,25%, Nilai terendah terjadi pada kadar serat 0,35%, yaitu sebesar 24,41%. Namun nilai VMA Kembali naik di kadar serat 0,40% sebesar 26,01%.

Penurunan nilai VMA ini menunjukkan bahwa penambahan serat tali tamper menyebabkan ruang antar agregat (voids) menjadi lebih sedikit. Hal ini terjadi karena serat mengisi sebagian rongga di antara butiran agregat dan membuat campuran menjadi lebih padat. Meskipun penurunan ini meningkatkan kekompakan, nilai VMA yang terlalu rendah dapat mengindikasikan kurangnya ruang untuk menampung aspal dan udara, sehingga berpotensi menurunkan daya tahan campuran terhadap kerusakan akibat beban dan suhu. Secara keseluruhan, penambahan serat dalam jumlah kecil masih dapat diterima, tetapi jika terlalu banyak (seperti pada kadar 0,40%), penurunan VMA harus diwaspadai karena bisa berdampak terhadap karakteristik fungsional campuran aspal porous.

Untuk parameter VMA (Void in Mineral Aggregate), hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,41%. Nilai ini mencerminkan ruang kosong antara butir agregat yang diisi oleh aspal dan rongga udara, yang cukup tinggi untuk menunjang stabilitas struktur dan kelangsungan fungsi drainase. Nilai VMA yang tinggi umumnya dibutuhkan dalam campuran aspal porous agar dapat mengakomodasi kadar rongga (VIM) yang besar serta mempertahankan ketahanan terhadap deformasi permanen.

#### 4.12.5 Voids Filled with Asphalt (VFA)



**Gambar 4.24** Grafik hubungan antara kadar aspal dan VFA Aspal Porus

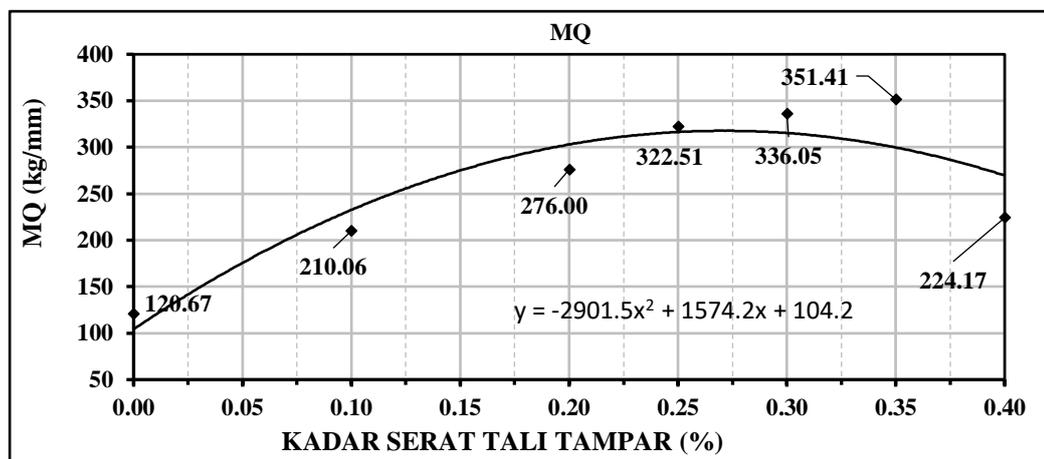
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.21 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tampar terhadap nilai VFA (Voids Filled with Asphalt) pada campuran aspal porous dengan kadar aspal tetap sebesar 4%. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa penambahan serat tali tampar menyebabkan nilai VFA meningkat secara bertahap. Pada kadar serat 0%, nilai VFA tercatat sebesar 22,95%, kemudian meningkat menjadi 26.16% pada kadar serat 0,10%, hingga presentase 0,40% dan mencapai nilai tertinggi sebesar 31,30% pada kadar serat 0,35%.

Peningkatan nilai VFA menunjukkan bahwa persentase rongga yang terisi oleh aspal dalam agregat semakin tinggi akibat penambahan serat. Hal ini mengindikasikan bahwa serat tali tampar membantu mempertahankan aspal di dalam struktur campuran, sehingga rongga yang sebelumnya kosong menjadi lebih banyak terisi. Meski demikian, jika nilai VFA terlalu tinggi, hal ini dapat menyebabkan potensi bleeding, sedangkan nilai yang terlalu rendah menandakan campuran kekurangan aspal. Secara umum, tren peningkatan nilai VFA menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar dalam campuran aspal porous berkontribusi terhadap meningkatnya efisiensi pengisian rongga oleh aspal, dan seluruh hasil pengujian masih berada dalam rentang yang dapat diterima menurut karakteristik campuran berpori.

Untuk parameter VFA (Void Filled with Asphalt), hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,45%. Nilai ini mengindikasikan persentase rongga dalam agregat mineral (VMA) yang terisi oleh aspal. Dalam campuran aspal porous, nilai VFA yang lebih rendah memang diharapkan agar rongga tetap terbuka untuk fungsi drainase. Oleh karena itu, nilai VFA ini masih sesuai dengan karakteristik campuran berpori, di mana tidak seluruh rongga terisi aspal sehingga air tetap dapat mengalir melalui struktur.

#### 4.12.6 Marshall Quotient (MQ)



**Gambar 4.25** Grafik hubungan antara kadar aspal dan MQ Aspal Porus

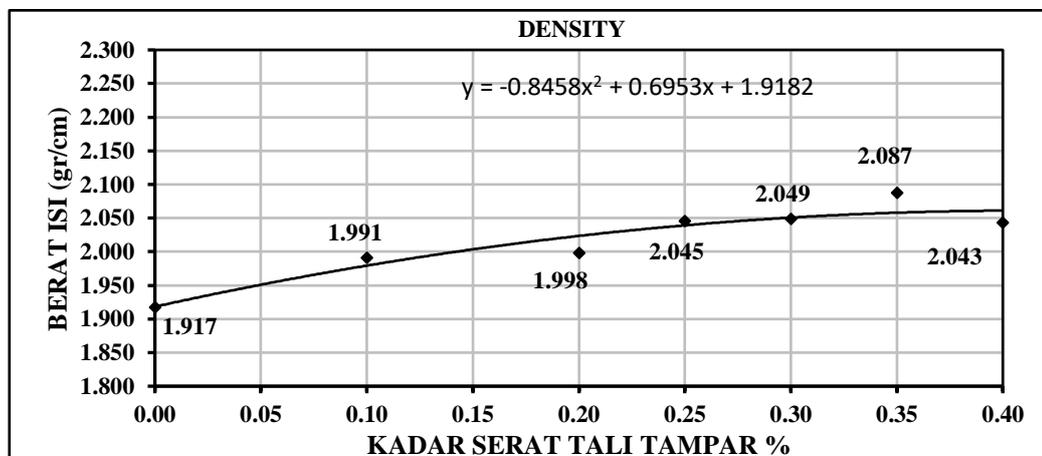
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.22 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tampar terhadap nilai MQ (Marshall Quotient) pada campuran aspal porous dengan kadar aspal tetap sebesar 4%. Nilai MQ merupakan perbandingan antara stabilitas dan flow, yang mencerminkan kekakuan campuran dalam menahan deformasi akibat beban. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa penambahan serat tali tampar menyebabkan nilai MQ mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimum pada kadar serat tertentu, kemudian menurun kembali. Pada kadar serat 0%, nilai MQ tercatat sebesar 120,67 kg/mm, lalu meningkat secara signifikan menjadi 210,06 kg/mm pada kadar serat 0,10%. Hingga mencapai nilai tertinggi diperoleh pada kadar 0,35%, yaitu sebesar 351,41 kg/mm, sebelum akhirnya menurun menjadi 224,17 kg/mm pada kadar serat 0,40%.

Peningkatan nilai MQ hingga kadar 0,35% menunjukkan bahwa serat tali tampar berkontribusi dalam meningkatkan kekakuan campuran dengan memperkuat ikatan antar agregat dan membatasi deformasi. Namun, pada kadar serat 0,40%, nilai MQ menurun secara tajam, yang kemungkinan disebabkan oleh kelebihan serat yang mengganggu homogenitas dan distribusi beban dalam campuran. Berdasarkan spesifikasi umum, nilai MQ yang baik berada di atas 200 kg/mm, dan dari grafik ini dapat disimpulkan bahwa kadar serat 0,25% hingga 0,35% memberikan hasil yang optimal dan memenuhi kriteria kelayakan dari segi kekakuan campuran.

Untuk parameter MQ (Marshall Quotient), hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,27%. Nilai MQ menggambarkan kekakuan campuran, yang diperoleh dari perbandingan antara stabilitas dan flow. Nilai MQ yang tinggi menandakan campuran memiliki ketahanan deformasi yang baik terhadap beban lalu lintas. Pada campuran aspal porous, nilai MQ yang optimum menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar mampu meningkatkan ketahanan struktural tanpa mengorbankan fleksibilitas campuran.

#### 4.12.7 Berat Isi (Density)



**Gambar 4. 26** Grafik hubungan antara kadar aspal dan Density Aspal Porus  
Sumber: hasil penelitian

Gambar 4.23 menunjukkan grafik hubungan antara kadar serat tali tampar terhadap nilai density (berat isi) pada campuran aspal porous dengan kadar aspal tetap sebesar 4%. Dari grafik terlihat bahwa penambahan serat tali tampar memberikan pengaruh terhadap peningkatan nilai density. Pada kadar serat 0%, nilai density tercatat sebesar 1,917 gr/cm<sup>3</sup>, kemudian meningkat secara bertahap menjadi 1,991 gr/cm<sup>3</sup> pada kadar 0,10%, hingga mencapai nilai tertinggi pada kadar 0,35% yaitu sebesar 2,087 gr/cm<sup>3</sup> lalu turun Kembali menjadi 2,043 gr/cm<sup>3</sup> pada kadar serat 0,40%. Peningkatan nilai density ini menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar mampu meningkatkan kepadatan campuran. Hal ini disebabkan oleh kemampuan serat dalam mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat dan memperkuat struktur internal campuran, sehingga berat isi meningkat. Semakin tinggi berat isi, maka semakin padat dan solid campuran tersebut.

Tidak terjadi penurunan nilai density pada kadar serat tertinggi, yang mengindikasikan bahwa serat tali tampar masih dapat diterima dalam campuran tanpa menyebabkan overvoid atau kekosongan yang mengganggu struktur. Secara keseluruhan, penambahan serat tali tampar dalam rentang 0% hingga 0,40% mampu meningkatkan density campuran aspal porous, yang merupakan indikator positif terhadap kepadatan dan kestabilan struktur campuran.

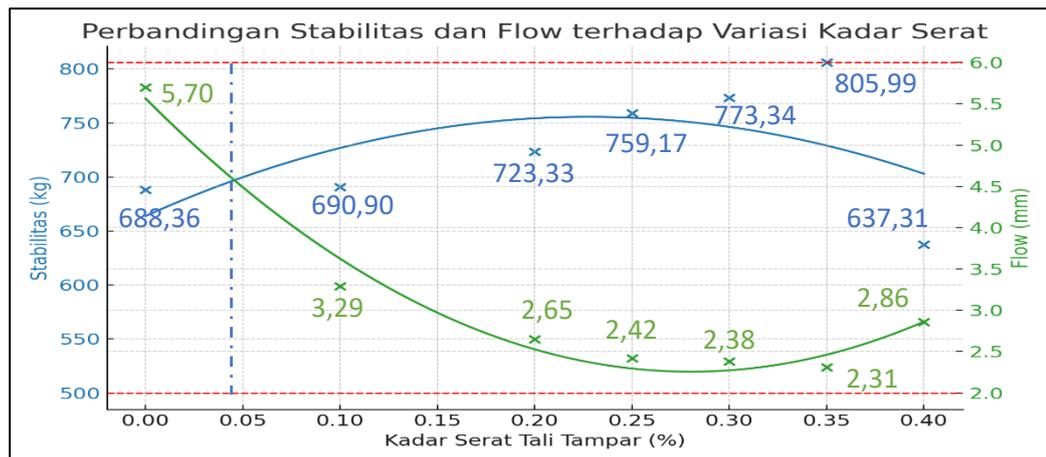
Untuk parameter Density, hasil perhitungan grafik polynomial menunjukkan bahwa nilai optimum diperoleh pada kadar serat sebesar 0,41% dengan. Nilai kepadatan ini mencerminkan seberapa padat susunan partikel dalam campuran. Dalam campuran aspal porous, nilai density yang seimbang penting untuk menjaga stabilitas struktur tanpa mengurangi jumlah rongga yang diperlukan untuk fungsi drainase. Kepadatan optimum ini menunjukkan bahwa pada kadar serat tersebut, distribusi agregat, aspal, dan rongga berada dalam kondisi paling ideal untuk mendukung performa mekanis dan permeabilitas campuran.

#### **4.13 Keterkaitan Parameter Marshall pada Penambahan Serat Tali**

Pada kadar serat tali rendah–sedang, stabilitas meningkat karena serat bertindak sebagai penguat yang memperkuat ikatan agregat–aspal. Peningkatan stabilitas ini biasanya diikuti penurunan flow, sehingga campuran lebih kaku dan MQ (Stabilitas/Flow) ikut meningkat.

Dari sisi struktur rongga, VIM menurun karena serat dan aspal mengisi sebagian rongga udara. VMA justru menurun (bukan naik) akibat penataan ulang butiran menjadi lebih rapat dan sebagian ruang antar-mineral terisi/terjembatani oleh serat, sehingga volume rongga di antara agregat berkurang. Dengan VIM turun dan VMA turun, VFA meningkat karena proporsi rongga agregat (VMA) yang terisi aspal menjadi lebih besar. Secara matematis,  $VFA = (VMA - VIM) / VMA \times 100\%$ , sehingga jika penurunan VIM relatif lebih besar daripada penurunan VMA, VFA akan naik.

Density memiliki keterkaitan erat dengan parameter Marshall lainnya. Peningkatan density umumnya diikuti oleh penurunan VIM karena rongga udara terisi oleh aspal dan serat, yang pada gilirannya meningkatkan nilai VFA. Density yang tinggi juga berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas karena campuran menjadi lebih rapat dan mampu menahan beban dengan lebih baik. Pada kadar serat optimum, density yang tinggi biasanya diiringi oleh nilai flow yang moderat sehingga menghasilkan nilai MQ yang tinggi. Namun, jika density terlalu tinggi dan flow terlalu rendah, campuran berpotensi menjadi terlalu kaku dan rentan mengalami retak. Dengan demikian, pengendalian density pada kadar optimum sangat penting untuk memastikan semua parameter Marshall berada pada rentang yang sesuai spesifikasi



**Gambar 4.27** Grafik Perbandingan Stabilitas dan Flow

Grafik perbandingan antara stabilitas dan flow terhadap variasi kadar serat menunjukkan adanya perbedaan pola hubungan yang saling berlawanan. Nilai stabilitas membentuk kurva parabola terbuka ke bawah, di mana nilainya meningkat seiring penambahan serat hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kadar serat yang lebih tinggi. Sebaliknya, nilai flow membentuk kurva parabola terbuka ke atas, dengan kecenderungan menurun hingga titik terendah pada kadar serat optimum, kemudian kembali sedikit meningkat pada kadar serat lebih tinggi.

Adanya titik potong visual antara kedua kurva ini mengindikasikan bahwa pada kadar serat tertentu, terjadi keseimbangan antara kekuatan campuran (stabilitas) dan fleksibilitasnya (flow). Hal ini penting karena campuran aspal yang baik bukan hanya memiliki stabilitas tinggi, tetapi juga harus tetap memiliki nilai flow yang sesuai standar agar tidak menjadi terlalu kaku dan mudah retak.

Dengan demikian, titik perpotongan grafik dapat ditafsirkan sebagai kadar serat optimum, di mana campuran memperoleh stabilitas maksimum sambil tetap mempertahankan flow dalam batas spesifikasi. Pada penelitian ini, titik keseimbangan tersebut berada di sekitar kadar serat 0,04%, yang menghasilkan kondisi paling ideal karena campuran mampu menahan beban lalu lintas dengan baik sekaligus tetap cukup lentur untuk mengakomodasi deformasi tanpa mengalami kerusakan dini

#### 4.14 Perhitungan Kadar Serat Tali Tampir Optimum Pada Campuran

##### Aspal Porus

Untuk memperoleh Nilai kadar serat optimum, terlebih dahulu dilakukan analisis grafik dari campuran aspal porus dengan ditambahkan serat tali tampir 0.10%, 0.20%, 0.25%, 0,30%, 0,35%, dan 0,40%, Penggunaan persamaan polinomial pada grafik Marshall didasarkan pada sifat hubungan antara kadar bahan tambahan, seperti serbuk ban, dengan parameter Marshall (misalnya stabilitas, VIM, VMA, *flow*) yang umumnya tidak bersifat linear. Perubahan kadar serbuk ban tidak selalu menghasilkan kenaikan atau penurunan parameter secara lurus, melainkan cenderung membentuk kurva melengkung seperti parabola yang memiliki titik maksimum atau minimum. Persamaan polinomial derajat 2 (kuadratik) sangat tepat digunakan untuk memodelkan pola ini karena bentuk umumnya,  $y=ax^2+bx+c$  =  $ax^2 + bx + c$ , mampu merepresentasikan hubungan melengkung yang terjadi pada data. Pada derajat ini, koefisien  $a$  menentukan kelengkungan kurva (cembung ke atas atau ke bawah), sedangkan titik optimum dapat dihitung melalui kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan polinomial grafik, berikut merupakan grafik pengujian Marshall :

**Tabel 4.29** Perhitungan kadar serat Optimum pada campuran aspal porus

Parameter	a	b	c	x optimum (%)	y optimum
Stabilitas	-1,771.6	806.44	663.900	0.23	755.6737
Flow	42.137	-23.623	5.568	0.28	2.2568
VIM	33.727	-27.724	23.513	0.41	17.8156
VMA	30.631	-25.179	30.533	0.41	25.3587
VFA	-35.148	31.311	22.936	0.45	29.9092
MQ	-2,901.5	1,574.2	104.20	0.27	317.7194
Density	-0.8458	0.6953	1.9182	0.41	2.0611

Sumber:hasil penelitian

Perhitungan dilakukan menggunakan rumus persamaan polinomial sebagai berikut :

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

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

Contoh perhitungan :

$$\begin{aligned} X \text{ Optimum} &= - \frac{806,44}{2 \times (-1771,6)} \\ &= 0,23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y \text{ Optimum} &= -1771,6 \times 0,23^2 + 806,44 \times 0,23 + 663.900 \\ &= 755.6737 \end{aligned}$$

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

X optimum (Kadar serat tali tampar optimum)

$$= \frac{0,23+0,28+0,41+0,41 \quad 0,45+0,27+0,41}{2} = 0,351 \approx 0,35 \%$$

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa kadar serat tali tampar optimum adalah sebesar 0,35%. Nilai ini menunjukkan titik terbaik di mana karakteristik campuran aspal porous menunjukkan performa paling stabil dan seimbang berdasarkan parameter Marshall yang dianalisis.

#### 4.15 Langkah-Langkah Pengujian Marshall

##### 1. Penimbangan Bahan

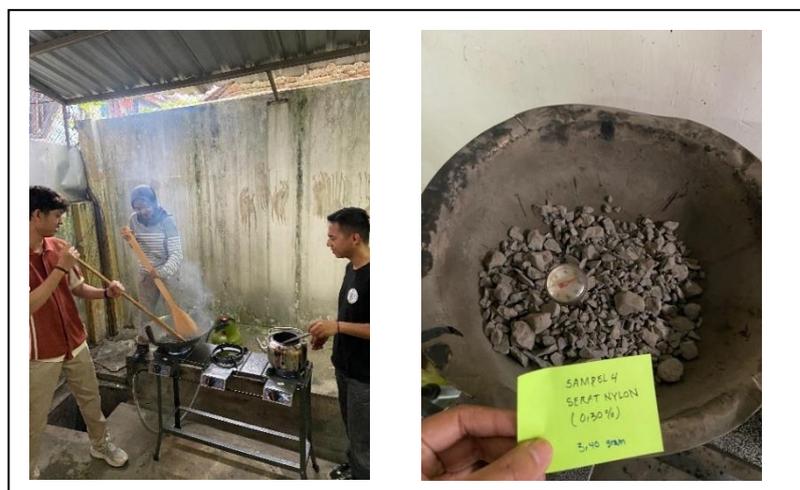
Agregat kasar, halus, filler, dan serat tali tampar ditimbang sesuai komposisi campuran



**Gambar 4.28** Penimbangan agregat dan serat dengan timbangan digital

##### 2. Pemanasan Bahan

Agregat dan aspal dipanaskan terlebih dahulu dengan cara diaduk dalam wajan hingga mencapai suhu  $\pm 150^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.29** Pemanas agregat dalam wajan

### 3. Pencampuran Bahan dengan Aspal

Setelah mencapai suhu pencampuran, Agregat ditimbang Kembali lalu dimasukkan berat aspal dan dicampur dengan agregat dalam wajan.



**Gambar 4.30** Proses pencampuran Aspal di wadah tahan panas

### 4. Pencampuran Bahan dengan serat

Setelah bahan mencapai suhu  $150^{\circ}$  bahan lalu didiamkan hingga suhu turun kurang lebih  $100^{\circ}$  lalu serat dimasukkan dan diaduk agar merata.



**Gambar 4.31** proses pencampuran Aspal dengan serat tali

5. Pengisian ke Cetakan Marshall

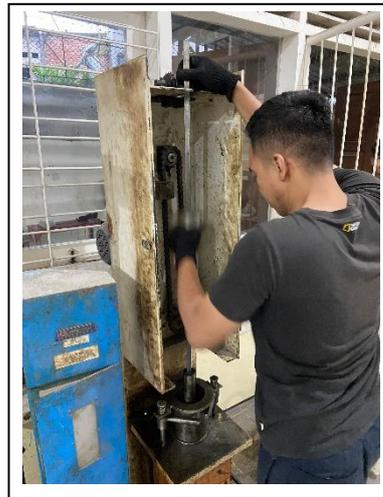
Campuran yang telah homogen dimasukkan ke dalam cetakan Marshall dengan pelapis kertas tahan panas.



**Gambar 4.32** proses pemindahan campuran ke cetakan.

6. Pemadatan Sampel

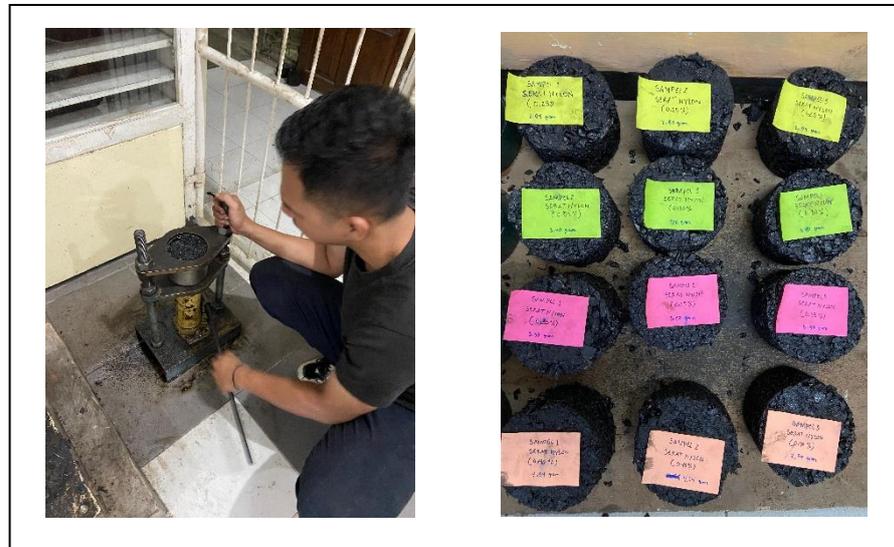
Cetakan dipadatkan dengan Marshall compactor sebanyak 50 tumbukan per sisi.



**Gambar 4.33** Pemadatan menggunakan alat pemukul Marshall

## 7. Pendinginan dan Pelepasan Sampel

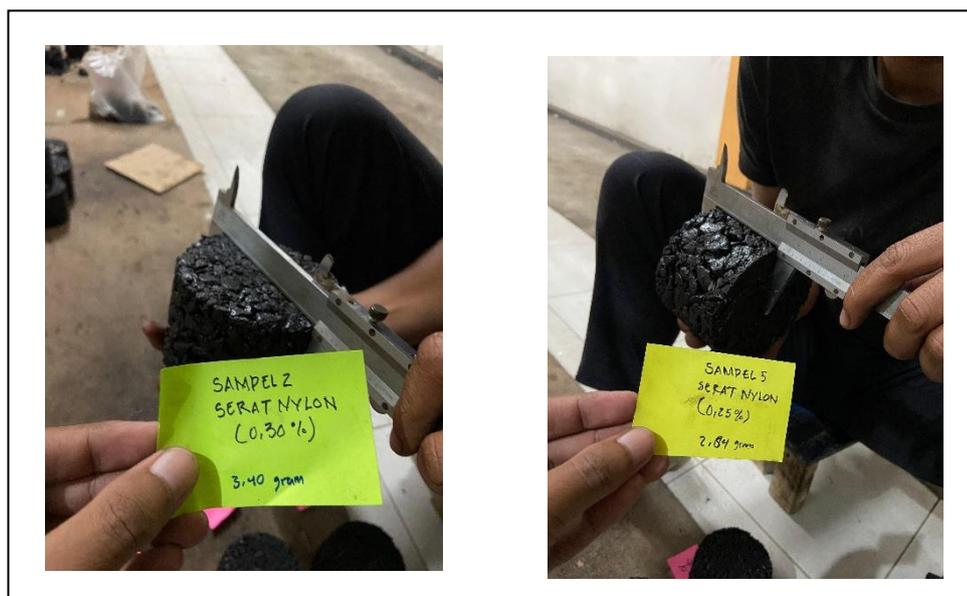
Sampel didinginkan pada suhu ruang, lalu dikeluarkan dari cetakan dengan alat jack extractor.



**Gambar 4.34** Proses pengeluaran benda uji dari cetakan

## 8. Pengukuran Dimensi Sampel

Tinggi dan diameter sampel diukur menggunakan jangka sorong untuk mengetahui volume dan koreksi kepadatan.



**Gambar 4.35** Pengukuran tinggi dan diameter sampel

## 9. Penimbangan Sampel

Setiap sampel ditimbang dalam tiga kondisi:

- Kering Oven (sebelum direndam)
- SSD (Saturated Surface Dry) atau jenuh permukaan kering
- Dalam air (terendam penuh)



**Gambar 4.36** Proses penimbangan kering, SSD, dan dalam air

## 10. Perendaman dalam Waterbath

Sampel direndam di dalam waterbath selama 30 mneit



**Gambar 4.37** Sampel di dalam waterbath.

## 11. Pengujian Stabilitas dan Flow

Sampel diuji menggunakan alat uji Marshall



**Gambar 4.38** Proses pengujian di mesin Marshall

## 12. Pencatatan dan Analisis Data

Hasil pengujian dicatat dan dianalisis untuk menentukan pengaruh variasi kadar serat terhadap kinerja campuran

### **4.16 Pengujian Permeabilitas Aspal Porus dengan Modifikasi serat tali tampar**

Pengujian permeabilitas dilakukan untuk menilai kemampuan campuran aspal porus dalam mengalirkan air setelah diberi tambahan bahan berupa serat tali tampar. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana penambahan serat tali tampar memengaruhi daya serap dan kemampuan drainase dari campuran aspal porus. Setiap variasi kadar serat tali tampar diuji untuk mengevaluasi perubahan nilai permeabilitas yang terjadi. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Nasional Malang menggunakan metode constant head, yang sesuai untuk menguji material berpori seperti aspal porus. Permeabilitas sendiri merupakan kemampuan suatu material berpori untuk mentransmisikan cairan melewati pori-porinya. Nilai hasil pengujian pada masing-masing kadar serat tali tampar disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan analisis dan perbandingan antar variasi campuran.

#### 4.17 Langkah-Langkah Pengujian Permeabilitas Metode Constant Head

Pengujian permeabilitas metode constant head bertujuan untuk mengetahui kemampuan aliran air melalui campuran aspal porous. Metode ini dilakukan dengan membiarkan air mengalir secara konstan melewati sampel, lalu mengukur volume air yang keluar dalam waktu tertentu. Berikut adalah tahapan pengujian:

1. Sampel Marshall direndam dalam air selama 24 jam untuk memastikan kondisi jenuh.



**Gambar 4.39** Proses perendaman sampel dalam wadah air bersih

2. Persiapan Alat dan Kalibrasi



**Gambar 4.40** Tampilan alat uji sebelum digunakan

### 3. Pengukuran Dimensi Sampel



**Gambar 4.41** Tampilan alat uji sebelum digunakan

### 4. Pemasangan Sampel

Tempatkan sampel secara tegak lurus dalam tabung permea.



**Gambar 4.42** Tampilan alat uji sebelum digunakan

## 5. Penyesuaian Head Air

Atur ketinggian air (head) dari permukaan atas sampel hingga permukaan air konstan.



**Gambar 4.43** Pengukuran head air menggunakan mistar

## 6. Pengujian Aliran

Alirkan air hingga sistem stabil (head konstan).



**Gambar 4.44** Air mengalir dan ditampung di bawah alat uji

## 7. Pemindahan Air ke Gelas Ukur

Setelah waktu tertentu, air dari wadah penampung dipindahkan ke gelas ukur untuk mengetahui volume air secara akurat.



**Gambar 4.45** Pemindahan air dari penampung ke gelas ukur.

## 8. Perhitungan Koefisien Permeabilitas

Gunakan rumus berikut:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

**Tabel 4.30** Hasil Pengujian Permeabilitas Pada Setiap Kadar serat tali tampar

Variasi Kadar Lateks	No	Diameter (D) (cm)	Tinggi (L) (cm)	Luas (A) (cm <sup>2</sup> )	Isi (V) (cm <sup>3</sup> )	h1 (cm)	h2 (cm)	h (cm)	Waktu Mulai	Interval Waktu t (detik)	Total debit terukur Q (ml)	Debit per satuan waktu q (ml/menit)	$\frac{1}{\sqrt{t}}$	Koefisien	Rata - rata K
0%	1	10.19	7.08	81.51	577.100	110	17	93	12:30	10	1100	0.0173	0.3162	0.1027	0.1027
	2	10.122	7.16	80.43	575.858	110	17	93	12:35	10	1080	0.0174	0.3162	0.1034	
	3	10.114	7.075	80.30	568.123	110	17	93	12:30	10	1075	0.0176	0.3162	0.1018	
0,10%	1	10.23	7.065	82.15	580.408	110	17	93	13:30	10	1095	0.0172	0.3162	0.1013	0.10001
	2	10.24	7.09	82.31	583.601	110	17	93	14:30	10	1090	0.0171	0.3162	0.1010	
	3	10.295	7.08	83.20	589.055	110	17	93	15:30	10	1075	0.0170	0.3162	0.0978	
0,20%	1	10.265	7.01	82.72	579.837	110	17	93	16:30	10	1100	0.0172	0.3162	0.1002	0.1013
	2	10.287	6.98	83.07	579.833	110	17	93	17:30	10	1105	0.0172	0.3162	0.0998	
	3	10.294	6.99	83.18	581.454	110	17	93	18:30	10	1150	0.0172	0.3162	0.1039	
0,25%	1	10.22	7.05	81.99	578.04	110	17	93	19:30	10	1075	0.0173	0.3162	0.0994	0.1008
	2	10.27	7.21	82.80	596.961	110	17	93	20:30	10	1060	0.0168	0.3162	0.0993	
	3	10.197	7.19	81.62	586.872	110	17	93	21:30	10	1095	0.0170	0.3162	0.1037	
0,30%	1	10.22	7.23	81.99	591.245	110	17	93	22:30	10	1040	0.0169	0.3162	0.0986	0.0981
	2	10.285	7.167	83.04	595.135	110	17	93	23:30	10	1045	0.0168	0.3162	0.0970	
	3	10.196	7.245	81.61	591.245	110	17	93	0:30	10	1035	0.0169	0.3162	0.0988	
0,35%	1	10.228	7.31	82.12	600.300	110	17	93	1:30	10	1030	0.0167	0.3162	0.0986	0.0989
	2	10.24	7.36	82.31	602.281	110	17	93	2:30	10	1035	0.0166	0.3162	0.1001	
	3	10.24	7.32	82.31	602.533	110	17	93	3:30	10	1025	0.0166	0.3162	0.0980	
0,40%	1	10.288	7.338	83.09	609.690	110	17	93	4:30	10	1030	0.0164	0.3162	0.0978	0.0975
	2	10.288	7.41	83.09	615.673	110	17	93	5:30	10	1020	0.0162	0.3162	0.0978	
	3	10.31	7.34	83.44	612.467	110	17	93	6:30	10	1025	0.0163	0.3162	0.0970	

Sumber: hasil penelitian

Untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas digunakan rumus :

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

Dimana:

X

Q = Volume air yang mengalir cm<sup>3</sup>

L = Panjang spesimen cm

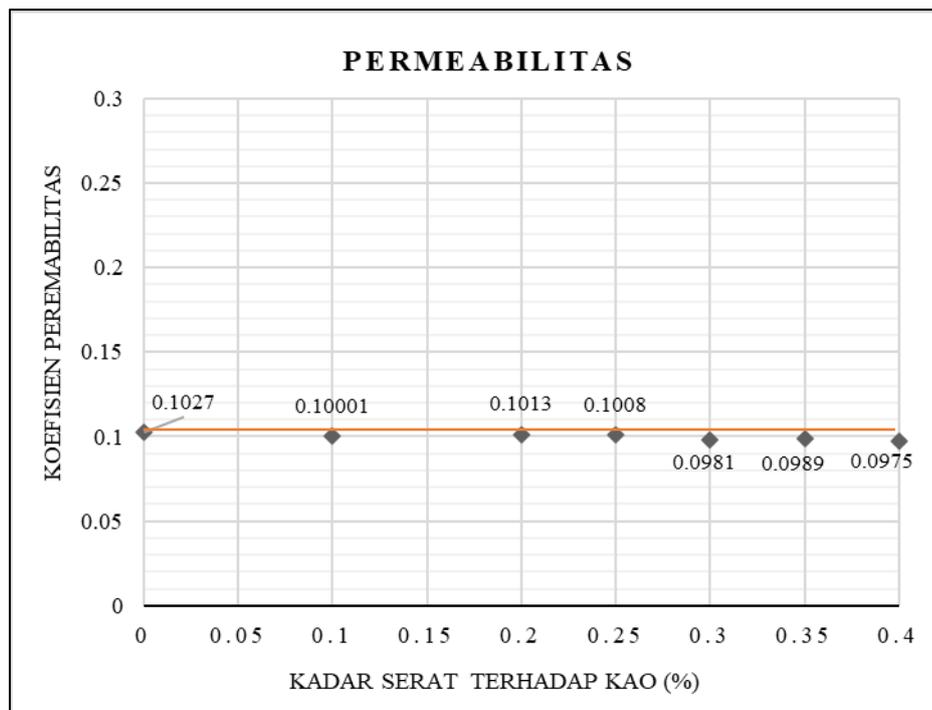
A = Panjang spesimen cm<sup>2</sup>

h = Tinggi muka air / beda tinggi cm

T = Waktu aliran detik (s)

Contoh perhitungan :

$$\begin{aligned} K &= \frac{1390 \times 7,08}{81,51 \times 93 \times 10} \\ &= 0,1315 \text{ cm/detik} \end{aligned}$$



**Gambar 4.46** Grafik hubungan antara kadar aspal dan Permeabilitas Aspal Porus

Sumber: hasil penelitian

Pengujian permeabilitas pada campuran aspal porus dengan penambahan serat tali tampar menggunakan metode constant head menunjukkan variasi nilai koefisien permeabilitas pada masing-masing kadar serat terhadap kadar aspal optimum (KAO). Nilai koefisien permeabilitas tertinggi sebesar 0,1027 cm/detik diperoleh pada kadar serat 0,05%, sedangkan nilai terendah sebesar 0,0975 cm/detik tercatat pada kadar serat 0,40%. Jika dibandingkan dengan standar minimum yang ditetapkan oleh AAPA (Australian Asphalt Pavement Association), yaitu 0,1 cm/detik, maka dapat disimpulkan bahwa kadar serat 0,05% hingga 0,25% masih memenuhi standar minimum permeabilitas, sementara kadar 0,30%, 0,35%, dan 0,40% sedikit berada di bawah batas tersebut.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar dalam jumlah berlebih cenderung menurunkan kemampuan drainase campuran aspal porus. Meski demikian, penurunan tersebut masih tergolong kecil, sehingga secara umum campuran masih menunjukkan karakteristik drainase yang cukup baik, terutama pada kadar serat yang lebih rendah.

#### **4.18 Rekapitulasi Hasil Uji Berdasarkan Parameter**

Ringkasan perbandingan hasil uji parameter dilakukan antara campuran aspal porus dengan kadar aspal optimum (KAO) dan campuran yang telah diberi tambahan serat tali tampar dalam berbagai variasi kadar. Tujuan dari bagian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana penambahan serat tali tampar memengaruhi sifat fisik dan mekanik campuran aspal porus. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, kadar rongga (VIM, VMA, VFA), nilai Marshall Quotient (MQ), densitas, serta permeabilitas.

**Tabel 4.31** Rekap Perbandingan Hasil Parameter Pengujian KAO dan Campuran Sera Pada Aspal Porus

Parameter Pengujian	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Kadar Serat tali tampar					
	4%	0,10%	0,20%	0,25%	0,30%	0,35%	0,40%
Stabilitas (Kg)	688.36	690.90	723.33	759.17	773.34	805.99	637.31
Flow (mm)	5.70	3.29	2.65	2.42	2.38	2.31	2.86
VIM (%)	23.56	20.62	20.34	18.44	18.31	16.77	18.54
VMA (%)	30.58	27.91	27.65	25.93	25.81	24.41	26.01
VFA (%)	22.95	26.16	26.47	28.90	29.08	31.30	28.75
MQ (Kg/mm)	120.67	210.06	276.00	322.51	336.05	351.41	224.17
Density gr/cm <sup>3</sup>	1.917	1.9907	1.9978	2.0454	2.0487	2.0873	-2.043
Permeabilitas	0,1027	0,10001	0,1013	0,1008	0,0981	0,0989	0,0975

Sumber: hasil penelitian

Berdasarkan tabel rekap perbandingan hasil parameter pengujian antara Kadar Aspal Optimum (KAO) dan campuran serat tali pada aspal porus, dapat disimpulkan bahwa penambahan serat tali memberikan pengaruh terhadap karakteristik campuran aspal porus. Terlihat bahwa nilai-nilai parameter seperti stabilitas, flow, density, dan Marshall Quotient (MQ) mengalami perubahan signifikan setelah penambahan serat, yang mengindikasikan adanya modifikasi pada sifat mekanik dan fisik campuran. Kenaikan nilai stabilitas dan MQ hingga kadar serat tertentu menunjukkan bahwa serat tali dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan campuran. Namun, penambahan yang berlebihan justru menurunkan stabilitas, menunjukkan perlunya optimasi kadar serat. Perubahan pada parameter seperti VIM, VMA, dan permeabilitas juga menunjukkan bahwa serat tali turut memengaruhi struktur pori dan kepadatan campuran. Secara keseluruhan, hal ini menunjukkan bahwa serat tali berpotensi sebagai bahan tambahan yang dapat meningkatkan performa aspal porus, baik dari segi ketahanan mekanis maupun pengendalian sifat fisik seperti porositas dan kepadatan.

#### 4.19 Pengujian Hipotesis F- Value

Analisis statistik menggunakan uji F dilakukan untuk menguji hipotesis pada masing-masing parameter Marshall. Uji ini bertujuan untuk mengetahui tingkat signifikansi pengaruh variabel X, yaitu variasi kadar serat tampar, terhadap variabel Y yang berupa karakteristik Marshall pada campuran aspal

porus. Melalui uji ini, dapat diketahui apakah perubahan kadar serat tampar memberikan dampak yang nyata terhadap nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, maupun densitas. Hasil perhitungan F kemudian dibandingkan dengan nilai F-tabel sebagai dasar pengambilan keputusan signifikan atau tidaknya pengaruh yang dimaksud.

#### 4.19.1 Stabilitas

**Tabel 4.32** Hasil Uji F terhadap Nilai Stabilitas

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	60779	10130	2.81	0.052
Error	14	50499	3607		
Total	20	111278			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan Tabel 4.35, hasil uji One-Way ANOVA menunjukkan bahwa nilai F-Value sebesar 2,81 dengan P-Value sebesar 0,052. Nilai P-Value ini berada sedikit di atas tingkat signifikansi umum yaitu  $\alpha = 0,05$ , yang berarti bahwa secara statistik, perbedaan nilai stabilitas antar variasi kadar serat tidak signifikan secara kuat, namun mendekati signifikan (marginally significant). Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan kadar serat memberikan pengaruh terhadap nilai stabilitas, namun pengaruh tersebut belum cukup kuat secara statistik untuk dinyatakan signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Meskipun demikian, kecenderungan nilai P-Value yang mendekati batas signifikansi tetap menunjukkan adanya potensi hubungan antara variasi kadar serat terhadap stabilitas campuran aspal.

#### 4.19.2 Flow

**Tabel 4.33** Hasil Uji F terhadap Nilai Flow

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	26.051	4.3418	29.92	0.000
Error	14	2.031	0.1451		
Total	20	28.082			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan Tabel 4.36, hasil uji One-Way menunjukkan bahwa nilai F-Value sebesar 29,92 dengan P-Value sebesar 0,000. Karena nilai P-Value jauh

lebih kecil dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , maka dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan secara statistik terhadap nilai flow akibat variasi kadar serat yang digunakan. Hal ini berarti bahwa penambahan serat tali tampar dalam campuran aspal porus memberikan pengaruh nyata terhadap perubahan nilai flow. Nilai F-Value yang tinggi juga memperkuat bahwa variabilitas antar kelompok kadar serat jauh lebih besar dibandingkan variabilitas dalam kelompok, yang mengindikasikan bahwa kadar serat merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap parameter flow.

#### 4.19.3 Void In Mix (VIM)

**Tabel 4.34** Hasil Uji F terhadap Nilai VIM

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	90.32	15.0538	18.55	0.000006
Error	14	11.36	0.8115		
Total	20	101.68			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Pada Tabel 4.37 ditampilkan hasil uji One-Way A terhadap nilai Void In Mix (VIM). Nilai F-Value yang diperoleh adalah sebesar 18,55, dengan P-Value sebesar 0,000006. Nilai P-Value ini jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , yang menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang sangat signifikan secara statistik terhadap nilai VIM akibat variasi kadar serat tali tampar yang digunakan dalam campuran. Nilai Adj MS untuk faktor (15,0538) juga jauh lebih besar dibanding Adj MS untuk error (0,8115), yang memperkuat bahwa variasi antar kelompok kadar serat sangat dominan terhadap perubahan nilai VIM. Artinya, kadar serat sangat memengaruhi besarnya rongga udara dalam campuran aspal porus, yang dapat berdampak terhadap kinerja drainase dan kekuatan struktur.

#### 4.19.4 Void in Mineral Aggregate (VMA)

**Tabel 4.35** Hasil Uji F terhadap Nilai VMA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	74.503	12.4172	18.55	0.000006
Error	14	9.371	0.6694		
Total	20	83.874			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Tabel 4.38 menunjukkan hasil uji One-Way terhadap nilai Void in Mineral Aggregate (VMA). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh F-Value sebesar 18,55 dan P-Value sebesar 0,000006. Nilai P-Value yang sangat kecil (lebih kecil dari 0,05) menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan secara statistik dari variasi kadar serat tali tampar terhadap nilai VMA. Selain itu, nilai Adj MS pada faktor sebesar 12,4172 jauh lebih tinggi dibanding nilai Adj MS untuk error sebesar 0,6694, yang memperkuat adanya perbedaan antar kelompok perlakuan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kadar serat tali tampar dalam campuran aspal porus sangat memengaruhi besarnya volume rongga agregat mineral (VMA), yang merupakan indikator penting dalam menilai stabilitas dan daya tahan campuran.

#### 4.19.5 Voids Filled with Asphalt (VFA)

**Tabel 4.36** Hasil Uji F terhadap Nilai VFA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	135.54	22.591	16.76	0.000012
Error	14	18.87	1.348		
Total	20	154.42			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Tabel 4.39 menyajikan hasil uji One-Way terhadap nilai Voids Filled with Asphalt (VFA). Berdasarkan hasil analisis, diperoleh F-Value sebesar 16,76 dan P-Value sebesar 0,000012. Nilai P-Value yang jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi 0,05 mengindikasikan bahwa variasi kadar serat tali tampar dalam campuran aspal berpori berpengaruh signifikan terhadap nilai VFA. Nilai Adj MS untuk faktor adalah 22,591, jauh lebih besar dibandingkan dengan Adj MS dari error yaitu 1,348, yang menunjukkan bahwa variasi antar kelompok

perlakuan cukup besar dibandingkan variasi dalam kelompok. Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa kadar serat memiliki dampak nyata terhadap persentase rongga yang terisi aspal dalam campuran. Hasil ini menegaskan bahwa penambahan serat tali tampar dapat memengaruhi kemampuan campuran dalam mengisi rongga dengan aspal, yang berhubungan langsung dengan daya ikat antar agregat serta ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air dan beban lalu lintas. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis lanjutan untuk menentukan kadar serat yang menghasilkan nilai VFA optimal sesuai spesifikasi teknis.

#### 4.19.6 Marshall Quotient (MQ)

**Tabel 4.37** Hasil Uji F terhadap Nilai MQ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	124297	20716	10.08	0.000208
Error	14	28759	2054		
Total	20	153055			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Tabel 4.40 menunjukkan hasil uji One-Way terhadap nilai Marshall Quotient (MQ). Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh F-Value sebesar **10,08** dan P-Value sebesar 0,000208. Nilai P-Value ini berada jauh di bawah tingkat signifikansi 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan kadar serat tali tampar yang ditambahkan dalam campuran aspal berpori berpengaruh signifikan terhadap nilai MQ. Nilai Adjusted Mean Square (Adj MS) untuk faktor adalah 20.716, sementara untuk error adalah 2.054. Selisih yang cukup besar antara nilai tersebut menunjukkan bahwa variabilitas antar kelompok perlakuan cukup tinggi, sehingga perubahan kadar serat memang memberikan pengaruh nyata terhadap rasio antara stabilitas dan flow (Marshall Quotient). Hasil ini penting karena MQ mencerminkan kekuatan dan kekakuan campuran aspal. Nilai MQ yang optimal sangat dibutuhkan untuk memastikan campuran memiliki ketahanan struktural yang baik terhadap beban kendaraan. Oleh karena itu, variasi kadar serat perlu dikaji lebih lanjut untuk menentukan kadar optimum yang mampu memberikan MQ terbaik sesuai standar teknis yang berlaku.

#### 4.19.7 Berat Isi (Density)

**Tabel 4.38** Hasil Uji F terhadap Nilai Density

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	0.056810	0.009468	18.55	0.00001
Error	14	0.007146	0.000510		
Total	20	0.063955			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Tabel 4.41 memperlihatkan hasil uji One-Way terhadap nilai berat isi (density) campuran aspal berpori yang ditambahkan serat tali tamper. Hasil analisis menunjukkan nilai F-Value sebesar 18,55 dengan P-Value 0,00001. Karena nilai P-Value tersebut jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi 0,05, maka dapat disimpulkan bahwa penambahan serat dengan kadar yang berbeda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai density campuran, Nilai Adjusted Mean Square (Adj MS) untuk faktor adalah 0,009468, sedangkan untuk error sebesar 0,000510. Perbedaan yang mencolok ini menunjukkan bahwa variabilitas antar perlakuan (variasi kadar serat) secara statistik sangat berpengaruh terhadap perubahan berat isi campuran. Kenaikan atau penurunan nilai density menunjukkan sejauh mana partikel campuran dapat saling mengisi rongga dan menghasilkan struktur yang lebih padat. Dalam konteks campuran aspal berpori, density yang optimal harus seimbang agar tetap mempertahankan porositas tanpa mengorbankan kekuatan struktural.

#### 4.19.8 Permeabilitas

**Tabel 4. 39** Hasil Uji F terhadap Nilai Permeabilitas

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	0.000061	0.000010	3.90	0.017
Error	14	0.000036	0.000003		
Total	20	0.000097			

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil analisis sidik ragam untuk nilai permeabilitas menunjukkan bahwa faktor perlakuan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai permeabilitas campuran aspal porous. Nilai F-hitung sebesar 3,90 lebih besar

dibandingkan nilai F-tabel pada taraf signifikansi 5%, dan nilai P-value sebesar 0,017 ( $< 0,05$ ) mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan nyata antar variasi perlakuan yang diuji. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi kadar aspal, kadar serat tali synthetic fiber, dan suhu waterbath berpengaruh signifikan terhadap nilai koefisien permeabilitas campuran aspal porous.

#### 4.20 Pengujian Hipotesis T- Value

Uji t digunakan untuk menguji hipotesis mengenai perbedaan rata-rata dua kelompok data, apakah perbedaan tersebut signifikan secara statistik atau tidak. Pada penelitian ini, uji t dilakukan untuk membandingkan nilai parameter Marshall dan permeabilitas antara variasi kadar serat tali tampar dengan nilai kontrol (0%). Hasil uji t akan menunjukkan apakah penambahan serat pada kadar tertentu memberikan perubahan yang nyata terhadap parameter yang diuji.

##### 4.20.1 Stabilitas

**Tabel 4. 40** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter Stabilitas

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T- Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
STABILITAS 0% - STABILITAS 0,10%	2.5	49.0	(-140.3, 145.4)	0.05	1.000
STABILITAS 0 – STABILITAS,20%	35.0	49.0	(-107.9, 177.8)	0.71	0.948
STABILITAS 0 - STABILITAS 0,25%	70.8	49.0	(-72.0, 213.6)	1.44	0.532
STABILITAS 0 - STABILITAS 0,30%	85.0	49.0	(-57.8, 227.8)	1.73	0.364
STABILITAS 0 - STABILITAS 0,35%	117.6	49.0	(-25.2, 260.5)	2.40	0.126
STABILITAS 0 - STABILITAS 0,40%	-51.1	49.0	(-193.9, 91.8)	-1.04	0.793

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil uji *Dunnett Simultaneous Tests for Level Mean – Control Mean* pada parameter stabilitas, diketahui bahwa sebagian besar perlakuan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol (0%). Nilai perbedaan rata-rata yang dihasilkan berkisar antara -51,1 hingga 117,6. Tanda positif menunjukkan bahwa rata-rata stabilitas

perlakuan lebih tinggi dibandingkan kontrol, sedangkan tanda negatif menunjukkan nilai stabilitas lebih rendah. Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun terdapat selisih rata-rata yang cukup besar pada perlakuan tertentu, misalnya sebesar 117,6 ( $p = 0,126$ ) maupun 85,0 ( $p = 0,364$ ), namun keduanya masih memiliki nilai  $p$  lebih dari 0,05 dan interval kepercayaan 95% yang mencakup nol.

Hal ini berarti perbedaan yang terjadi tidak signifikan secara statistik pada taraf kepercayaan 95%. Begitu pula pada perlakuan lain dengan selisih rata-rata yang lebih kecil, misalnya -51,1 ( $p = 0,793$ ) atau 2,5 ( $p = 1,000$ ), yang juga tidak menunjukkan signifikansi.

#### 4.20.2 Flow

**Tabel 4. 41** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter Flow

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T-Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
FLOW 0.10% - FLOW 0%	-2.410	0.311	(-3.316, -1.504)	-7.75	0.000
FLOW 0.20% - FLOW 0%	-3.053	0.311	(-3.959, -2.147)	-9.82	0.000
FLOW 0.25% - FLOW 0%	-3.287	0.311	(-4.193, -2.381)	-10.57	0.000
FLOW 0.30% - FLOW 0%	-3.320	0.311	(-4.226, -2.414)	-10.67	0.000
FLOW 0.35% - FLOW 0%	-3.397	0.311	(-4.303, -2.491)	-10.92	0.000
FLOW 0.40% - FLOW 0%	-2.843	0.311	(-3.749, -1.937)	-9.14	0.000

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil uji Dunnett yang disajikan pada Tabel 4.44 menunjukkan bahwa seluruh kadar serat tali tampar (0,10% hingga 0,40%) memiliki nilai *Flow* yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan kontrol (0%). Selisih rata-rata (*Difference of Means*) berada pada rentang -2,410 hingga -3,397 dengan nilai *Standard Error* sebesar 0,311. Interval kepercayaan 95% (*95% CI*) untuk seluruh perbandingan tidak mencakup angka nol, yang mengindikasikan adanya perbedaan nyata. Nilai *T-value* yang tinggi secara absolut (-7,75 hingga -10,92)

dan *p-value* yang sangat kecil ( $0,000 < 0,05$ ) memperkuat bahwa penambahan serat pada seluruh variasi kadar berpengaruh signifikan terhadap penurunan *Flow*. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan serat tali tampar, meskipun mampu mempengaruhi sifat deformasi plastis campuran aspal porus, cenderung menurunkan nilai *Flow* dibandingkan campuran tanpa serat.

#### 4.20.3 VIM ( Void in Mix )

**Tabel 4. 42** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter VIM

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T-Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
VIM 0.10% - VIM 0%	-2.937	0.736	(-5.079, -0.794)	-3.99	0.006
VIM 0.20% - VIM 0%	-3.221	0.736	(-5.363, -1.079)	-4.38	0.003
VIM 0.25% - VIM 0%	-5.117	0.736	(-7.259, -2.974)	-6.96	0.000
VIM 0.30% - VIM 0%	-5.250	0.736	(-7.392, -3.108)	-7.14	0.000
VIM 0.35% - VIM 0%	-5.314	0.736	(-7.456, -3.172)	-7.22	0.000
VIM 0.40% - VIM 0%	-6.810	0.736	(-8.952, -4.667)	-9.26	0.000

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil uji Dunnett pada Tabel 4.45 menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar serat tali tampar (0,10% hingga 0,40%) memiliki nilai *Void in Mix* (VIM) yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan kontrol (0%). Nilai selisih rata-rata (*Difference of Means*) berkisar antara -2,937 hingga -6,810, dengan *Standard Error* sebesar 0,736. Seluruh interval kepercayaan 95% (*95% CI*) tidak mencakup angka nol, mengindikasikan adanya perbedaan yang nyata. Nilai *T-value* berkisar antara -3,99 hingga -9,26, sedangkan *p-value* yang telah disesuaikan seluruhnya berada di bawah 0,05, menunjukkan tingkat signifikansi yang tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar pada berbagai kadar menyebabkan penurunan VIM yang signifikan, di mana semakin tinggi kadar serat yang ditambahkan, semakin besar penurunan VIM yang terjadi dibandingkan campuran tanpa serat

#### 4.20.4 VMA ( Void in Mineral Aggregate )

Tabel 4. 43 Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter VMA

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
VMA 0.10% - VMA 0%	-2.667	0.668	(-4.613, -0.721)	-3.99	0.006
VMA 0.20% - VMA 0%	-2.925	0.668	(-4.871, -0.980)	-4.38	0.003
VMA 0.25% - VMA 0%	-4.647	0.668	(-6.593, -2.701)	-6.96	0.000
VMA 0.30% - VMA 0%	-4.768	0.668	(-6.714, -2.822)	-7.14	0.000
VMA 0.35% - VMA 0%	-4.826	0.668	(-6.772, -2.881)	-7.22	0.000
VMA 0.40% - VMA 0%	-6.185	0.668	(-8.130, -4.239)	-9.26	0.000

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil uji Dunnett yang ditampilkan pada Tabel 4.46 menunjukkan bahwa seluruh kadar serat tali tampar (0,10% hingga 0,40%) memiliki nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA) yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan kontrol (0%). Selisih rata-rata (*Difference of Means*) berkisar antara -2,667 hingga -6,185 dengan *Standard Error* sebesar 0,668. Interval kepercayaan 95% (*95% CI*) untuk semua perbandingan tidak mencakup angka nol, yang berarti terdapat perbedaan signifikan. Nilai *T-value* berkisar antara -3,99 hingga -9,26 dan *p-value* yang telah disesuaikan seluruhnya  $< 0,05$ , mengonfirmasi signifikansi perbedaan tersebut. Secara umum, penurunan nilai VMA semakin besar seiring meningkatnya kadar serat yang digunakan, menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar berdampak pada berkurangnya volume rongga antar mineral agregat pada campuran aspal porus.

#### 4.20.5 VFA ( Voids Filled with Asphalt )

**Tabel 4. 44** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter VFA

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T-Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
VFA 0.10% - VFA 0%	3.208	0.948	(0.447, 5.969)	3.38	0.021
VFA 0.20% - VFA 0%	3.519	0.948	(0.757, 6.280)	3.71	0.011
VFA 0.25% - VFA 0%	5.946	0.948	(3.185, 8.707)	6.27	0.000
VFA 0.30% - VFA 0%	6.129	0.948	(3.368, 8.890)	6.47	0.000
VFA 0.35% - VFA 0%	6.203	0.948	(3.442, 8.964)	6.54	0.000
VFA 0.40% - VFA 0%	8.395	0.948	(5.634, 11.156)	8.86	0.000

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil uji Dunnett pada Tabel 4.47 menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar pada kadar 0,10% hingga 0,40% memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai *Voids Filled with Asphalt* (VFA) dibandingkan kontrol (0%). Selisih rata-rata (*Difference of Means*) berkisar antara 3,208 hingga 8,395 dengan *Standard Error* sebesar 0,948. Seluruh interval kepercayaan 95% (*95% CI*) tidak mencakup angka nol, yang mengindikasikan adanya perbedaan signifikan. Nilai *T-value* berada pada rentang 3,38 hingga 8,86, sedangkan *p-value* yang telah disesuaikan seluruhnya lebih kecil dari 0,05. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar serat tali tampar yang ditambahkan, semakin besar peningkatan VFA, yang berarti proporsi rongga di dalam agregat yang terisi aspal pada campuran aspal porus semakin tinggi.

#### 4.20.6 MQ ( Marshall Quotient )

**Tabel 4. 45** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter MQ

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T-Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
MQ 0.10% - MQ 0%	89.4	37.0	(-18.4, 197.2)	2.42	0.122
MQ 0.20% - MQ 0%	155.3	37.0	(47.6, 263.1)	4.20	0.004
MQ 0.25% - MQ 0%	201.8	37.0	(94.1, 309.6)	5.45	0.000
MQ 0.30% - MQ 0%	215.4	37.0	(107.6, 323.2)	5.82	0.000
MQ 0.35% - MQ 0%	230.7	37.0	(123.0, 338.5)	6.24	0.000
MQ 0.40% - MQ 0%	103.5	37.0	(-4.3, 211.3)	2.80	0.062

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil uji Dunnett yang disajikan pada Tabel 4.48, penambahan serat tali tampar menunjukkan pengaruh yang bervariasi terhadap nilai *Marshall Quotient* (MQ) dibandingkan kontrol (0%). Selisih rata-rata (*Difference of Means*) berkisar antara 89,4 hingga 230,7 dengan *Standard Error* sebesar 37,0. Pada kadar 0,20% hingga 0,35%, seluruh interval kepercayaan 95% (*95% CI*) tidak mencakup angka nol, nilai *T-value* berada pada rentang 4,20 hingga 6,24, serta *p-value* < 0,05, yang menunjukkan perbedaan signifikan. Namun, pada kadar 0,10% dan 0,40%, interval kepercayaan mencakup angka nol dan *p-value* masing-masing sebesar 0,122 dan 0,062, sehingga perbedaannya tidak signifikan secara statistik. Secara umum, nilai MQ cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar serat hingga 0,35%, sebelum menurun pada kadar 0,40%. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat kadar serat optimum yang dapat meningkatkan kekakuan campuran aspal porus.

#### 4.20.7 Density (Berat isi )

Tabel 4. 46 Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter Density

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
DENSITY 0.10 - DENSITY 0%	0.0736	0.0184	(0.0199, 0.1274)	3.99	0.006
DENSITY 0.20 - DENSITY 0%	0.0808	0.0184	(0.0271, 0.1345)	4.38	0.003
DENSITY 0.25 - DENSITY 0%	0.1283	0.0184	(0.0746, 0.1820)	6.96	0.000
DENSTIY 0.30 - DENSITY 0%	0.1317	0.0184	(0.0779, 0.1854)	7.14	0.000
DENSITY 0.35 - DENSITY 0%	0.1333	0.0184	(0.0795, 0.1870)	7.22	0.000
DENSITY 0.40 - DENSITY 0%	0.1708	0.0184	(0.1171, 0.2245)	9.26	0.000

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Hasil uji Dunnett yang ditampilkan pada Tabel 4.49 menunjukkan bahwa penambahan serat tali tampar pada kadar 0,10% hingga 0,40% memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan *density* campuran aspal porus dibandingkan kontrol (0%). Nilai selisih rata-rata (*Difference of Means*) berkisar antara 0,0736 hingga 0,1708 dengan *Standard Error* sebesar 0,0184. Seluruh interval kepercayaan 95% (*95% CI*) tidak mencakup angka nol, yang mengindikasikan adanya perbedaan signifikan. Nilai *T-value* berkisar antara 3,99 hingga 9,26 dan *p-value* yang telah disesuaikan seluruhnya lebih kecil dari 0,05. Secara umum, *density* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar serat tali tampar, dengan peningkatan tertinggi terjadi pada kadar 0,40%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat membantu memperbaiki kepadatan campuran dengan mengisi rongga-rongga yang ada di dalam struktur agregat.

#### 4.20.8 Permeabilitas

**Tabel 4. 47** Hasil Uji t Metode Dunnett terhadap Parameter Permeabilitas

<b>Difference of Levels</b>	<b>Difference of Means</b>	<b>SE of Difference</b>	<b>95% CI</b>	<b>T-Value</b>	<b>Adjusted P-Value</b>
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00265	0.00131	(-0.00647, 0.00118)	-2.02	0.238
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00133	0.00131	(-0.00515, 0.00250)	-1.01	0.812
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00187	0.00131	(-0.00569, 0.00196)	-1.42	0.546
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00452	0.00131	(-0.00835, -0.00070)	-3.44	0.018
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00376	0.00131	(-0.00758, 0.00007)	-2.86	0.055
PERMEABILITA - PERMEABILITA	-0.00513	0.00131	(-0.00895, -0.00130)	-3.91	0.008

Sumber: Hasil olahan data menggunakan software Minitab 22

Berdasarkan hasil uji Dunnett Simultaneous Tests for Level Mean – Control Mean, diketahui bahwa beberapa perlakuan menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap nilai permeabilitas dibandingkan kelompok kontrol. Perbedaan nilai rata-rata yang dihasilkan berkisar antara -0,00133 hingga -0,00513, dengan tanda negatif yang menunjukkan bahwa rata-rata kelompok perlakuan lebih rendah dibandingkan kontrol. Hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan dengan selisih rata-rata sebesar -0,00452 ( $p = 0,018$ ) dan -0,00513 ( $p = 0,008$ ) memiliki perbedaan yang signifikan pada taraf kepercayaan 95%, karena interval kepercayaan (95% CI) tidak mencakup nol. Sementara itu, perlakuan dengan perbedaan sebesar -0,00376 memiliki nilai  $p = 0,055$  yang mendekati batas signifikansi, sehingga dapat dikatakan hampir signifikan. Adapun perlakuan lainnya memiliki nilai  $p$  lebih dari 0,05 dan interval kepercayaan yang mencakup nol, sehingga perbedaannya dianggap tidak signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan material pada persentase tertentu dapat memberikan pengaruh nyata terhadap penurunan nilai permeabilitas, namun efek tersebut tidak terjadi secara konsisten pada semua tingkat perlakuan.