

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Hasil Studi Terdahulu**

Penelitian mengenai penggunaan bahan tambahan berupa serat pada campuran aspal porous telah banyak dilakukan dalam rangka meningkatkan performa dan karakteristik campuran aspal. Beberapa studi sebelumnya memberikan gambaran bahwa penambahan serat, baik alami maupun sintetis, dapat berpengaruh terhadap nilai karakteristik Marshall seperti stabilitas, flow, void in mixture (VIM), dan Marshall Quotient (MQ). Rancangan pada penelitian ini didasari oleh beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya Yaitu :

1. Putman & Amirkhanian (2004)

Penelitian ini mengevaluasi penggunaan beberapa jenis serat limbah dalam campuran SMA dan OGFC. Parameter yang digunakan antara lain Stabilitas Marshall, Flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), serta Drain-down. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan serat mampu meningkatkan stabilitas dan flow, mengurangi drain-down, serta memperbaiki nilai VIM dan VFA agar sesuai dengan spesifikasi campuran SMA.

2. Xiao et al. (2007)

Penelitian ini memfokuskan pada pengaruh kadar aspal terhadap permeabilitas vertikal, VIM, VMA, dan drain-down pada campuran OGFC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar aspal menyebabkan menurunnya permeabilitas dan meningkatnya drain-down. Selain itu, terjadi penurunan nilai VIM dan peningkatan VFA, yang saling memengaruhi karakteristik pori campuran.

3. Kaloush et al. (2002)

Penelitian ini menggunakan campuran aspal dense-graded dan SMA yang dimodifikasi dengan polypropylene dan aramid fiber. Parameter yang diuji antara lain Dynamic Modulus ( $E^*$ ), Triaxial Shear Strength, Fatigue Life (Beam Fatigue Test), Flow Number, dan Indirect Tensile Strength (ITS). Hasilnya menunjukkan bahwa serat secara signifikan meningkatkan modulus dinamis, ketahanan terhadap deformasi plastis (rutting), dan umur kelelahan campuran.

4. Kareem G. Nazmey et al. (2024)

Penelitian ini memodifikasi campuran aspal porous menggunakan cellulose fiber, glass wool, dan aspal EVA-modified. Berbagai parameter yang diuji meliputi Stabilitas Marshall, Flow, Cantabro Abrasion Loss, Drain-down, Permeabilitas, Wheel Tracking Test, serta uji mikrostruktur menggunakan SEM, dan karakteristik rheologi seperti Softening Point, Penetration, dan Viscosity. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi EVA dan serat meningkatkan stabilitas hingga 20,8%, permeabilitas hingga 20,6%, dan menurunkan abrasi serta drain-down secara signifikan.

5. Wang et al. (2017)

Dalam penelitian ini, digunakan basalt fiber sebagai bahan tambah dalam campuran aspal. Parameter yang diuji mencakup Fatigue Resistance, Indirect Tensile Strength (ITS), Rut Depth (Wheel Tracking), Stiffness, Stabilitas Marshall, dan Air Voids. Hasilnya menunjukkan bahwa serat basalt mampu meningkatkan kekakuan campuran, memperpanjang umur kelelahan, serta memberikan ketahanan yang baik terhadap deformasi dan retak.

**Tabel 2. 1** Hasil Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Topik	Persamaan	Perbedaan	Hasil
1	Putman & Amirkhanian (2004) Evaluasi Serat Limbah pada Campuran SMA dan OGFC	- Sama-sama menggunakan campuran aspal porous dan serat sebagai bahan tambahan - Parameter: Stabilitas Marshall, Flow, VIM, VMA, VFA, Drain-down	- Jenis serat yang digunakan merupakan serat limbah - Tidak fokus pada permeabilitas	- Serat meningkatkan stabilitas & flow - Mengurangi drain-down - VIM & VFA menjadi sesuai spesifikasi campuran SMA
2	Xiao et al. (2007) Pengaruh Kadar Aspal terhadap OGFC	parameter VIM, VMA, VFA, , permeabilitas	- Fokus pada variasi kadar aspal - Tidak menggunakan serat tambahan	- Kadar aspal tinggi → permeabilitas turun, drain-down naik - VIM menurun, VFA meningkat
3	Kaloush et al. (2002) Modifikasi Aspal dengan Serat Polypropylene dan Aramid	- Sama-sama menggunakan serat pada campuran aspal	- Campuran aspal dense-graded dan SMA - Parameter lebih kompleks (Modulus Dinamis, Fatigue Life)	- Serat meningkatkan modulus dinamis, umur kelelahan, dan ketahanan deformasi plastis
4	Kareem G. Nazmey et al. (2024) Modifikasi Aspal Porous dengan Cellulose, Glass Wool dan EVA	- Sama-sama menggunakan serat dan uji permeabilitas serta stabilitas juga serupa	- Menambahkan pengujian mikrostruktur (SEM) & karakteristik rheologi	- Stabilitas naik 20,8%, permeabilitas naik 20,6% - Abrasi dan drain-down menurun signifikan

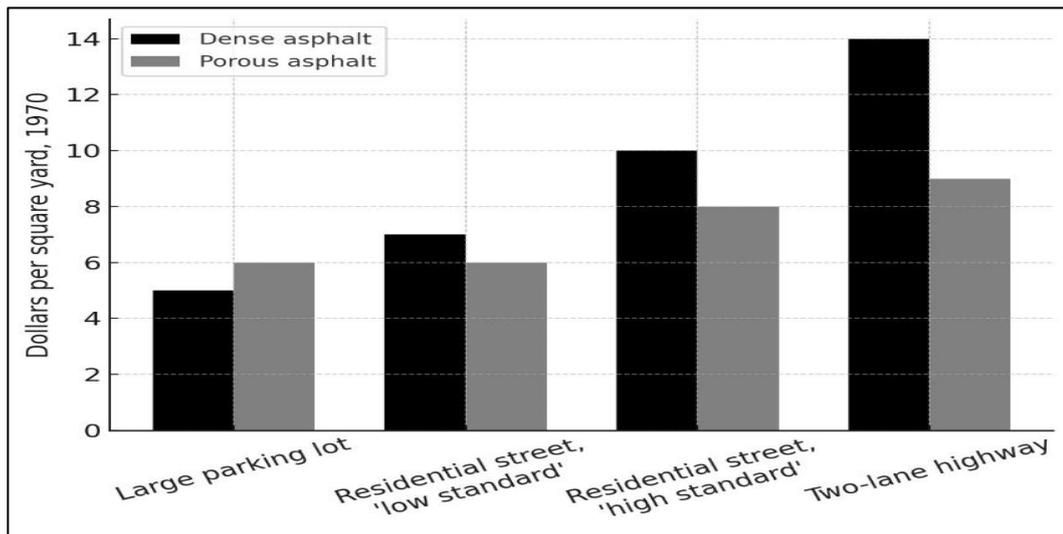
5	Wang et al. (2017) Pengaruh Basalt Fiber dalam Campuran Aspal	- Sama-sama menggunakan serat sebagai bahan tambahan - Parameter: Stabilitas Marshall, , Air Voids	- Menggunakan basalt fiber - Fokus pada kelelahan, rutting, dan kekakuan campuran	- Serat basalt meningkatkan kekakuan, umur kelelahan, dan ketahanan retak & deformasi
---	--	---	---	--

## 2.2 Aspal Porous

Aspal porous adalah campuran perkerasan aspal bergradasi terbuka dengan presentase agregat kasar yang tinggi dan agregat halus yang rendah, sehingga menciptakan rongga udara yang besar. Struktur berpori ini memungkinkan air hujan meresap melalui permukaan jalan kelapisan bawah, mengurangi genangan air dan meningkatkan keselamatan berkendara. Selain itu, aspal porous efektif dalam meredam kebisingan lalu lintas, menjadikannya pilihan tepat untuk jalan tol, area parkir, dan daerah curah hujan tinggi. *Sembung, Sendow, & Palenewen, 2020* Aspal porous memiliki kemampuan drainase yang lebih baik dibandingkan dengan perkerasan aspal konvensional.

Struktur berporinya memungkinkan air mengalir ke lapisan bawah, sehingga dapat mengurangi tekanan air permukaan yang sering menjadi penyebab genangan dan kecelakaan akibat aquaplaning. Selain itu, aspal porous juga berkontribusi dalam pengendalian limpasan air hujan, yang dapat membantu mengurangi risiko banjir di daerah perkotaan. Dengan sistem drainase yang lebih baik, daya cengkeram kendaraan pada jalan tetap optimal, terutama saat kondisi hujan.

Dalam perkembangannya, aspal porous telah banyak mengalami inovasi untuk meningkatkan daya tahannya terhadap beban lalu lintas. Salah satu kelemahan utama dari aspal porous adalah stabilitasnya yang lebih rendah dibandingkan dengan aspal konvensional akibat tingginya porositas dalam campuran. Oleh karena itu, penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan aspal porous, baik melalui modifikasi bahan pengikat maupun penambahan serat sebagai material penguat.



**Gambar 2. 1** Keunggulan Aspal Porous dibandingkan dengan perkerasan jalan konvensional

Sumber : Comparative construction costs of porous Asphalt and dense asphalt pavement (data from Field et al.,1982,and Thelen et al.,1972,pp. 7,116 and 118)

### 2.2.1 Keunggulan dan kekurangan

Dalam perkembangan teknologi perkerasan jalan pengguna aspal porous tentunya memiliki keunggulan dan kelemahan, yaitu:

1. Keunggulan menggunakan aspal porous
  - Struktur berpori memungkinkan air hujan meresap dan mengalir kebawah, mengurangi resiko gempungan dan aquaplaning
  - Mengurangi resiko kendaraan tergelincir saat hujan karena air langsung terserap kedalam aspal
  - Struktur berpori menyerap gelombang suara dari gesekan ban dengan jalan, sehingga menurunkan tingkat kebisingan di lingkungan sekitar
  - Permukaan berpori meningkatkan traksi kendaraan, terutama dalam kondisi basah
  - Dapat membantu mengurangi limpasan air hujan yang membawa polutan ke saluran drainase dan sungai

## 2. Kelemahan menggunakan Aspal porous

- Rentan terhadap keausan dan deformasi akibat beban lalu lintas berat, sehingga umurnya lebih pendek dibandingkan aspal biasa.
- Menggunakan bahan berkualitas tinggi dan metode pemasangan khusus, sehingga lebih tinggi dibandingkan aspal biasa.
- Tidak direkomendasikan untuk jalan dengan beban kendaraan berat seperti jalan tol utama atau jalur truk karena mudah rusak
- Jika tidak didukung sistem drainase bawah yang baik, air dapat terjebak dalam pori-pori dan menyebabkan kerusakan lebih cepat

## 2.3 Komponen Material dalam Aspal Porous

### 2.3.1 Agregat

Agregat adalah sekelompok material yang dapat berupa material alami maupun buatan dan dapat berbentuk butiran batu pecah, pasir, kerikil, atau mineral. Jika dipadatkan dengan benar dan dengan peralatan yang tepat, agregat berfungsi sebagai komposisi yang memberikan kestabilan pada campuran aspal. Agregat merupakan zat padat anorganik yang keras. Bahan utama atau komposisi lapisan perkerasan jalan adalah agregat, yang memiliki proporsi berat 90–95% atau persentase volume 70%–75% (Silvia, Sukirman, 2003, Hot Mix Asphalt Concrete).

**Tabel 2. 2** Gradasi Agregat Campuran Aspal Porus

<b>Nomor Saringan</b>	<b>Ukuran Saringan (mm)</b>	<b>Spesifikasi % Berat yang Lolos</b>
3/4	19,0	100
1/2	13,2	85-100
3/8	9,5	45-70
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
No.200	0,075	2 - 5

Sumber: AAPA 2004 (Australian Asphalt Pavement Association).

Kekuatan, gradasi, tekstur permukaan, bentuk butiran, daya rekat pada aspal, kebersihan, dan kualitas kimia semuanya berperan dalam pemilihan jenis agregat yang disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi perkerasan. Jenis dan kombinasi agregat memengaruhi stabilitas atau ketahanan. Berdasarkan sumber cara pengolahan di atas, jenis-jenis agregat dapat dibedakan menjadi tiga kategori, diantaranya:

1. Agregat Kasar

Dari semua agregat, agregat kasar merupakan agregat yang paling besar. Menurut ASTM (American Society for Testing and Materials), ukuran agregat kasar ini adalah agregat yang tertahan pada saringan 2,36 mm atau No. 8 atau saringan di atasnya. Bila campuran aspal yang dipanaskan cukup besar untuk digunakan dalam semua jenis campuran aspal panas. Kerikil atau batu pecah harus menjadi fraksi agregat untuk alasan pengujian, dan harus disediakan dalam ukuran standar yang bersih, kuat, tahan lama, dan bebas dari komponen lain yang dapat mengganggu campuran aspal.

**Tabel 2. 3** Ketentuan Agregat Kasar

<b>Pengujian</b>	<b>Standart</b>	<b>Nilai</b>
Kekekalan bentuk Agregat terhadap Larutan Natrium dan Magnesium Sulfat	SNI 03-3407-1994	Maks 12%
Abrasi dengan Mesin Los Angeles	SNI 03-2417-1991	Min 40 %
Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	SNI 03-2439-1991n	Min 95 %
Angularitas	SNI 03-6877-2002	95/95
Partikel Pipih dan Lonjong (**)	ASTM D-4791	Maks 10 %

Sumber : Departemen Pekerjaan umum

Catatan :

(\*) 95/90 menunjukkan 95 % agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dari 90% agregat kasar memiliki muka bidang pecah dua atau lebih.

(\*\*) Pengujian dengan cara membandingkan dengan alat uji terhadap poros 1: 5

## 2. Agregat Halus

Agregat biasanya berukuran antara 0,234 hingga 0,0075 mm. Parameter umum yang digunakan untuk campuran aspal panas juga berlaku untuk agregat halus dalam campuran aspal panas. Komponen yang memiliki sudut tajam dan permukaan kasar yang bebas dari kotoran atau komponen lain yang tidak diinginkan dikenal sebagai agregat halus. Agregat halus dan agregat kasar merupakan agregat yang sama, tetapi agregat halus lebih dominan.

**Tabel 2. 4** Ketentuan Agregat Halus

<b>Pengujian</b>	<b>Standart</b>	<b>Nilai</b>
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1991	Min 50 %
Material Lolos Saringan NO 200	SNI 03-4428-1992	Maks. 8 %
Angularitas	SNI 03-6877-1933	Min . 45 %

Sumber : Spesifikasi Umum Desember, 2006

### 2.3.2 Aspal (Bitumen)

Termoplastik dan viskoelastis, aspal adalah zat berwarna hitam hingga coklat tua yang akan mencair saat dipanaskan dan mengeras saat didinginkan. Zat ini dapat ditemukan di alam atau sebagai produk sampingan dari penyulingan minyak bumi. Menurut Sukirman (1999), aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dalam campuran perkerasan jalan, yang dicampur dengan

agregat untuk membentuk struktur perkerasan yang kuat dan tahan terhadap beban lalu lintas. Departemen Pekerjaan Umum (1994) juga menyatakan bahwa aspal memiliki sifat viskoelastis yang membuatnya mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan suhu dan beban, sehingga efektif digunakan pada berbagai kondisi jalan.

Dengan komposisi dan teknik pencampuran tertentu untuk memenuhi kriteria teknis, aspal digunakan dalam berbagai jenis perkerasan, termasuk lapisan aus, lapisan antara, dan lapisan dasar atas. Aspal sangat penting untuk menjaga keutuhan struktural jalan raya serta kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan karena sifatnya yang fleksibel dan daya rekatnya yang tinggi.

**Tabel 2. 5** Persyaratan Aspal Keras Penetrasi 60/70

No	Jenis Pengujian	Metod	Persyaratan
1	Penetrasi, 25°C ; 100 gr ; 5 detik ; 0,1 mm	SNI 06-2456-1991	60-79
2	Titik Lembek, °C	SNI 06-2434-1991	48-58
3	Titik Nyala, °C	SNI 04-2433-1991	min.200
4	Daktilitas °C, cm	SNI 06-2432-1991	min.100
5	Berat Jenis	SNI 06-2441-1991	min.1
6	Kelarutan dalam Trichlor Ethylen, %berat	SNI M-04-2004	min. 99
7	Penurunan Berat (dengan TFOT), %berat	SNI 06-2440-1991	min.0,8
8	Penetrasi setelah penurunan berat, %asli	SNI 06-2456-1991	min.54
9	Daktilitas setelah penurunan berat, %asli	SNI 06-2432-1991	min.50
10	Uji noda Aspal - Standar naptha - Naptha xylene - Hephthane xylane	SNI 03-6885-2002	negatif

Sumber : Standar Nasional Indonesia 2003

Sebagai komponen utama yang digunakan untuk membuat perkerasan jalan, aspal hadir dalam berbagai bentuk dan atribut. Aspal dibagi menjadi beberapa kategori menurut asal, karakteristik fisik, dan atribut kinerjanya untuk memudahkan penerapannya. Berkat klasifikasi ini, lebih mudah untuk

memilih jenis aspal yang memenuhi persyaratan teknis, jenis konstruksi, dan kondisi lapangan.

#### 1. Berdasarkan Asal dan Sumbernya

Aspal dapat diklasifikasikan berdasarkan asal atau sumbernya menjadi dua jenis utama :

- Aspal Alam : Aspal yang Dapat ditemukan di alam, biasanya dalam bentuk batuan atau danau. Contohnya adalah Aspal Alam dari pulau Buton di Indonesia, yang dikenal sebagai Asbuton
- Aspal Buatan : Aspal yang diperoleh sebagai residu dari proses destilasi minyak bumi. Proses ini menghasilkan aspal keras yang digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi jalan

*Sukirman, S. (2016). Teknologi Campuran Beraspal. Bandung: Nova.*

#### 2. Berdasarkan Bentuk Fisiknya

Aspal juga dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk fisiknya menjadi :

- Aspal Padat (Asphalt cement) : Aspal yang berbentuk padat atau semi-padat pada suhu ruang dan harus dipanaskan sebelum digunakan
- Aspal Cair (Cutback asphalt) : Aspal yang dicairkan dengan bahan pelarut seperti bensin, minyak tanah, atau solar. Berdasarkan kecepatan penguapan
- Aspal Emulsi (Emulsified Asphalt) : Campuran aspal dengan air dan bahan pengemulsi, yang digunakan pada suhu rendah dan ramah lingkungan

#### 3. Berdasarkan Karakteristik atau Kinerja

Klasifikasi ini berdasarkan pada sifat fisik dan kinerja aspal, Yaitu :

- Penetrasi : Mengukur kekerasan aspal dengan menentukan kedalaman penetrasi jarum standar pada suhu tertentu.
- Viskositas : Mengukur ketahanan aliran aspal pada suhu tertentu

- Kelas kinerja (Performance Grade – PG) : Klasifikasi berdasarkan suhu maksimum dan minimum di mana aspal dapat berfungsi dengan baik.

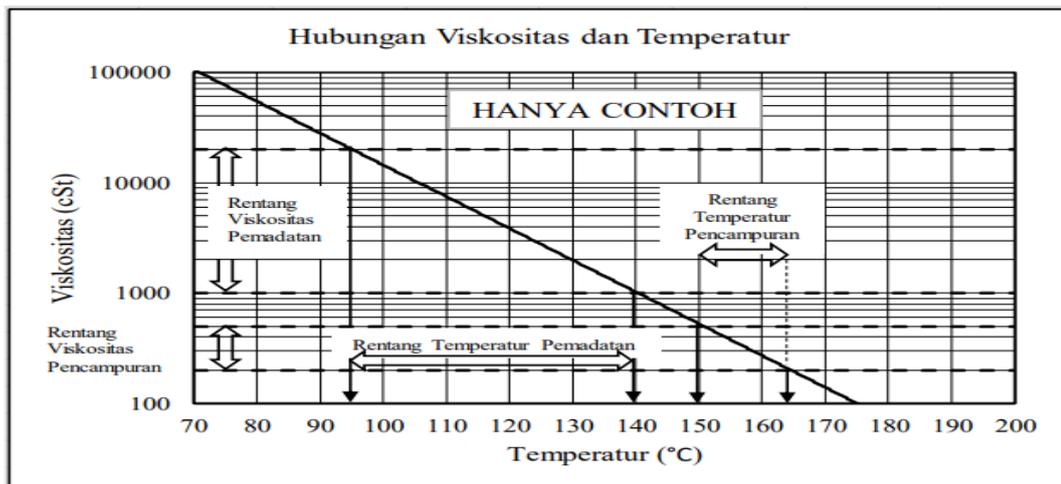
**Tabel 2. 6** Ketentuan Viskositas dan Temperatur Aspal untuk Pencampuran dan Pemadatan

No.	Prosedur Pelaksanaan	Viskositas Aspal (cSt)	Perkiraan <sup>1)</sup> Temperatur Aspal (°C)
			Tipe I
1	Pencampuran benda uji Marshall	170 ± 20	155 ±1
2	Pemadatan benda uji Marshall	280 ± 30	145 ±1
3	Pencampuran, rentang temperatur sasaran	200 - 500	145 – 155
4	Menuangkan campuran beraspal dari alat pencampur ke dalam truk	± 500	135 – 150
5	Pemasokan ke Alat Penghampar	500 - 1.000	130 – 150
6	Pemadatan Awal (roda baja)	1.000 - 2.000	125 – 145
7	Pemadatan Antara (roda karet)	2.000 - 20.000	100 – 125
8	Pemadatan Akhir (roda baja)	< 20.000	> 95

Catatan :

1) Perkiraan temperatur Aspal Tipe I harus disesuaikan dengan korelasi viskositas dan temperatur.  
2) 1 Pa.s = 1.000 cSt = 1.000 mm<sup>2</sup>/s di mana :

Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018



**Gambar 2. 2** Contoh Hubungan antara Viskositas dan Temperatur

Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018

Nilai penetrasi yang diperoleh dari uji penetrasi juga dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi Aspal Nilai penetrasi yang diperoleh dari uji penetrasi juga dapat digunakan untuk menentukan aspal. Aspal Tipe I harus diuji

penetrasi pada 25<sup>0</sup> C (SNI 2456 : 2011) dan titik lembek (sni 2434:2011), dan aspal Tipe II harus di uji penetrasi pada 25<sup>0</sup> C (SNI 2456 : 2011) dan stabilitas penyimpanan sesuai denga ASTM D5976-00 Part 6.1

**Tabel 2. 7** Ketentuan Untuk Aspal Keras

No.	Jenis Pengujian	Metoda Pengujian	Tipe I Aspal Pen.60-70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				PG70	PG76
1.	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70	Dilaporkan <sup>(1)</sup>	
2.	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G*/sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 1,0 kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-	70	76
3.	Viskositas Kinematis 135°C (cSt) <sup>(3)</sup>	ASTM D2170-10	≥ 300	≤ 3000	
4.	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	Dilaporkan <sup>(2)</sup>	
5.	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100	-	
6.	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232	≥ 230	
7.	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	AASHTO T44-14	≥ 99	≥ 99	
8.	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0	-	
9.	Stabilitas Penyimpanan: Perbedaan Titik Lembek (°C)	ASTM D 5976-00 Part 6.1 dan SNI 2434:2011	-	≤ 2,2	
10.	Kadar Parafin Lilin (%)	SNI 03-3639-2002	≤ 2		
<b>Pengujian Residu hasil TFOT (SNI-06-2440-1991) atau RTFOT(SNI-03-6835-2002) :</b>					
11.	Berat yang Hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤ 0,8	≤ 0,8	
12.	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G*/sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 2,2 kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-	70	76
13.	Penetrasi pada 25°C (% semula)	SNI 2456:2011	≥ 54	≥ 54	≥ 54
14.	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 50	≥ 50	≥ 25
<b>Residu aspal segar setelah PAV (SNI 03-6837-2002) pada temperatur 100°C dan tekanan 2,1 MPa</b>					
15.	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G*/sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≤ 5000 kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-	31	34

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga, Spesifikasi Umum untuk pekerjaan jalan dan jembatan 2018

### 2.3.3 Tali Berbahan synthetic fiber

Tali Tambang adalah jenis tali yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi industri dan rumah tangga karena kekokohan dan ketahanannya terhadap berbagai faktor lingkungan. Tali ini biasanya terbuat dari serat sintesis seperti polietilena (PE) atau polipropilena (PP), yang keduanya memiliki sifat fisik dan kimia yang sangat baik. Dalam bidang teknologi pengaspalan jalan, tali tambang mulai dianggap sebagai bahan pelengkap yang potensial, khususnya untuk

meningkatkan performa campuran aspal porous yang dikenal memiliki rongga tinggi dan permeabilitas besar

Serat dari tali tambang memiliki banyak manfaat yang membuatnya menarik untuk dimasukkan ke dalam campuran aspal. Berkat kekuatan tariknya yang tinggi, serat ini dapat berfungsi sebagai penguat dalam struktur campuran, membantu meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi. Selain itu, karena terbuat dari polimer sintesis, serat ini ringan dan kedap air, sehingga tidak menyerap kelembapan dari lingkungan sekitarnya. Hal ini sangat penting dalam menjaga kestabilan dimensi campuran aspal pada kondisi basah atau saat terjadi perubahan cuaca.

Tali tam yang terbuat dari polipropilena (PP) tersusun dari molekul hidrokarbon  $(C_3H_6)_n$  yang tersusun dalam rantai panjang, sehingga menciptakan struktur polimer isotaktik. Struktur ini memiliki sifat mekanis yang baik, termasuk kekuatan tarik yang tinggi, desain yang ringan, tahan air, dan tahan kimia. Serat PP dapat diproduksi sebagai monofilamen (serat tunggal yang panjang) atau multifilamen (seikat serat halus yang dipilin menjadi satu). Berdasarkan berbagai Studi rentang presentas:

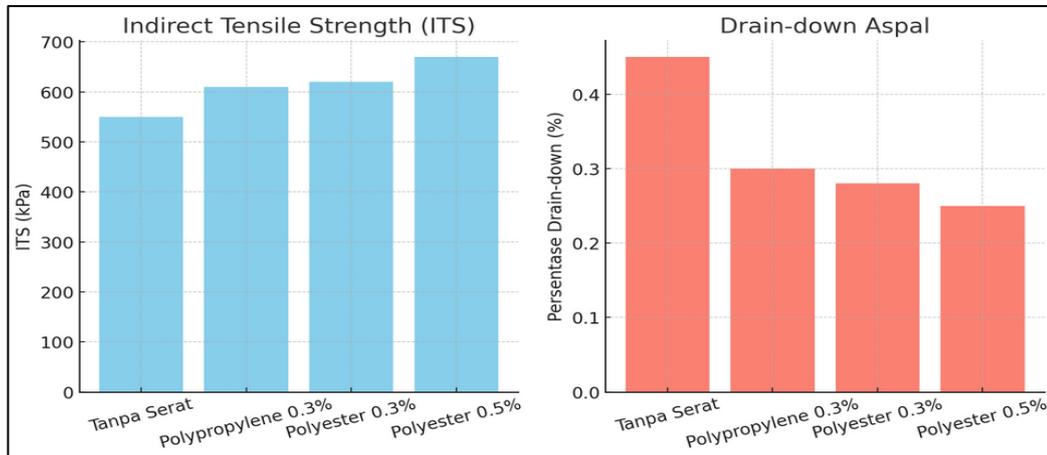
**Tabel 2. 8** Presentase Penggunaan Serat

Jenis Serat	Persentase Berat terhadap Agregat	Referensi
Serat Polypropylene	0,2% – 0,4%	Xiao et al. (2007), Putman & Amirkhanian (2004)
Serat Polyester	0,3% – 0,5%	Wang et al. (2017)
Serat Nylon	0,25% – 0,4%	Kaloush et al. (2002)

Sumber : data penelitian Terdahulu

Berdasarkan presentase diatas dapat juga digunakan rumus berikut :

$$\text{Persentase berat serat (\%)} = (\text{Berat serat} / \text{Berat agregat total}) \times 100\%$$



**Gambar 2.3** Grafik Perbandingan Nilai Indirect Tensile Strength (ITS) dan Persentase Drain-down Aspal pada Campuran dengan dan tanpa Serat

Sumber : data penelitian Terdahulu

Gambar di atas menunjukkan pengaruh penambahan serat terhadap nilai Indirect Tensile Strength (ITS) dan persentase drain-down aspal. Pada grafik kiri terlihat bahwa nilai ITS campuran aspal mengalami peningkatan seiring dengan penambahan serat. Campuran tanpa serat memiliki nilai ITS paling rendah, yaitu sekitar 550 kPa. Penambahan serat polypropylene 0,3% meningkatkan nilai ITS menjadi sekitar 615 kPa, sedangkan penggunaan serat polyester 0,3% dan 0,5% menunjukkan peningkatan bertahap hingga mencapai hampir 680 kPa. Hal ini menunjukkan bahwa serat, khususnya jenis polyester, berperan efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik tidak langsung campuran aspal.

Sementara itu, grafik kanan menunjukkan bahwa drain-down aspal mengalami penurunan dengan adanya penambahan serat. Campuran tanpa serat memiliki nilai drain-down tertinggi, yaitu sekitar 0,45%, yang kemudian menurun menjadi sekitar 0,3% dengan penambahan polypropylene 0,3%. Penggunaan serat polyester 0,3% dan 0,5% lebih lanjut menurunkan nilai drain-down hingga mencapai sekitar 0,25%. Penurunan ini menandakan bahwa serat mampu menahan pergerakan aspal selama proses pemadatan atau pemanasan, sehingga mengurangi terjadinya segregasi. Secara keseluruhan, penambahan serat—

terutama serat polyester—terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan campuran serta mengurangi drain-down, yang merupakan dua parameter penting dalam performa campuran aspal porous.

#### 2.4 Gradasi Aspal Porous

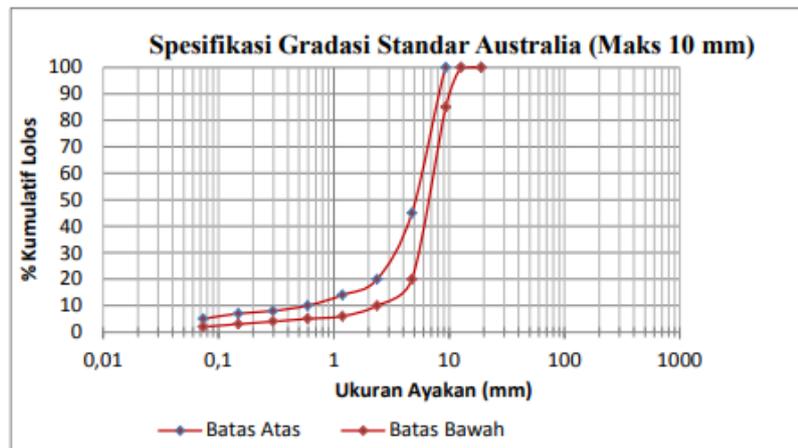
Gradasi aspal porous berdasarkan AAPA (Australian Asphalt Pavement Association) adalah susunan butiran agregat yang dirancang secara khusus untuk menghasilkan struktur berongga (void) yang tinggi dalam campuran aspal, sehingga memungkinkan air mengalir dengan cepat melalui permukaan jalan. Ini berbeda dari campuran aspal biasa yang bersifat lebih padat dan tidak menyerap air. AAPA memberikan spesifikasi gradasi untuk campuran aspal porous, khususnya untuk agregat maksimum 10 mm dan 14 mm. Berikut adalah gradasi umum berdasarkan standar AAPA Specification Guide for Open Graded Asphalt:

**Tabel 2. 9** Gradasi Aspal Porous Standar Australia

Ukuran Ayakan (mm)	% Berat yang Lolos Ag. Maks. 10 mm
19,00	100
12,700	100
9,530	85 - 100
4,760	20 - 45
2,380	10 - 20
1,190	6 - 14
0,595	5 - 10
0,279	4 - 8
0,149	3 - 7
0,074	2 - 5
Total	100
Kadar Aspal	5,0 - 6,5

Sumber : Australian Asphalt Pavement Association, 2004

Grafik ini menunjukkan spesifikasi gradasi standar untuk campuran agregat dengan ukuran maksimum ayakan sebesar 10 mm sesuai standar Australia. Sumbu X menggambarkan Ukuran Ayakan dalam milimeter dengan skala logaritmik, mulai dari 0,01 mm hingga lebih dari 1000 mm. Sumbu Y menunjukkan persentase kumulatif material yang lolos ayakan (% Kumulatif Lolos), yaitu persentase partikel yang ukurannya lebih kecil dari ukuran ayakan tertentu. Pada grafik terdapat dua kurva utama: Kurva berwarna biru mewakili Batas Atas gradasi agregat menurut standar AAPA (Australian Asphalt Pavement Association). Kurva berwarna merah mewakili Batas Bawah gradasi agregat menurut standar yang sama. Kurva ini menggambarkan rentang batas toleransi distribusi ukuran partikel pada campuran agregat. Material harus memiliki distribusi ukuran partikel di antara kedua batas tersebut agar memenuhi spesifikasi kualitas dan performa aspal porous atau campuran aspal lainnya.

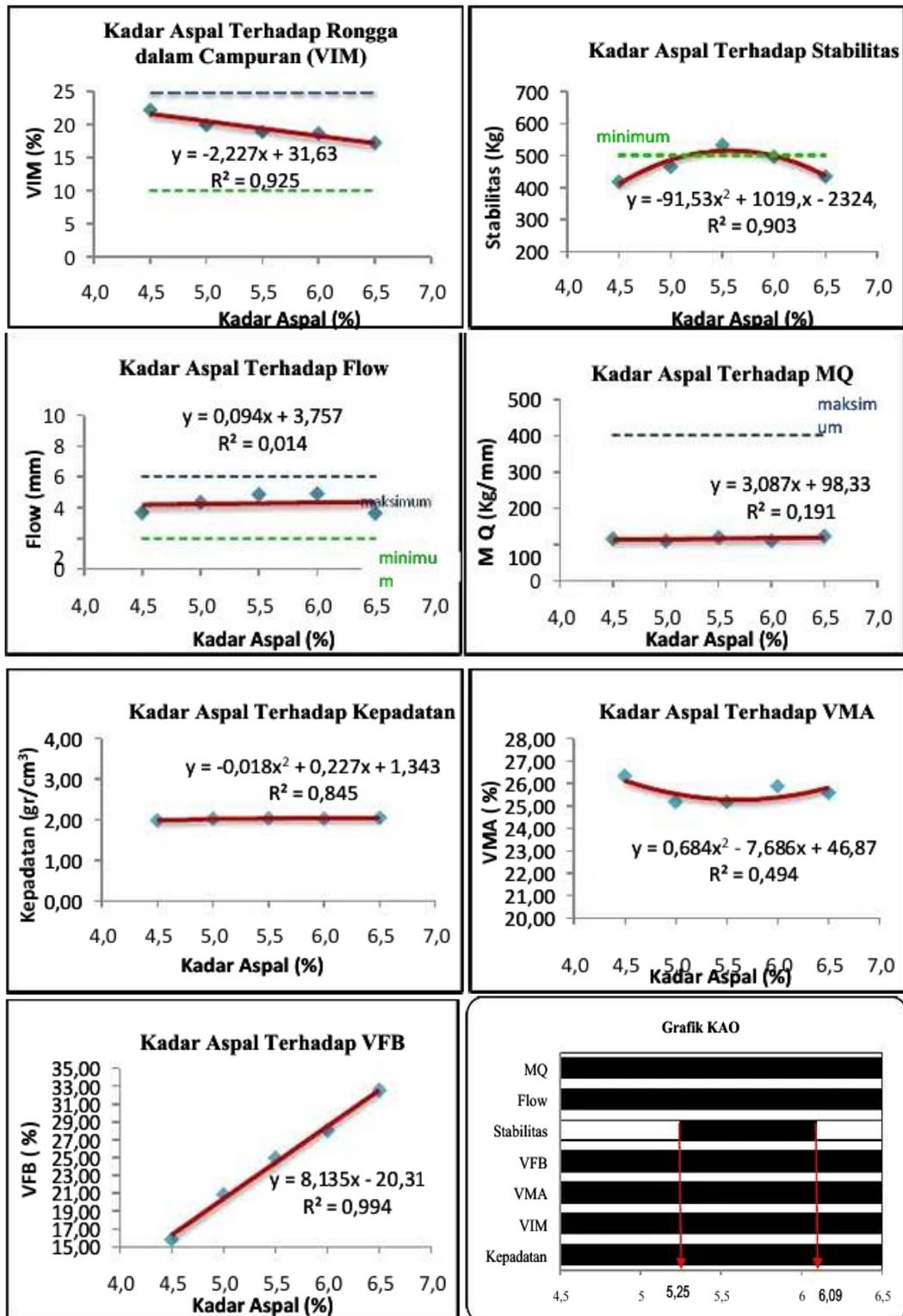


**Gambar 2. 4** Spesifikasi Gradasi Aspal Porous Standar Australia Untuk Ukuran Maks. 10 mm

Sumber : *Australian Asphalt Pavement Association, 2004*

## **2.5 Menentukan kadar Aspal Optimum**

Kadar Aspal Optimum adalah kadar aspal terbaik yang memberikan hasil kinerja paling baik terhadap campuran aspal, ditinjau dari segi stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ) kepadatan dan parameter volumetrik (VIM, VMA, VFA). Nilai ini ditentukan berdasarkan hasil pengujian Marshall dari beberapa variasi kadar aspal.



Gambar 2. 5 Contoh cara penentuan KAO metode Marshall

Berdasarkan grafik 2.5 , diperoleh kadar aspal minimum sebesar 5,25% dan kadar aspal maksimum sebesar 6,09%. Dengan demikian, Kadar Aspal Optimum ditentukan sebagai nilai rata-rata antara KA min dan KA maks.

### **2.5.1 Desain Campuran aspal Porous (Mix Desain)**

Desain campuran (mix design) adalah proses perencanaan komposisi material dalam campuran beraspal agar diperoleh campuran yang memenuhi persyaratan teknis, ekonomis, dan fungsional. Campuran aspal porous dirancang dengan memperhatikan gradasi agregat terbuka (open graded) dan kadar aspal yang sesuai agar diperoleh rongga udara yang cukup untuk menjamin permeabilitas, namun tetap memiliki stabilitas struktural yang memadai.

#### **a. Gradasi Agregat**

Gradasi agregat merupakan salah satu komponen kunci dalam mix design. Campuran agregat harus dirancang agar menghasilkan struktur terbuka, memungkinkan aliran air, tetapi tetap memberikan kekuatan struktural. Penelitian ini mengacu pada standar AAPA (2004) dengan spesifikasi agregat maksimum 10 mm. Rincian gradasi target dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2. 10** Gradasi Agregat Porous Berdasarkan AAPA 2004

Ukuran Ayakan (mm)	% Berat yang Lolos Ag. Maks. 10 mm
19,00	100
12,700	100
9,530	85 - 100
4,760	20 - 45
2,380	10 - 20
1,190	6 - 14
0,595	5 - 10
0,279	4 - 8
0,149	3 - 7
0,074	2 - 5
Total	100
Kadar Aspal	5,0 - 6,5

Sumber: Australian Asphalt Pavement Association (2004)

Gradasi ini menghasilkan campuran dengan porositas tinggi dan mendukung infiltrasi air secara efisien sesuai tujuan penggunaan aspal porous.

b. Kadar Aspal

Kadar aspal berpengaruh langsung terhadap daya rekat antar agregat dan fleksibilitas campuran. Pada aspal porous, kadar aspal tidak boleh terlalu tinggi agar rongga udara tidak tertutup, namun juga tidak terlalu rendah agar campuran tidak rapuh. Berdasarkan berbagai literatur dan praktik lapangan, kadar aspal optimal untuk campuran porous berkisar antara 3% hingga 5% dari berat total agregat.

Dalam penelitian ini, kadar aspal divariasikan sebagai berikut:

- 3,0 %, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5% (berdasarkan penelitian terdahulu)

c. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal Optimum (KAO) ditentukan dengan menganalisis hubungan antara kadar aspal dan parameter uji Marshall. Nilai KAO umumnya diambil dari titik rata-rata antara kadar aspal minimum dan maksimum yang memenuhi semua syarat teknis.

$$\text{Contoh pendekatan penentuan KAO: } K = \frac{K A \text{ min} + K A \text{ max}}{2}$$

Nilai ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk campuran yang diuji lebih lanjut dengan variasi serat.

## 2.6 Menentukan volumetric campuran Beraspal

Penentuan volumetrik campuran beraspal merupakan langkah penting dalam proses desain campuran aspal untuk memastikan kualitas dan kinerja campuran sesuai dengan standar yang berlaku. Parameter volumetrik ini meliputi beberapa aspek utama seperti:

1. VIM (Void in Mineral Aggregate)

VIM adalah persentase ruang kosong dalam agregat mineral yang tidak terisi oleh bahan pengikat (aspal). Nilai VIM yang tepat diperlukan agar campuran memiliki kestabilan dan daya tahan terhadap deformasi.

2. VMA (Void in Mineral Aggregate)

VMA menunjukkan total ruang kosong antara butiran agregat, termasuk ruang yang diisi oleh aspal dan udara. VMA mempengaruhi kemampuan campuran menahan beban dan fleksibilitasnya.

3. VFB (Void Filled with Bitumen) adalah persentase ruang kosong dalam campuran agregat yang terisi oleh aspal (bitumen). VFB menunjukkan seberapa banyak pori-pori dalam agregat yang diisi oleh aspal. Nilai VFB penting untuk memastikan campuran memiliki keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas. Jika VFB terlalu rendah, campuran bisa menjadi rapuh; jika terlalu tinggi, bisa menyebabkan deformasi.

#### 4. Kadar Aspal Efektif (Pbe)

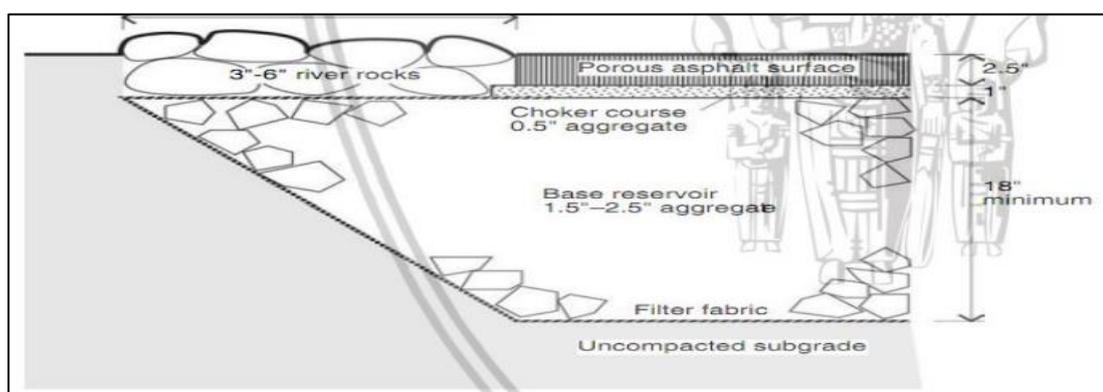
Kadar Aspal Efektif (Pbe) adalah persentase aspal yang benar-benar mengikat agregat dalam campuran beraspal, yaitu kadar aspal total dikurangi volume aspal yang mengisi ruang kosong udara dalam campuran.

#### 5. Aspal Terserap oleh Agregat (Pbabs) adalah jumlah aspal yang diserap atau tersimpan di dalam pori-pori agregat dan tidak berkontribusi langsung terhadap pengikatan agregat dalam campuran aspal.

#### 6. Berat Jenis Maksimum Campuran (Gmm) adalah berat jenis campuran beraspal dalam kondisi tanpa ruang kosong udara (padatan penuh), yaitu kondisi teoritis saat campuran dipadatkan sempurna tanpa adanya pori-pori udara.

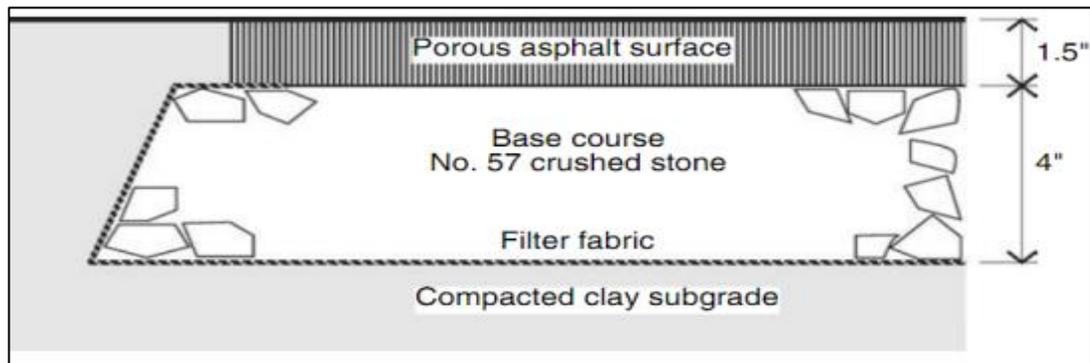
### 2.6.1 Penggunaan Aspal Porous

Di negara-negara industri saat ini, aspal berpori umum digunakan dan menguntungkan. Salah satu keuntungan aspal berpori adalah dapat menahan air agar tidak menggenang di permukaan jalan dalam jangka waktu lama. Sebab, air yang menggenang dalam jangka waktu lama akan melemahkan ikatan antarpartikel perkerasan. Gambar aspal berpori di berbagai negara ditunjukkan di bawah ini:



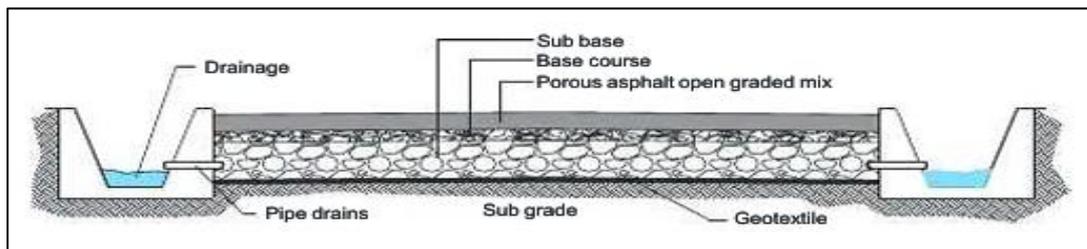
**Gambar 2. 6** Konstruksi Aspal Porous Pada Lapangan Parkir di Hackesin, Delaware

Sumber: Brown,1996 and Cahill, 1993



**Gambar 2. 7** Konstruksi Aspal Porous Pada Jalan Perumahan di Macon, Georgia

Sumber : Specifications by Adele George



**Gambar 2. 8** Sistem Drainase Aspal Porous

Sumber: Iowa Stormwater Management Manual, 2009

## 2.7 Pengujian Aspal Porous

### 2.7.1 Uji Marshall

Metode Marshall merupakan salah satu metode desain campuran aspal panas (Hot Mix Asphalt) yang dikembangkan oleh Bruce Marshall pada tahun 1939 dan kemudian disempurnakan oleh U.S. Army Corps of Engineers. Metode ini digunakan secara luas untuk menentukan proporsi optimum campuran aspal dan agregat berdasarkan uji laboratorium terhadap beberapa parameter utama.

Prinsip dasar dari metode ini adalah menilai kinerja campuran aspal berdasarkan stabilitas (kekuatan terhadap deformasi plastis) dan flow (deformasi plastis saat diberi beban), serta mempertimbangkan parameter volumetrik seperti void in mix (VIM), void in mineral aggregate (VMA), dan void filled with asphalt (VFA).



**Gambar 2. 9** Alat Uji Marshall

### **2.7.2 Uji Permeabilitas**

Uji permeabilitas adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan campuran aspal porous dalam mengalirkan air melalui pori-pori di dalamnya. Uji ini penting karena aspal porous dirancang memiliki rongga terbuka (open graded) yang memungkinkan air meresap ke bawah, sehingga mengurangi genangan air dan mencegah aquaplaning.

a. Metode Constant Head

Metode Constant Head adalah salah satu metode laboratorium yang digunakan untuk mengukur koefisien permeabilitas material berpori secara langsung dengan mempertahankan tinggi muka air (head) tetap selama aliran berlangsung. Metode ini dianggap lebih akurat untuk material berpermeabilitas tinggi seperti aspal porous.

- Tujuan Uji
- Mengetahui koefisien permeabilitas (k) campuran aspal porous.
- Menilai kemampuan drainase dari campuran aspal dengan atau tanpa modifikasi serat.
- Menjadi indikator tambahan dalam menilai kinerja campuran aspal sebagai lapisan perkerasan atas (surface course).

- Prinsip Kerja

Dalam metode ini, air dialirkan melalui spesimen dengan ketinggian tekanan air (head) yang dijaga konstan selama waktu tertentu. Volume air yang melewati benda uji selama waktu tertentu diukur untuk menghitung nilai koefisien permeabilitas.

- Rumus Perhitungan

Koefisien permeabilitas dihitung menggunakan rumus:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \dots\dots\dots 3.1$$

Keterangan:

k = koefisien permeabilitas (cm/s)

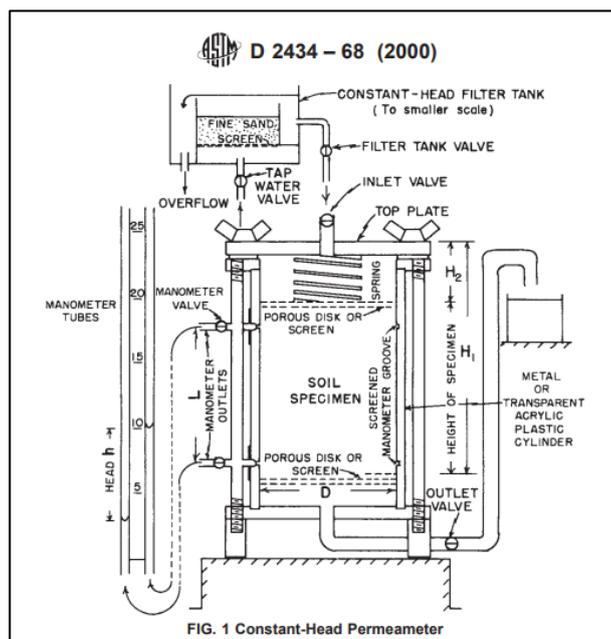
Q = volume air yang keluar (cm<sup>3</sup>)

L = tinggi benda uji (cm)

A = luas penampang lintang benda uji (cm<sup>2</sup>)

t = waktu aliran (detik)

h = tinggi head air (cm)



**Gambar 2. 10** Constant Head permeameter

Sumber : ASTM 2434 – 68 (2000)

## b. Metode falling Head

Metode Falling Head adalah salah satu metode laboratorium untuk mengukur koefisien permeabilitas dari material yang sangat permeabel (porous), seperti campuran aspal berpori. Uji ini dilakukan dengan mengamati penurunan tinggi air (head) pada tabung ukur dalam jangka waktu tertentu saat air mengalir melalui benda uji.

- Tujuan Uji
- Mengetahui koefisien permeabilitas (k) campuran aspal porous.
- Menilai kemampuan drainase dari campuran aspal dengan atau tanpa modifikasi serat.
- Menjadi indikator tambahan dalam menilai kinerja campuran aspal sebagai lapisan perkerasan atas (surface course).
- Alat dan Bahan
- Alat uji permeabilitas model falling head
- Tabung bening dengan skala (untuk melihat tinggi muka air)
- Pipa dan dudukan penjepit
- Stopwatch
- Air bersih
- Benda uji (silinder campuran aspal porous)
- Klem dan selang pengalir
- Prinsip kerja Falling Head

Prinsipnya adalah mengalirkan air dari kolom air dengan tinggi tertentu (head awal  $h_1$ ) dan mencatat waktu saat air turun ke tinggi tertentu (head akhir  $h_2$ ) sambil melalui benda uji. Laju penurunan tersebut digunakan untuk menghitung koefisien permeabilitas (k).

- Persamaan dan perhitungan

$$K = 2,3 \frac{aL}{At} \times \left[ \log \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \right] \dots\dots\dots 3.2$$

Dimana :

k = koefisien permeabilitas air (cm/s)

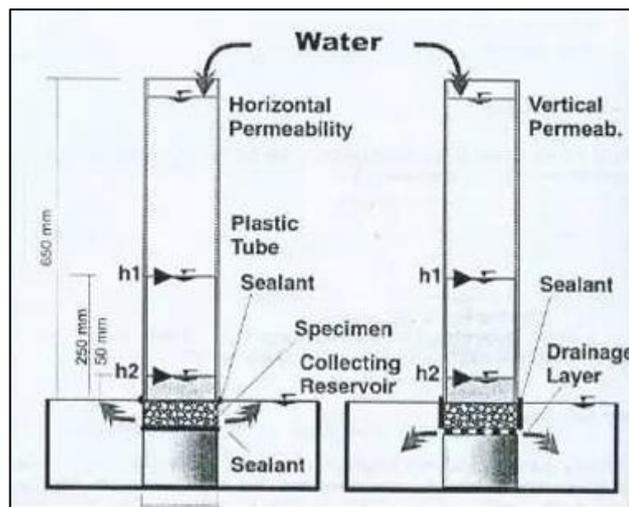
a = Luas Potongan melintang tabung (cm<sup>2</sup>)

L = Tebal spesimen (cm)

A = Luas potongan spesimen (cm<sup>2</sup>)

t = Waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan dari h<sub>1</sub> ke h<sub>2</sub> (s)

h<sub>1</sub> = Tinggi batas air paling atas tabung (cm)



h<sub>2</sub> = Tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)

**Gambar 2. 11** Skema Percobaan Falling Head

(Sumber: Kandall dan Mallick, 2001)

Dalam penelitian ini, metode constant head dipilih sebagai metode uji permeabilitas karena lebih sesuai dengan karakteristik material yang digunakan, yaitu campuran aspal porous yang memiliki permeabilitas tinggi. Metode ini

dinilai lebih representatif karena, memberikan hasil yang lebih akurat dan stabil untuk material berpori. sesuai dengan standar ASTM D2434. Menurut standar AAPA (2004) dan beberapa literatur teknik sipil, campuran aspal porous dikatakan memenuhi syarat permeabilitas apabila nilai  $k \geq 0,1$  cm/detik. Nilai ini menunjukkan bahwa air dapat dengan mudah melewati struktur berpori campuran tersebut.

## **2.8 Variabel penelitian**

Variabel penelitian adalah segala sesuatu yang dapat diukur, diamati, atau dimanipulasi dalam suatu penelitian untuk mengetahui hubungan atau pengaruhnya terhadap hal lain. Variabel ini menjadi fokus utama dalam proses pengumpulan dan analisis data.

### **1. Variable bebas**

Variabel yang sengaja diubah atau dimanipulasi oleh peneliti untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel lain, Seperti Kadar Serat Tali (dalam persen berat campuran, misalnya : 0%, 0,10%, 0,20%, 0,25%, 0,30%, 0,35%, 0,40%.) , Kadar Aspal, Suhu Waterbath.

### **2. Variabel Terikat**

Variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas dan menjadi hasil yang diamati atau diukur, seperti Stabilitas Marshall (kg atau N), Flow (mm), Density ( $\text{g/cm}^3$ ), Void in Mix (VIM, Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA)

### **3. Variabel Kontrol**

Variabel yang dijaga konstan agar tidak mempengaruhi hasil penelitian, seperti, Jenis agregat (misalnya batu pecah dari lokasi tertentu), Gradasi agregat (mengikuti gradasi aspal porous AAPA), jenis dan merek aspal, Suhu pemadatan, jumlah tumbukan Marshall, Lama perendaman sebelum uji Marshall.

## 2.9 Regresi Polynomial

Regresi polinomial merupakan salah satu bentuk regresi non-linier yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel bebas (independen) dan variabel terikat (dependen) ketika hubungan tersebut tidak dapat direpresentasikan dengan garis lurus. Pada metode ini, persamaan regresi linier diperluas dengan menambahkan pangkat dari variabel bebas sehingga membentuk model berupa polinomial orde tertentu.

Secara umum, persamaan regresi polinomial orde  $n$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$y = ax^2 + bx + cy = ax^2 + bx + cy = ax^2 + bx + c$$

Y : Variabel terikat (dependent variable)

X : Variabel bebas (independent variable)

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  : Koefisien regresi

Tujuan Regresi Polynomial :

1. Memodelkan hubungan variabel yang bersifat melengkung (curvilinear).
2. Menentukan titik optimum (maksimum atau minimum) pada kurva hubungan variabel.
3. Memberikan pendekatan yang lebih akurat dibandingkan regresi linier untuk data dengan tren non-linier.

Kelebihan Regresi Polinomial :

1. Fleksibilitas Tinggi: Mampu menyesuaikan bentuk kurva sesuai pola data.

2. **Penentuan Titik Optimum:** Dapat digunakan untuk mencari kadar bahan atau kondisi yang menghasilkan nilai terbaik pada parameter yang diuji.
3. **R<sup>2</sup> Lebih Tinggi:** Sering menghasilkan nilai koefisien determinasi lebih besar dibanding regresi linier jika pola data melengkung.

Kelemahan Regresi Polinomial :

1. **Overfitting:** Orde polinomial yang terlalu tinggi dapat membuat model terlalu mengikuti data, sehingga kurang baik untuk prediksi.
2. **Sensitif terhadap Pencilan (Outlier):** Data yang ekstrem dapat mempengaruhi bentuk kurva secara signifikan.

## **2.10 Uji hipotesis**

Uji hipotesis dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui apakah terdapat pengaruh yang signifikan dari penambahan serat tali berbahan synthetic fiber terhadap karakteristik Marshall pada campuran aspal porous. Pengujian dilakukan terhadap data hasil laboratorium dengan pendekatan statistik uji t dan uji F (ANOVA satu arah) menggunakan software Minitab.

### **2.10.1 Uji t (t-test)**

Uji t digunakan untuk mengetahui perbedaan rata-rata antara dua kelompok data. Dalam penelitian ini, uji t dilakukan untuk membandingkan parameter Marshall (misalnya stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA , MQ , DAN Density) antara campuran aspal tanpa serat dan campuran aspal dengan serat synthetic fiber.

- $H_0$  : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata parameter Marshall pada campuran dengan dan tanpa serat.
- $H_1$  : Terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata parameter Marshall pada campuran dengan dan tanpa serat.

Pengambilan keputusan berdasarkan nilai p-value:

- Jika  $p\text{-value} < \alpha$  (0,05), maka  $H_0$  ditolak  $\rightarrow$  artinya terdapat perbedaan signifikan.
- Jika  $p\text{-value} \geq \alpha$ , maka  $H_0$  diterima  $\rightarrow$  artinya tidak terdapat perbedaan signifikan.

### 2.10.2 Uji F (ANOVA Satu Arah)

Uji ANOVA (Analysis of Variance) satu arah digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar tiga atau lebih kelompok data. Dalam analisis varians (ANOVA), derajat kebebasan atau degree of freedom (df) adalah jumlah nilai bebas yang dapat bervariasi dalam perhitungan statistik setelah mempertimbangkan batasan tertentu. Pada tabel ANOVA, df terbagi menjadi tiga bagian. df faktor (between groups) menunjukkan derajat kebebasan akibat perlakuan atau variabel bebas yang diuji, dihitung dengan rumus  $k-1$ , di mana  $k$  adalah jumlah kelompok perlakuan. df error (within groups) menunjukkan derajat kebebasan akibat variasi di dalam kelompok yang tidak dapat dijelaskan oleh perlakuan, dihitung dengan rumus  $N-k$ , di mana  $N$  adalah jumlah total pengamatan. df total menunjukkan derajat kebebasan keseluruhan yang dihitung dengan rumus  $N-1$  dan merupakan penjumlahan antara df faktor dan df error. Nilai df ini digunakan untuk menghitung nilai F-hitung dan menentukan nilai F-tabel pada taraf signifikansi tertentu sehingga dapat diambil keputusan mengenai signifikansi pengaruh perlakuan yang diuji. Dalam konteks penelitian ini, uji ANOVA digunakan untuk menganalisis:

- Perbedaan karakteristik Marshall berdasarkan variasi kadar aspal
  - Perbedaan karakteristik berdasarkan variasi kadar serat
- Hipotesis yang diuji:
- $H_0$  : Semua kelompok memiliki rata-rata yang sama (tidak ada pengaruh perlakuan)
  - $H_1$  : Minimal terdapat satu kelompok yang memiliki rata-rata berbeda (ada pengaruh perlakuan).

Kriteria pengambilan keputusan:

- Jika  $p\text{-value} < \alpha$  (0,05), maka  $H_0$  ditolak  $\rightarrow$  terdapat perbedaan signifikan antar kelompok
- Jika  $p\text{-value} \geq \alpha$ , maka  $H_0$  diterima  $\rightarrow$  tidak terdapat perbedaan signifikan antar kelompok

Uji ini membantu peneliti mengetahui faktor mana yang paling memengaruhi nilai parameter Marshall pada campuran aspal porous.