

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Bahan Penyusun Campuran Perkerasan Lapis Aus

Lapis aus (*wearing course*) merupakan lapisan dari perkerasan yang terletak paling atas berfungsi sebagai lapis aus atau lapisan tempat bergeseknya roda kendaraan dengan perkerasan. Bahan penyusun lapis aus terdiri dari agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi, dan aspal. Bahan-bahan tersebut kemudian dicampur, dihamparkan, dan dipadatkan diatas lapis pondasi yang telah dipersiapkan untuk membentuk lapis aus.

1. Agregat

Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan. Persentase agregat dalam suatu campuran berkisar antara 90% - 95% dari berat atau 75% - 85% dari volume. Oleh karena itu kekuatan dari lapis aus ditentukan oleh kualitas dari agregat itu sendiri. Berikut adalah agregat yang digunakan dalam campuran aspal beton:

a. Agregat kasar

Agregat kasar merupakan agregat yang tertahan saringan no.4 (4,75 mm). Agregat untuk campuran perkerasan haruslah merupakan agregat pecah yang bersih, kering, kuat, awet, dan bebas dari lumpur. Agregat yang digunakan harus dari sumber dan jenis yang sama untuk menjamin keseragaman campuran. Persyaratan untuk agregat kasar ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Persyaratan agregat kasar

Pengujian			Standar	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	natrium sulfat		SNI 3407:2008	Maks. 12%
	magnesium sulfat			Maks. 18%
Abrasi dengan mesin Los Angeles	Campuran AC Modifikasi	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6 %
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%

Tabel 3.1 (Lanjutan)

Pengujian	Standar	Nilai
Kelekatan agegat terhadap aspal	SNI 2439:2011	Min. 95 %
Butir Pecah pada Agregat Kasar	SNI 7619:2012	95/90
Partikel Pipih dan Lonjong	ASTM D4791 Perbandingan 1:5	Maks. 10 %
Material lolos Ayakan No. 200	SNI 03-4142- 1996	Maks. 2%

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 Revisi 3

b. Agregat halus

Agregat halus untuk campuran haruslah bersih, kering, kuat, bebas dari gumpalan tanah serta butirnya tajam. Berikut persyaratan yang harus dipenuhi agregat halus ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Persyaratan agregat halus

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min 60%
Angularitas dengan uji kadar rongga	SNI 03-6877-2002	Min 45%
Agregat lolos ayakan no.200	SNI ASTM C117:2012	Maks 10%
Kadar lempung	SNI 03-4141-1996	Max 1%

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 Revisi 3

c. Bahan pengisi (*filler*)

Bahan pengisi (*filler*) merupakan agregat yang lolos saringan no.200 (0,075 mm). *Filler* dapat berupa debu kapur, debu *dolomit*, semen *Portland* atau bahan lain yang dapat dijadikan pengisi. *Filler* harus dalam keadaan kering. *Filler* disini berfungsi untuk mengisi ruang antar agregat sehingga dapat mengisi rongga dan menambah bidang kontak antar butir agregat sehingga kekuatan akan meningkat. Jika dicampur dengan aspal *filler* akan membentuk bahan pengikat berkonsisten tinggi untuk mengikat agregat.

2. Aspal

Aspal merupakan senyawa hidrokarbon berwarna hitam atau coklat tua. Aspal tersusun atas unsur –unsur seperti *asphalteness*, *resin*, dan *oils*. Senyawa tersebut banyak terkandung dalam bitumen. *Asphaltenes* yang merupakan material

berwarna hitam atau coklat tua yang tidak larut dalam *n-heptane*. *Asphaltenes* menyebar dalam larutan yang disebut *malthenes*. *Malthenes* larut dalam *heptane*, merupakan cairan kental yang terdiri dari *resins* dan *oils*. *Resins* adalah cairan berwarna kuning atau coklat tua yang memberikan sifat *adhesi* dari aspal, merupakan bagian yang mudah hilang atau berkurang selama masa pelayanan jalan, sedangkan *oils* yang berwarna lebih muda merupakan media dari *asphaltenes* dan *resins*. *Malthenes* merupakan komponen yang mudah berubah sesuai perubahan temperatur dan umur pelayanan.

Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dan pengisi rongga antar butir agregat. Kadar aspal mempengaruhi sifat dari campuran. Oleh karena itu diperlukan pengujian untuk mencari kadar aspal optimum (KAO). Jika kadar aspal kurang maka akan terjadi retak (*cracking*). Semakin tinggi kadar aspal sampai nilai optimumnya maka akan semakin banyak rongga yang terisi oleh aspal. Namun jika semakin besar kadar aspal melebihi kadar aspal optimum maka akan terjadi keluarnya aspal dari campuran agregat (*bleeding*). Kadar aspal yang berlebihan akan menyebabkan daya ikat antar agregat menjadi berkurang karena akan berubah menjadi pelicin.

Pada suhu 25°C molekul aspal dalam keadaan stabil, pada suhu kurang dari itu aspal akan membeku dan pada suhu 25°C - 60°C aspal mulai lunak, jika terus dipanaskan aspal akan mencair. Aspal yang umum digunakan di Indonesia dan digunakan dalam penelitian adalah aspal penetrasi 60-70. Berikut persyaratannya dalam Tabel 3.3

Tabel 3.3 Persyaratan aspal pen.60/70

No	Jenis Pemeriksaan	Cara pemeriksaan	Penetrasi 60/70	Satuan	Tipe II Aspal yang dimodifikasi	
					A	B
					Asbuton yang diproses	Elastomer sintesis
1	Penetrasi (25°C, 5 detik)	SNI 06-2456-1991	60-70	0,1 mm	Min 50	Min 40
2	Viskositas Dinamis	SNI 06-6441-2000	160-240	60°C	240-360	320-480
3	Viskositas kinemis	SNI 06-6441-2000	>300	135°C	385-2000	< 3000
4	Titik Lembek (<i>ring ball</i>)	SNI 2434:2011	>48	°C	> 53	> 54

Tabel 3.3 (Lanjutan)

No	Jenis Pemeriksaan	Cara pemeriksaan	Penetrasi 60/70	Satuan	Tipe II Aspal yang dimodifikasi	
					A	B
					Asbuton yang diproses	Elastomer sintesis
5	Titik Nyala (<i>Clev. Open cup</i>)	SNI 2433 : 2011	>232	°C	>232	>232
6	Daktalitas (25°C, 5 cm/menit)	SNI 2433 : 2011	>100	% berat	>100	>100
7	Kelarutan dalam <i>trichloethy</i>	AASHTO 144-03	>99	% berat	>99	>99
8	Berat Jenis (25°C)	SNI 2441 : 2011	>1,0	gr/cc	>1,0	>1,0
9	Stabilitas penyimpanan perbedaan titik lembek	ASTM D 5976 part 6.1	-	°C	<2,2	<2,2
10	Partikel yang lebih halus dari 150 micron	-	-	% berat	Min 95	
Pengujian Residu hasil TFOT (SNI-03-6835-2002)						
11	Berat yang hilang	SNI 06-2441-1991	<0,8	% berat	<0,8	<0,8
12	Viskositas dinamis	SNI 03-6441-2000	<800	°C	<1200	<1600
13	Penetrasi pada 25 °C	SNI 06-2456-1991	>54	% berat	>54	>54
14	Daktalitas pada 25 °C	SNI 2432 : 2011	>100	Cm	>50	>25
15	Keelastisan setelah pengembalian	AASHTO T 301-98	-	% berat		>60

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 Revisi 3

B. Pembagian Butir Agregat

Pembagian butir (gradasi) agregat adalah distribusi butir – butir agregat dengan ukuran tertentu dari analisis saringan dinyatakan dalam persen lolos atau persen tertahan berdasarkan berat agregat total. Gradasi mempengaruhi sifat seperti kekakuan, stabilitas, durabilitas, permeabilitas, workabilitas, kekesatan, dan ketahanan terhadap kerusakan. Gradasi agregat dikelompokkan menjadi:

1. Gradasi menerus (*continuous graded*)

Gradasi menerus juga disebut gradasi merata dimana ukuran agregat tersebar dari ukuran terbesar sampai terkecil. Rongga antar partikel yang lebih besar dapat terisi oleh partikel yang lebih kecil sehingga gradasi tersebut akan mengakibatkan agregat saling mengisi dan mengunci (*interlocking*). Sifatnya untuk lapis perkerasan adalah memiliki stabilitas tinggi, kurang kedap air, drainase jelek, dan berat volume besar. Gradasi ini dipakai pada campuran laston atau AC.

2. Gradasi tunggal (*single graded*)

Gradasi tunggal sering disebut juga gradasi seragam (*uniformly graded*) atau gradasi terbuka (*open graded*). Butiran agregat memiliki ukuran yang relatif sama sehingga rongga tidak terisi. Campuran agregat ini memiliki sifat permeabilitas tinggi, stabilitas kurang, berat volume kecil dan biasanya memiliki volume pori yang besar.

3. Gradasi senjang (*gap graded*)

Gradasi senjang tidak memiliki ukuran butir menengah. Campuran ini akan menghasilkan sifat yang mutunya berada diantara kedua jenis diatas. Gradasi senjang digunakan pada campuran HRS. Campuran tersebut menghasilkan perkerasan yang lebih halus dan lentur dari pada campuran AC. Sifat campuran ini biasanya stabilitasnya tidak setinggi AC. Rongga yang terbentuk diisi oleh aspal, oleh karena itu biasanya membutuhkan aspal yang lebih banyak dari AC untuk mencapai kadar optimumnya. Spesifikasi persen lolos untuk laston (AC-WC) terdapat dalam Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Gradasi agregat untuk campuran Laston AC

Ukuran Ayakan		% Berat lolos terhadap total agregat		
Inchi	mm	<i>Wearing Coarse (WC)</i>	<i>Base Coarse (BC)</i>	<i>Base</i>
1½	37,5	-	-	100
1	25	-	100	90 – 100
¾	19	100	90 – 100	76 – 90
½	12,5	90 – 100	75 – 90	60 – 78
⅜	9,5	77 – 90	66 – 82	52 – 71
No.8	2,36	33 – 53	30 – 49	23 – 41

Tabel 3.4 (Lanjutan)

Ukuran Ayakan		% Berat lolos terhadap total agregat		
Inchi	mm	<i>Wearing Coarse (WC)</i>	<i>Base Coarse (BC)</i>	<i>Base</i>
No.16	1,18	21 – 40	18 – 38	13 – 30
No.30	0,6	14 – 30	12 – 28	10 – 22
No.50	0,3	9 – 30	7 – 20	6 – 15
No.100	0,15	6 – 15	5 – 13	4 – 10
No.200	0,075	4 – 9	4 – 8	3 – 7

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 Revisi 3

C. Metode Pengujian Material

1. Agregat kasar

Agregat kasar berasal dari batu pecah dari industri pemecah batu yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm). Agregat kasar terkadang masih di kelompokkan menjadi fraksi agregat kasar dan agregat sedang. Berikut adalah jenis pengujian pada agregat kasar:

a. Berat jenis dan penyerapan air

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai berat jenis curah kering (*bulk*), berat jenis jenuh kering permukaan (*saturated surface dry = SSD*), dan berat jenis semu (*apparent*). Berat jenis digunakan untuk konversi dari berat dan volume bahan. Penyerapan air maksimum 3%. Pengujian ini sesuai standar SNI 1969-2008 tentang cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.

1) Berat jenis curah kering (*bulk specific gravity*)

Berat jenis curah kering (S_d) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_d = \frac{A}{(B-C)} \dots \dots \dots (3.1)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

B = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

C = berat benda uji dalam air (gram)

2) Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD)

Berat jenis jenuh kering muka (S_s) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_s = \frac{B}{(B-C)} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dengan, B = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

C = berat benda uji dalam air (gram)

3) Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)

Berat jenis curah kering (S_a) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_a = \frac{A}{(A-C)} \dots \dots \dots (3.3)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

C = berat benda uji dalam air (gram)

4) Penyerapan air (*absorbtion*)

Perhitungan persentase penyerapan air (S_w) adalah sebagai berikut:

$$S_w = \frac{B-A}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (3.4)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

B = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

b. Keausan agregat dengan mesin *Los Angeles*

Ketahanan agregat terhadap penghancuran diperiksa dengan menggunakan percobaan abrasi *Los Angeles*. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan SNI 2417-2008 tentang cara uji keausan dengan mesin abrasi *Los Angeles*. Pengujian ini untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap pencampuran, pemadatan, repetisi beban maupun pelapukan dan perbedaan suhu. Keausan yang didapat maksimum 40% dan dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{keausan} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \dots \dots \dots (3.5)$$

Dengan, a = berat benda uji semula (gram)

b = berat benda uji tertahan saringan no. 12 (1,7 mm) (gram)

c. Kelekatan agregat

Uji kelekatan agregat digunakan untuk mengetahui persentase penyelimutan agregat oleh aspal. Berdasarkan bina marga syarat kelekatan agregat minimal 95% berdasarkan pengamatan secara visual. Kelekatan agregat dilakukan untuk mengetahui daya lekat aspal terhadap agregat. Jika kekekatannya jelek maka aspal akan lebih mudah lepas dari agregat pada perkerasan mengakibatkan cepat lapuk. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan SNI 2439-2008 tentang cara uji penyelimutan dan pengelupasan pada campuran agregat-aspal.

d. Analisis saringan

Baik pada agregat kasar maupun halus digunakan analisis saringan dengan pengguncang mekanis untuk mendapatkan pemetaan dari setiap gradasi. Pengujian dilakukan sesuai SNI C136:2012 tentang metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar.

2. Agregat halus

Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi ‘alami’ batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (No.4). Pengujian dilakukan berdasarkan SNI 1970-2008 tentang pemeriksaan berat jenis dan penyerapan pasir. Pengujian yang dilakukan meliputi berat jenis, dan analisis saringan. Berikut adalah pengujian yang dilakukan pada agregat halus:

a. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus

1) Berat jenis curah kering (*bulk specific gravity*)

Berat jenis curah kering (S_d) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_d = \frac{A}{(B+S-C)} \dots \dots \dots (3.6)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

B = berat piknometer berisi air (gram)

C = berat piknometer dengan benda uji dan air (gram)

S = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

2) Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD)

Berat jenis jenuh kering muka (S_s) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_s = \frac{S}{(B+S-C)} \dots \dots \dots (3.7)$$

Dengan, B = berat piknometer berisi air (gram)

C = berat piknometer dengan benda uji dan air (gram)

S = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

3) Berat jenis semu (*apparent specific gravity*)

Berat jenis curah kering (S_a) dihitung dengan rumus berikut:

$$S_a = \frac{A}{(B+A-C)} \dots \dots \dots (3.8)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

B = berat piknometer berisi air (gram)

C = berat piknometer dengan benda uji dan air (gram)

4) Penyerapan air (*absorbtion*)

Perhitungan persentase penyerapan air (S_w) adalah sebagai berikut:

$$S_w = \frac{S-A}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (3.9)$$

Dengan, A = berat benda uji kering oven (gram)

S = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

b. Analisis saringan

Baik pada agregat kasar maupun halus digunakan analisis saringan dengan pengguncang mekanis untuk mendapatkan pemetaan dari setiap gradasi. Hasil yang didapat yaitu berat tertahan masing- masing saringan

3. Aspal

Aspal berperan sebagai bahan pengisi dan perekat agregat harus memenuhi spesifikasi yang disyaratkan dengan pengujian dibawah:

a. Penetrasi

Pemeriksaan penetrasi bertujuan untuk menentukan keras lunaknya aspal pada suhu 25°C dengan beban 100 gram selama 5 detik dengan alat *penetrometer*. Pengujian dilakukan sesuai SNI 2456-2011 tentang cara uji penetrasi bahan-bahan bitumen. Pembacaan jarum pada arloji penetrasi dinyatakan dengan satuan 0,1 mm. Untuk aspal penetrasi 60/70 yang digunakan, disyaratkan berada pada rentang 60 – 70 untuk aspal murni seperti yang telah disebutkan dalam Tabel 3.3.

b. Titik lembek

Titik lembek merupakan temperatur dimana bola baja mendorong aspal dalam cincin sampai ke pelat dasar sejauh 2,54 mm dengan kecepatan pemanasan 5°C per menit dengan cara *ring and ball*. Pengujian dilakukan sesuai SNI 2434-2011 tentang cara uji titik lembek aspal dengan alat cincin dan bola. Titik lembek aspal penetrasi 60/70 minimal 48°C dan untuk aspal modifikasi minimal 54°C. Spesifikasi terdapat pada Tabel 3.3.

c. Berat jenis

Berat jenis aspal dicari menggunakan alat piknometer dan timbangan. Massa aspal yang dimasukkan ke dalam piknometer minimal 4 gram. Pengujian dilakukan

sesuai SNI 2441-2011 tentang cara uji berat jenis aspal padat. Berat jenis minimal 1 seperti dalam Tabel 3.3.

Perhitungannya menggunakan rumus berikut:

$$\text{Berat jenis} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \dots \dots \dots (3.10)$$

Dengan, A = massa piknometer dan penutup (gram)
 B = massa piknometer dan penutup berisi air (gram)
 C = massa piknometer, penutup, dan benda uji (gram)
 D = massa piknometer, penutup, benda uji, dan air (gram)

Berat isi dicari dengan mengalikan berat jenis dengan berat isi pada temperature pengujian (W_T). untuk temperatur $15,6^\circ\text{C}$ $W_T=999,1 \text{ kg/m}^3$ sedangkan untuk temperatur 25°C $W_T=997 \text{ kg/m}^3$.

d. Daktilitas

Daktilitas merupakan tingkat keplastisan dari suatu bahan aspal. Pengujian dilakukan sesuai dengan SNI 2432:2011 tentang cara uji daktilitas aspal. Pengujian dilakukan pada suhu 25°C dengan meletakkan aspal dalam cetakan ke dalam mesin uji daktilitas. Mesin tersebut diatur memiliki kecepatan 5 cm per menit dan dicatat pada jarak terpanjang yang dapat ditarik sebelum bitumen putus. Nilai daktilitas minimal 100 cm seperti dalam Tabel 3.3. Jika dibawah 100 cm maka aspal dikategorikan getas, jika 100 – 200 cm maka aspal dikategorikan plastis, dan diatas 200 cm dikategorikan sangat plastis.

4. Aspal dengan substitusi kadar *styrofoam*

Pemeriksaan aspal dengan substitusi kadar *styrofoam* sama dengan pemeriksaan aspal murni, yang membedakan adalah pada setiap pengujian berat aspal digantikan oleh *styrofoam* pada kadar masing-masing 0%, 7%, 8%, 9%, dan 10% dari berat. Pencampuran dilakukan dengan cara pemanasan aspal dicampur dengan *styrofoam*.

D. Metode Pembuatan Benda Uji Campuran Panas

Benda uji dibuat dengan cara memanaskan agregat dan aspal secara terpisah kemudian pada masing-masing kadar. Agregat dan aspal dicampur sambil dipanaskan sampai suhunya 165°C . Kemudian benda uji dimasukkan kedalam

cetakan silinder. Kemudian di tumbuk masing masing 75 kali tumbukan untuk setiap sisi pada suhu 140°C. Keluarkan dan biarkan benda uji selama 24 jam.

E. Pemeriksaan Campuran dengan Metode *Marshall*

Pengujian *Marshall* merupakan pengujian untuk menentukan nilai stabilitas dan pelelehan (*flow*) dari suatu campuran beraspal. Stabilitas adalah kemampuan suatu campuran aspal untuk menerima beban sampai terjadi pelelehan atau perubahan bentuk dinyatakan dalam kilogram. Pelelehan (*flow*) adalah keadaan dimana benda uji mulai mengalami perubahan bentuk karena suatu beban yang dinyatakan dalam mm. Pemeriksaan *Marshall* menggunakan standar uji SNI 06-2484-1991.

Pengujian dilakukan menggunakan alat *Marshall* yang terdiri dari kepala penekan (*breaking head*), cincin penguji (*proving ring*) dengan kapasitas 2500 kg atau 5000 kg dilengkapi dengan arloji pengukur. Dalam perhitungan *Marshall* dibutuhkan parameter-parameter seperti berat jenis. Berikut adalah beberapa konsep perhitungan berat jenis:

1. Berat jenis kering

Berat jenis kering adalah berat jenis dimana volume yang diperhitungkan adalah seluruh volume pori yang ada (volume pori yang dapat diresapi air dan pori yang tidak dapat diresapi air). Digunakan jika dianggap aspal hanya menyelimuti bagian luar dari agregat. Berikut rumus untuk menghitung berat jenis kering dari total agregat:

$$G_{sb \text{ total agregat}} = \frac{P_1+P_2+P_3\dots+P_n}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \frac{P_3}{G_{sb3}} \dots + \frac{P_n}{G_{sbn}}} \dots\dots\dots(3.11)$$

Dengan,

$G_{sb \text{ total agregat}}$ = Berat jenis kering agregat gabungan (gr/cc)

$G_{sb1}, G_{sb2}, G_{sbn}$ = Berat jenis kering masing-masing agregat 1, 2, 3...n (gr/cc)

P_1, P_2, P_n = Persentase berat dari masing-masing agregat (%)

2. Berat jenis semu

Jika volume yang diperhitungkan adalah volume partikel dan bagian yang dapat diresapi air, maka disebut berat jenis semu (*apparent*). Penggunaan berat jenis ini dalam perhitungan jika dianggap aspal dapat meresapi seluruh bagian yang dapat diresapi

$$G_{sa \text{ total agregat}} = \frac{P_1+P_2+P_3\dots+P_n}{\frac{P_1}{G_{sa1}}+\frac{P_2}{G_{sa2}}+\frac{P_3}{G_{sa3}}\dots+\frac{P_n}{G_{san}}} \dots\dots\dots(3.12)$$

Dengan,

$$\begin{aligned} G_{sa \text{ total agregat}} &= \text{Berat jenis semu agregat gabungan (gr/cc)} \\ G_{sa1}, G_{sa2}, G_{san} &= \text{Berat jenis semu masing-masing agregat 1, 2, 3...n (gr/cc)} \\ P_1, P_2, P_n &= \text{Persentase berat dari masing-masing agregat (\%)} \end{aligned}$$

3. Berat jenis efektif total agregat

Pada kenyataannya aspal yang digunakan secara normal hanya akan meresapi sebagian dari pori yang dapat diresapi oleh air itu. Dengan demikian sebaiknya menggunakan berat jenis efektif.

$$G_{se \text{ total agregat}} = \frac{G_{sb}-G_{sa}}{2} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$G_{se \text{ total agregat}} = \frac{P_{mm}-P_b}{\frac{P_{nn}}{G_{mm}}+\frac{P_b}{G_b}} \dots\dots\dots(3.14)$$

Dengan,

$$\begin{aligned} G_{sb} &= \text{Berat jenis kering/bulk spesific gravity (gr/cc)} \\ G_{sa} &= \text{Berat jenis semu/apparent spesific gravity (gr/cc)} \\ G_b &= \text{Berat jenis aspal (gr/cc)} \\ G_{se \text{ total agregat}} &= \text{Berat jenis efektif agregat gabungan (gr/cc)} \\ G_{se1}, G_{se2}\dots G_{sen} &= \text{Berat jenis efektif dari masing-masing agregat 1, 2, 3... n} \\ G_{mm} &= \text{Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah} \\ &\quad \text{pemadatan (gr/cc)} \\ P_{mm} &= \text{Persen berat total campuran (=100)} \\ P_b &= \text{Persentase kadar aspal terhadap total campuran (\%)} \end{aligned}$$

4. Volume campuran dan berat jenis campuran setelah pemadatan

Volume campuran setelah pemadatan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{\text{bulk}} = V_{\text{SSD}} - W_w \dots\dots\dots(3.15)$$

Berat jenis campuran setelah pemadatan dapat ditentukan dengan perhitungan berikut:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{V_{bulk}} \dots\dots\dots(3.16)$$

Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se\text{total agregat}}} + \frac{P_b}{G_{sb\text{total agregat}}}} \dots\dots\dots(3.17)$$

Dengan,

V_{bulk} = Volume campuran setelah pemadatan (cc)

P_{mm} = Persen berat total campuran (=100)

P_s = Kadar agregat, persen terhadap berat total campuran

P_b = Kadar aspal, persen terhadap berat total campuran

W_a = Berat dalam air (gr)

G_{mb} = Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

G_{mm} = Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (gr/cc)

F. Karakteristik *Marshall*

Konsep dasar dari karakteristik *Marshall* dalam campuran aspal dikembangkan oleh Bruce Marshall seorang insinyur bahan aspal bersama-sama dengan *The Mississippi State Highway Department*. The U.S. Army Corp Of Engineers (Lavin, 2003) melanjutkan penelitian dengan intensif dan mempelajari hal-hal yang ada kaitannya, meningkatkan dan manambah kelengkapan pada prosedur pengujian *Marshall* dan akhirnya mengembangkan rancangan campuran pengujian ini, yang telah distandarisasikan di dalam ASTM D-1559.

Karakteristik campuran dari lapisan perkerasan dipengaruhi oleh susunan dan kualitas dari bahan-bahan penyusunnya, selain itu proses pelaksanaan dalam pengerjaannya dapat mempengaruhi kualitas campuran. Adapun karakteristik yang harus dimiliki oleh beton aspal campuran panas, antara lain adalah:

1. Kepadatan (*density*)

Kepadatan merupakan berat campuran tiap satuan volume. Kepadatan dipengaruhi oleh kalitas bahan, kadar aspal, jumlah tumbukan, dan komposisi

bahan penyusunnya. Semakin tinggi kepadatan semakin tinggi kemampuan untuk menahan beban lalu lintas dan kedekatan terhadap air yang lebih tinggi juga. Kepadatan dihitung dengan rumus:

$$G_{mb} = \frac{W_{mp}}{\frac{W_{mssd}}{\gamma_w} - \frac{W_{mv}}{\gamma_w}} \dots \dots \dots (3.18)$$

Dengan,

- G_{mb} = berat volume benda uji (*density*) (gr/cc)
- W_{mp} = berat kering benda uji sebelum direndam air (gram)
- W_{mssd} = berat benda uji dalam keadaan jenuh air (gram)
- W_{mv} = berat benda uji dalam air (gram)
- γ_w = berat volume air (gr/cc)

2. Rongga dalam agregat (*void in the mineral agregat*, VMA)

VMA adalah ruang antar partikel agregat pada suatu perkerasan beraspal, termasuk rongga udara dan volume aspal efektif. VMA dapat dihitung dengan persamaan:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (3.19)$$

Dengan,

- VMA = *Voids in the mineral aggregate* (%)
- G_{sb} = Berat jenis agregat (gr/cc)
- G_{mb} = Berat jenis curah campuran padat (gr/cc)
- P_s = Persen agregat terhadap berat total campuran (%)

3. Rongga dalam campuran (*voids in the mix*, VITM)

VITM adalah persentase volume rongga terhadap volume total campuran setelah dipadatkan, dinyatakan dalam %. VITM digunakan untuk mengetahui besarnya rongga campuran, demikian sehingga rongga tidak terlalu kecil (menimbulkan *bleeding*) atau terlalu besar (menimbulkan oksidasi / penuaan aspal dengan masuknya udara). Nilai VITM mengalami penurunan dengan penambahan kadar aspal hingga mencapai rongga udara dalam campuran minimum (Lavin, 2003).

VITM dibutuhkan untuk tempat bergesernya butir-butir agregat akibat pemadatan tambahan dari beban lalu lintas, atau tempat jika aspal menjadi lunak akibat naiknya temperature. VITM dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$VITM = 100 - \frac{G_{mm} \times G_{mb}}{G_{mm}} \dots\dots\dots(3.20)$$

dengan,

- VITM = kadar rongga terhadap campuran (%)
- G_{mb} = berat volume benda uji (gr/cc)
- G_{mm} = berat jenis maksimum teoritis (gr/cc)

4. Rongga yang terisi aspal (*voids filled with asphalt*, VFWA)

VFWA ditentukan dari jumlah VMA dan rongga udara di dalam campuran VFWA adalah persentase dari VMA yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Nilai VFWA meningkat dengan penambahan kadar aspal (Sukirman, 2013). VFWA merupakan bagian VMA yang terisi aspal, dimana aspal tersebut berfungsi menyelimuti butir-butir agregat dalam campuran agregat aspal padat untuk menghitung VFWA dapat digunakan persamaan berikut ini :

$$VFWA = 100 \times \frac{VMA - VITM}{VMA} \dots\dots\dots(3.21)$$

Dengan,

- VFWA = rongga terisi aspal (%)
- VMA = rongga diantara mineral agregat (%)
- VITM = rongga di dalam campuran (%)

5. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan lapis perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk permanen seperti gelombang, alur, ataupun *bleeding* (Sukirman, 2003). Stabilitas tergantung dari gesekan antar agregat dalam campuran dan kohesi. Nilai stabilitas yang terlalu tinggi menyebabkan lapisan menjadi kaku dan cepat mengalami retak, selain itu karena volume rongga antar agregat kurang, mengakibatkan kadar aspal yang dibutuhkan rendah sehingga ikatan aspal dengan agregat mudah lepas dan durabilitasnya rendah. Besarnya stabilitas benda uji didapat dari pembacaan arloji stabilitas alat tekan dikalikan dengan kalibrasi

*proving ring*nya dan faktor koreksi tebal benda uji. Untuk menghitung nilai stabilitas menggunakan rumus:

$$O = q \times \text{kalibrasi } \textit{proving ring} \times \text{koreksi tebal benda uji} \dots \dots \dots (3.22)$$

Dengan,

O = stabilitas (kg)

q = nilai pembacaan arloji

6. Kelelahan plastis (*flow*)

Kelelahan adalah kondisi dimana campuran beraspal mulai mengalami perubahan bentuk akibat suatu beban, dinyatakan dalam millimeter. Parameter kelelahan diperlukan untuk mengetahui deformasi (perubahan bentuk) vertikal campuran pada saat dibebani hingga hancur (pada saat stabilitas maksimum). Kelelahan akan meningkat seiring meningkatnya kadar aspal (Lavin, 2003).

Apabila pembacaan pada arloji menunjukkan nilai *flow* rendah, maka campuran cenderung menjadi getas, sebaliknya jika nilai *flow* tinggi campuran cenderung plastis.

7. *Marshall quotient* (MQ)

MQ adalah hasil bagi dari stabilitas dengan kelelahan yang dipergunakan untuk pendekatan terhadap nilai kekakuan atau kelenturan campuran, dinyatakan dalam kg/mm. Nilai MQ yang tinggi menunjukkan nilai kekakuan lapis keras tinggi. Lapis keras yang mempunyai nilai MQ yang terlalu tinggi akan mudah terjadi retak-retak akibat repetisi beban lalu lintas. Sebaliknya nilai MQ yang terlalu rendah menunjukkan campuran terlalu fleksibel yang mengakibatkan perkerasan mudah berubah bentuk bila menahan beban lalu lintas.

Marshall Quotient dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$MQ = \frac{MS}{MF} \dots \dots \dots (3.23)$$

Dengan,

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

MS = Stabilitas *Marshall* (*Marshall Stability*) (kg)

MF = Kelelahan (*Flow Marshall*) (mm)

G. Kadar Aspal Optimum

Kadar aspal optimum adalah hasil dari pengujian *Marshall* yang berupa nilai tengah dari rentang kadar aspal yang memenuhi spesifikasi campuran. Untuk mendapatkan kadar aspal optimum terlebih dahulu harus digambarkan hubungan antara kadar aspal dengan karakteristik *Marshall*, yaitu gambar hubungan kadar aspal dengan kepadatan (*density*), kadar aspal dengan *void mineral aggregate* (VMA), kadar aspal dengan *voids in the mix* (VITM), kadar aspal dengan *voids with aggregate* (VFWA), kadar aspal dengan stabilitas, kadar aspal dengan *flow*, kadar aspal dengan *Marshall Quotient* (MQ).

Kadar aspal optimum yang baik adalah kadar aspal yang memenuhi sifat campuran yang diinginkan dengan rentang kadar aspal optimum lebih besar 0,5%.

Persyaratan karakteristik campuran Laston yang diuji *Marshall* harus memenuhi persyaratan yang ditentukan. Berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga edisi 2010 revisi 3 persyaratan campuran Laston dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Ketentuan sifat-sifat campuran AC-WC

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Pondasi
Jumlah tumbukan perbidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075mm dengan kadar aspal efektif	Min.	1,0		
	Maks.	1,4		
Rongga dalam campuran (%)	Min.	3,0		
	Maks.	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65	65
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min.	800		1800
Pelelehan (mm)	Min.	2		3
	Maks.	4		6
Stabilitas <i>Marshall</i> (%) setelah perendaman selama 24 jam. 60°C	Min.	90		
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal (<i>refusal</i>)	Min.	2		

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Edisi 2010 Revisi 3