

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Hasil Karakterisasi Material**

Untuk memahami dan mengevaluasi kinerja material yang digunakan dalam konstruksi khususnya pada perkerasan jalan, sangat penting melakukan karakterisasi material. Proses karakterisasi ini mencakup berbagai pengujian yang bertujuan mengidentifikasi sifat fisik dan mekanik dari bahan-bahan yang akan digunakan. Melalui pengujian ini, dapat dipastikan bahwa material yang dipilih memenuhi standar kualitas yang diperlukan untuk mencapai kinerja optimal. Pengujian utama dalam karakterisasi material ini adalah pengujian berat jenis agregat, keausan agregat, serta berat jenis dan penetrasi aspal. Pengujian-pengujian ini digunakan untuk memastikan setiap material memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar dan dapat berfungsi dengan baik dalam aplikasi konstruksi. Material yang dilakukan pengujian merupakan agregat alam, agregat *steel slag*, dan aspal. Agregat alam meliputi agregat kasar dan halus, dengan ukuran agregat kasar berkisar antara 19,05 mm hingga 4,75 mm, serta agregat halus berkisar antara 2,36 mm hingga 0,075 mm. Sedangkan agregat *steel slag* meliputi agregat halus dengan ukuran 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, dan 0,075 mm. Hasil pengujian akan dibandingkan dengan standar yang digunakan oleh Bina Marga. Penggunaan standar ini digunakan sebagai acuan nilai minimal agar material yang digunakan dapat mencapai kualitas yang dibutuhkan.

#### 4.1.1 Berat Jenis Agregat

Karakterisasi berat jenis agregat merupakan hal yang perlu dilakukan untuk memastikan kualitas dan kinerja material yang digunakan dalam perkerasan jalan. Berat jenis agregat menunjukkan kepadatan material dan memengaruhi berbagai sifat fisik dan mekanik dari campuran agregat dengan aspal. Berat jenis agregat yang akurat sangat penting untuk perancangan campuran yang tepat, karena mempengaruhi proporsi bahan dalam campuran dan memberikan kinerja struktural dari perkerasan jalan yang berkualitas. Berikut ini merupakan hasil analisa pengujian berat jenis pada berbagai jenis agregat yang digunakan pada penelitian:

**a. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar alam**

Berat jenis agregat adalah rasio antara berat agregat dengan berat air atau volume agregat tersebut. Pengujian ini penting untuk menentukan komposisi agregat yang diperlukan dalam campuran beraspal. Berat jenis agregat membantu dalam menghitung proporsi material yang tepat, dan memberikan pengaruh kinerja dan stabilitas campuran aspal. Penyerapan air menunjukkan sejauh mana agregat dapat menyerap air, yang dapat memengaruhi kekuatan dan daya tahan material dalam berbagai kondisi lingkungan. Berikut ini merupakan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat alam.

$$\text{Berat Jenis Bulk} = \frac{BK}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\text{Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh} = \frac{SSD}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\text{Berat Jenis Semu} = \frac{\text{BK}}{\text{BK}-\text{Ba}} \dots\dots\dots(4.3)$$

Untuk perhitungan penyerapan air menggunakan cara :

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{\text{SSD}-\text{BK}}{\text{BK}} \times 100\% \dots\dots\dots(4.4)$$

Keterangan :

SSD : Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (g)

BK : Berat Benda Uji Setelah dioven (g)

Ba : Berat Benda Uji dalam Air (g)

**Tabel 4.1** Berat Jenis Agregat Kasar dan Penyerapan Air

Keterangan	Berat Jenis Agregat Kasar				
	I	II	III	Rata-rata	Standar Ketentuan
BJ <i>bulk</i>	2,61	2,5	2,58	2,57	2,53
BJ SSD	2,66	2,55	2,64	2,62	2,54
BJ <i>Apparent</i>	2,77	2,63	2,73	2,71	2,62
Penyerapan (%)	2,21	1,89	2,06	2,06	1,37

Berat jenis bulk adalah rasio antara berat agregat kering dengan volume total, termasuk volume pori yang dapat diisi air. Berat jenis SSD adalah perbandingan antara berat agregat yang penuh air dengan total volumenya, termasuk pori-pori berisi air. Dalam kondisi SSD, agregat jenuh air tetapi permukaannya kering. Berat jenis *apparent* adalah rasio antara berat agregat kering dengan volume yang benar-

benar ditempati oleh partikel agregat, tidak termasuk pori yang dapat menyerap air. Dari ketiga jenis berat jenis ini berat jenis yang digunakan adalah berat jenis *bulk*. Berat jenis *bulk* dan penyerapan air yang dihasilkan sesuai dengan standar.

**b. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus alam**

Penentuan berat jenis agregat halus merupakan langkah penting dalam menghitung kebutuhan komposisi campuran beraspal. Agregat halus adalah material yang lolos dari saringan 4,75 mm tetapi tertahan pada saringan 0,075 mm, dengan ukuran partikel berkisar antara 0,075 mm hingga 4,75 mm. Ukuran ini menjadikannya komponen penting dalam campuran beraspal, karena mempengaruhi tekstur dan kepadatan akhir dari campuran tersebut. Selain berat jenis, penyerapan air agregat halus juga diuji. Penyerapan air mengukur kemampuan agregat untuk menyerap air, yang dapat mempengaruhi durabilitas dan performa campuran beraspal. Agregat dengan tingkat penyerapan air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan potensi kerusakan pada struktur perkerasan.

**Tabel 4.2** Berat Jenis Agregat Halus dan Penyerapan Air

Keterangan	Berat Jenis Agregat Halus				Spesifikasi
	I	II	III	Rata-rata	
BJ <i>bulk</i>	2,61	2,58	2,54	2,58	
BJ SSD	2,68	2,67	2,64	2,66	Min. 2,55
BJ <i>Apparent</i>	2,81	2,83	2,82	2,82	
Penyerapan (%)	2,77	3,52	3,38	3,38	Maks 4,1

Rata-rata berat jenis yang didapatkan sebesar 2,58 untuk berat jenis bulk, 2,66 untuk berat jenis SSD dan 2,82 untuk berat jenis apperent sedangkan penyerapan air yang didapatkan sebesar 3,38%. Hasil dari pengujian sudah sesuai dengan standar yang digunakan.

**c. Berat jenis dan penyerapan air *steel slag***

*Slag* adalah produk sampingan yang dihasilkan selama proses pemurnian besi dan baja dari bijih besi. *Steel slag* terbentuk saat mineral-logam teroksidasi dari bijih besi dilebur di dalam *basic oxygen furnace*. Agregat halus adalah material yang lolos dari saringan 4# tetapi tertahan pada saringan 200#, dengan ukuran partikel berkisar antara 0,075 hingga 4,75 mm. Berikut ini merupakan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada material *steel slag*.

**Tabel 4.3** Berat Jenis dan Penyerapan Air *Steel slag*

Berat Jenis Agregat Halus <i>Steel slag</i>					
Keterangan	I	II	III	Rata-rata	Spesifikasi
BJ <i>bulk</i>	3,42	3,38	3,37	3,39	
BJ SSD	3,51	3,45	3,45	3,47	Min. 3,3
BJ <i>Apparent</i>	3,75	3,62	3,67	3,68	
Penyerapan (%)	2,56	1,94	2,46	2,32	Maks 3

Dalam pembuatan benda uji, berat jenis yang digunakan adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis *bulk* yang diperoleh adalah 3,39.

#### 4.1.2 Keausan Agregat

Keausan agregat merupakan proses di mana agregat kasar mengalami penghancuran atau pecah akibat berbagai faktor mekanis. Faktor-faktor ini meliputi gaya-gaya yang terjadi selama proses pembuatan jalan, seperti penimbunan, penghamparan, dan pemadatan. Selain itu, keausan agregat juga terjadi karena beban lalu lintas yang melintasi permukaan jalan, yang memberikan tekanan berulang pada agregat. Tidak hanya faktor mekanis, keausan agregat juga dipengaruhi oleh proses kimiawi. Misalnya, kelembaban yang berfluktuasi dapat menyebabkan agregat mengembang dan menyusut. Nilai abrasi, yang diukur menggunakan mesin *Los Angeles Abrasion* (LAA), merupakan parameter penting dalam menilai daya tahan agregat kasar terhadap penghancuran. Nilai ini menunjukkan sejauh mana agregat mampu bertahan dari tekanan dan gesekan yang disebabkan oleh beban mekanis selama penggunaan. Salah satu indikator untuk menentukan kualitas dari material seperti agregat kasar yang digunakan untuk pekerjaan sipil adalah pengujian keausan agregat dengan mesin *Los Angeles Abrasion*.



**Gambar 4.1** Pengujian Keausan Agregat Alam dengan Mesin LAA

**Tabel 4.4** Hasil Pengujian Keausan Agregat Alam

LAA Agregat Alam				
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah		
Saringan		Hasil Pengujian		
Lolos	Tertahan	Berat Sebelum, a (g)		
3/4'	1/2'	2500	2500	2500
1/2'	3/8'	2500	2500	2500
Jumlah Berat		5000	5000	5000
Berat Sesudah, b (g)		3977,5	3568	3867
a-b		1022,5	1432	1133
LAA Agregat Alam				
Keausan (%)		20,45	28,64	22,66
Keausan rata-rata (%)		23,92		

Dari tiga kali pengujian yang dilakukan, diperoleh hasil rata-rata keausan agregat sebesar 23,92%, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Nilai keausan agregat ini telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh SNI 2417 2008, yang mensyaratkan nilai keausan harus kurang dari 40%. Pengukuran nilai abrasi ini sangat penting dalam industri konstruksi jalan. Agregat dengan nilai abrasi rendah dianggap lebih tahan lama dan lebih cocok digunakan dalam lapisan perkerasan jalan yang harus menahan beban lalu lintas berat. Sebaliknya, agregat dengan nilai abrasi tinggi cenderung cepat rusak dan tidak cocok untuk aplikasi yang memerlukan daya tahan tinggi. Oleh karena itu, pengujian abrasi menjadi langkah krusial dalam memastikan kualitas dan ketahanan material yang digunakan dalam pembangunan infrastruktur jalan.

### 4.1.3 Hasil Analisa XRF

Analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*) telah dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung dalam steel *slag*. Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen utama yang terdapat dalam steel *slag* didominasi oleh oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sebesar 28,4%, kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) sebesar 27,3%, dan silika ( $\text{SiO}_2$ ) sebesar 23,9%. Selain itu, ditemukan juga kandungan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sebesar 8,04% dan fosfor pentoksida ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) sebesar 6,66%. Komponen minor lainnya termasuk oksida mangan, titanium, sulfur, vanadium, kromium, dan nikel dengan persentase yang lebih kecil. Senyawa-senyawa tersebut akan memberikan pengaruh pada kualitas jalan.

**Tabel 4.5** Hasil Pengujian XRF Pada *Steel Slag* [27]

Senyawa	Kandungan (%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	28,4
$\text{CaO}$	27,3
$\text{SiO}_2$	23,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,04
$\text{P}_2\text{O}_5$	6,66
$\text{MnO}$	2,53
$\text{TiO}_2$	0,566
$\text{SO}_3$	0,399
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,175
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,114
$\text{NiO}$	0,106
f- $\text{CaO}$	0,36
Lain-lain	1,92

#### 4.1.4 Berat Jenis Aspal

Pengujian berat jenis bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis yang akan digunakan dalam perencanaan gradasi campuran aspal. Berat jenis aspal menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kualitas dan kelayakan material aspal yang akan digunakan dalam perkerasan jalan. Aspal dengan berat jenis yang sesuai dengan standar yang ditetapkan menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kepadatan dan kekuatan yang cukup untuk menahan beban lalu lintas. Dalam industri konstruksi jalan, penggunaan aspal dengan berat jenis yang tepat sangat penting untuk memastikan daya tahan dan performa perkerasan jalan dalam jangka panjang.

**Tabel 4.6** Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal

Keterangan	Nilai
Berat piknometer (g)	34,5
Berat piknometer + air (g)	135,5
Berat piknometer + benda uji (g)	126
Berat piknometer + benda uji + air (g)	142,5
Berat jenis aspal	1,083

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis aspal adalah 1,083. Angka ini memenuhi syarat yang ditetapkan oleh SNI 2441-2011, yang mengharuskan berat jenis aspal minimal 1. Pengujian berat jenis aspal dilakukan untuk menentukan jumlah aspal yang diperlukan dalam campuran. Semakin tinggi nilai berat jenis aspal, semakin besar pula massa aspal dalam

campuran tersebut. Nilai berat jenis 1,083 menunjukkan bahwa aspal memiliki kepadatan yang cukup untuk memberikan performa optimal dalam aplikasi perkerasan jalan.

#### **4.1.5 Penetrasi Aspal**

Penetrasi aspal adalah pengujian yang bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan atau konsistensi aspal. Pengujian ini dilakukan dengan cara menekan jarum standar ke dalam aspal pada kondisi tertentu, yaitu pada suhu 25°C selama 5 detik, dengan beban sebesar 100 gram. Hasil pengujian dinyatakan dalam satuan penetrasi, yaitu seperseratus milimeter (dmm). Aspal yang digunakan dalam pengujian ini adalah aspal dengan penetrasi 60/70, yang berarti jarum dapat menembus aspal sedalam 60 hingga 70 dmm dalam kondisi standar tersebut. Aspal penetrasi 60/70 merupakan aspal yang sering digunakan karena jumlahnya yang berlimpah di Indonesia. Aspal penetrasi 60/70 juga memiliki ketahanan yang kuat pada temperatur yang tinggi dan mampu menahan deformasi yang tinggi cocok digunakan di iklim tropis. Berikut ini adalah hasil pengujian penetrasi aspal.



**Gambar 4.2** Pengujian Penetrasi Aspal

**Tabel 4.7** Hasil Pengujian Penetrasi Aspal

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

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai penetrasi aspal adalah 66 pada pengujian I, 65,8 pada pengujian II, dan 64,3 pada pengujian III. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa penetrasi aspal tetap berada dalam rentang 60-70, yang merupakan standar untuk aspal dengan kode 60/70. Penetrasi aspal diukur sebagai penurunan jarum penetrasi dengan beban 100 gram selama 5 detik. Nilai penetrasi ini sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 2456-2011 untuk aspal 60/70. Pengujian penetrasi aspal dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau konsistensi aspal yang akan digunakan dalam konstruksi. Semakin tinggi nilai penetrasi, maka semakin lembek atau kurang konsisten aspal tersebut, yang berpotensi membuatnya lebih rentan terhadap deformasi di bawah beban lalu lintas. Konsistensi yang tepat dari aspal sangat penting untuk memastikan bahwa campuran aspal dapat menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebihan yang mengakibatkan kerusakan. Aspal dengan penetrasi 60/70 termasuk dalam kategori aspal dengan tingkat kekerasan menengah, yang cocok digunakan dalam berbagai lalu lintas [22].

## 4.2 Hasil Karakteristik *Marshall*

Karakteristik *Marshall* yang menjadi fokus dalam penelitian ini mencakup enam parameter utama, yaitu VIM (*Void in Mix*), VMA (*Void in Mineral Aggregate*), VFA (*Void Filled with Asphalt*), stabilitas, *flow*, dan *Marshall quotient*. Setiap parameter ini memiliki peran penting dalam mengevaluasi kualitas campuran aspal dan performa perkerasan jalan. *Void in mix* (VIM) volume total udara yang berada di antara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu campuran yang telah dipadatkan, dan dinyatakan dalam persen volume *bulk*. *Void in mineral aggregate* (VMA) adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran yang telah dipadatkan, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji. *Void filled with asphalt* (VFA) adalah bagian dari rongga yang berada di antara mineral agregat (VMA) yang terisi aspal efektif dinyatakan dalam persen. Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan menerima beban yang bekerja tanpa perubahan bentuk. Nilai stabilitas juga menunjukkan besarnya kemampuan perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja. *Flow* (kelelahan plastis) adalah besarnya deformasi vertikal sampel yang terjadi mulai saat awal pembebanan sampai kondisi kestabilan maksimum sehingga sampel sampai batas runtuh. *Flow* merupakan indikator terhadap lentur. *Marshall quotient* merupakan perbandingan antara stabilitas dengan kelelahan plastis (*flow*) dan dinyatakan dalam kg/mm. Besarnya *Quotient* merupakan indikator dari kelenturan yang potensial terhadap kerekataan [23]. Berikut ini merupakan hasil rekapitulasi dari pengujian *marshall* untuk mengetahui kualitas dari sampel perkerasan jalan.

**Tabel 4.8** Rekapitulasi Hasil Karakteristik Marshall

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)	Kadar <i>Steel slag</i>				Spesifikasi
		40%	60%	80%	100%	
VMA (%)	5	16,21	16,49	16,86	17,04	Minimum 14%
	5,5	17,09	17,32	17,70	17,34	
	6	17,84	18,12	18,62	18,02	
VIM (%)	5	4,87	4,98	5,19	5,21	3% - 5%
	5,5	4,68	4,71	4,93	4,30	
	6	4,36	4,42	4,77	3,84	
VFA (%)	5	69,97	69,83	69,20	69,45	Minimum 65%
	5,5	72,59	72,81	72,16	76,22	
	6	75,64	75,62	74,40	79,01	
Stabilitas (kg)	5	1109,60	1101,51	1210,37	1182,72	Minimum 800kg
	5,5	1258,33	1294,75	1333,01	1310,21	
	6	1145,63	1202,13	1269,29	1225,68	
<i>Flow</i> (mm)	5	3,07	2,93	2,85	3,23	2mm - 4mm
	5,5	3,48	3,33	3,17	3,35	
	6	3,97	3,83	3,65	3,57	
MQ (kg/mm)	5	361,82	375,51	424,69	366,17	Minimum 250 kg/mm
	5,5	379,47	388,42	420,95	391,11	
	6	288,82	313,60	347,75	343,33	

Tabel di atas menunjukkan hasil pengujian karakteristik *Marshall* untuk campuran aspal dengan variasi kadar *steel slag* 40%, 60%, dan 80%. Parameter

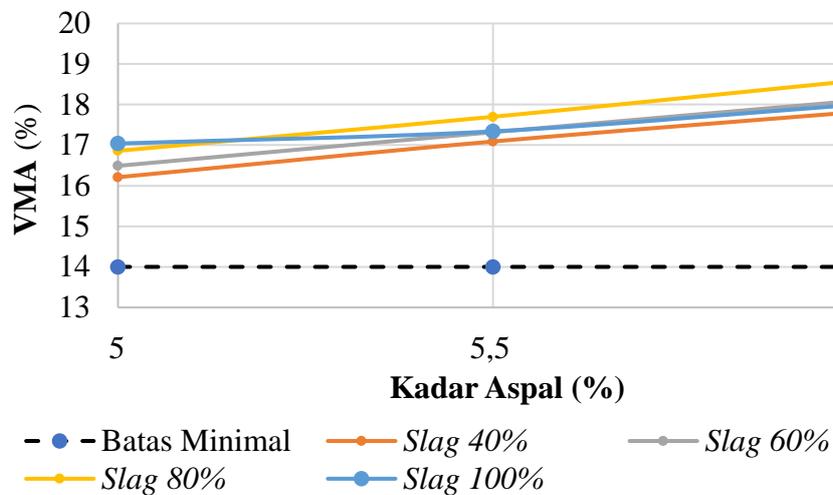
yang diuji meliputi VMA (*Void in Mineral Aggregate*), VIM (*Void in Mix*), VFA (*Void Filled with Asphalt*), Stabilitas, *Flow*, dan MQ (*Marshall quotient*) dengan berbagai kadar aspal (5%, 5,5%, dan 6. Semua nilai VMA untuk setiap kadar aspal dan *steel slag* memenuhi standar minimum 14%. Sebagian besar nilai VIM berada dalam rentang 3% - 5%, kecuali beberapa nilai pada kadar *steel slag* 80% yang sedikit melebihi batas atas standar. Semua nilai VFA memenuhi standar minimum 65%. Semua nilai Stabilitas memenuhi standar minimum 800 kg, menunjukkan bahwa campuran memiliki kekuatan yang memadai. Sebagian besar nilai *flow* berada dalam rentang standar 2 mm - 4 mm, meskipun ada beberapa nilai yang sedikit di luar rentang nilai standar. Semua nilai MQ memenuhi standar minimum 250 kg/mm.

#### 4.2.1 Hasil Analisa VMA (*Void In Mineral Aggregate*)

Rongga di antara mineral agregat (VMA) adalah ruang di antara partikel agregat pada suatu perkerasan beraspal, termasuk rongga udara dan volume aspal efektif (tidak termasuk volume aspal yang diserap agregat). Rumus untuk mencari nilai VMA adalah:

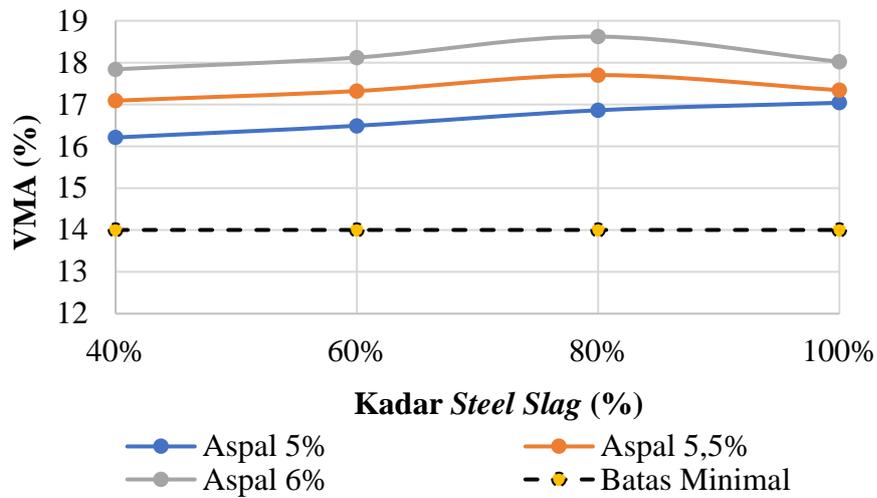
$$\text{Void In Mineral Aggregate} = 100 - \frac{\text{Berat isi} \times (100 - \text{kadar aspal})}{\text{Berat jenis agregat alam}} \dots\dots(4.5)$$

Nilai VMA yang terlalu kecil menimbulkan masalah durabilitas, karena akan membatasi besarnya rongga terisi aspal, sehingga aspal menjadi kurang kedap terhadap air dan udara. VMA yang terlalu besar menimbulkan masalah stabilitas serta tidak ekonomis, karena dengan rongga antar agregat yang terlalu besar maka kondisi gesekan internal (*internal friction*), penguncian (*interlocking*), dan kemampuan saling mengisi menjadi menurun.



**Gambar 4.3** Pengaruh Kadar Aspal terhadap VMA

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai VMA (*Voids in Mineral Aggregate*) dalam perkerasan jalan. Terlihat bahwa semakin bertambah kadar aspal, nilai VMA cenderung meningkat untuk semua variasi persentase *slag*. Peningkatan VMA ini disebabkan oleh aspal yang mengisi rongga antar agregat, mengurangi kontak langsung antar partikel agregat. Saat kadar aspal bertambah, lapisan aspal yang menyelimuti agregat menjadi lebih tebal, menciptakan jarak lebih besar antar agregat dan meningkatkan volume rongga dalam campuran. Nilai VMA yang baik harus berada di atas batas minimal (14%) untuk memastikan cukup ruang bagi aspal dan udara, namun tidak terlalu tinggi agar campuran tetap stabil. Nilai VMA yang optimal sangat penting untuk performa perkerasan jalan. VMA yang terlalu rendah dapat mengakibatkan campuran yang kaku dan rentan terhadap retak, sementara VMA yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stabilitas campuran menurun.



**Gambar 4.4** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VMA

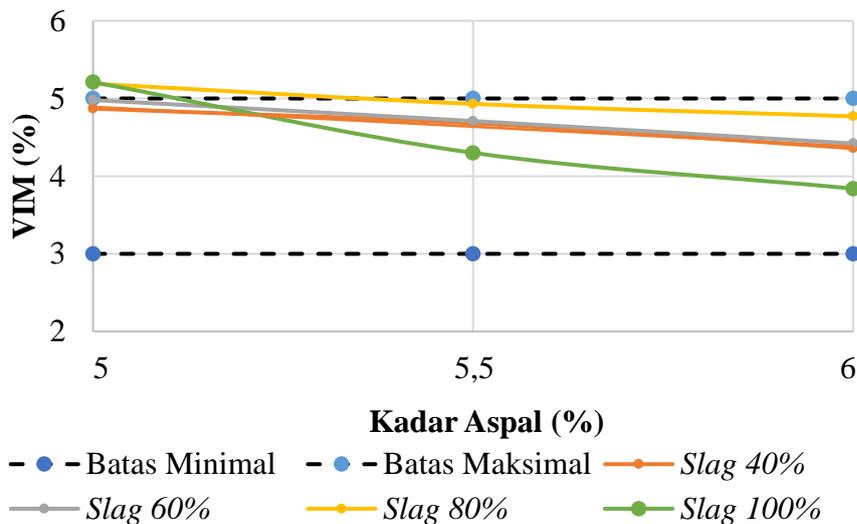
Berdasarkan Gambar 4.4 di atas ditunjukkan bahwa semua variasi kadar *steel slag* campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 14%. Terdapat pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai VMA yang terlihat semakin naik dengan adanya penambahan kadar *steel slag*. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa kenaikan nilai VMA berkaitan dengan sifat fisis *steel slag* yang *porous*, sehingga dengan penambahan kadar *steel slag* akan menambah volume rongga dalam campuran agregat itu sendiri. Nilai VMA yang mendekati nilai minimum menunjukkan bahwa campuran lebih memiliki keawetan, sedangkan nilai VMA yang tinggi akan mengakibatkan campuran memiliki deformasi yang terlalu besar [24]. Penurunan juga terjadi pada penggunaan kadar *steel slag* 100%, hal ini disebabkan oleh *steel slag* memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan agregat biasa. Hal tersebut membuat *steel slag* cenderung mengisi lebih banyak ruang, menyebabkan penurunan nilai VMA.

#### 4.2.2 Hasil Analisa VIM (*Void In Mixture*)

Nilai VIM menunjukkan nilai persentase rongga dalam suatu campuran aspal. Nilai VIM berpengaruh terhadap nilai dari durabilitas, semakin besar nilai VIM menunjukkan campuran bersifat keropos (*porous*). Proses ini mengakibatkan udara dan air mudah masuk ke dalam lapis perkerasan sehingga berakibat meningkatkan proses oksidasi yang dapat mempercepat penuaan aspal [6]. Spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga adalah 4%-6%. Penggunaan kadar aspal dan penggunaan kadar *steel slag* harus sesuai agar sesuai dengan standar Bina Marga. Semakin tinggi nilai VIM, semakin besar porositas campuran aspal. Campuran yang terlalu *porous* cenderung kurang stabil dan lebih rentan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas. Hasil grafik nilai VIM pengaruh kadar aspal dan *steel slag* ditunjukkan pada Gambar 4.5 dibawah

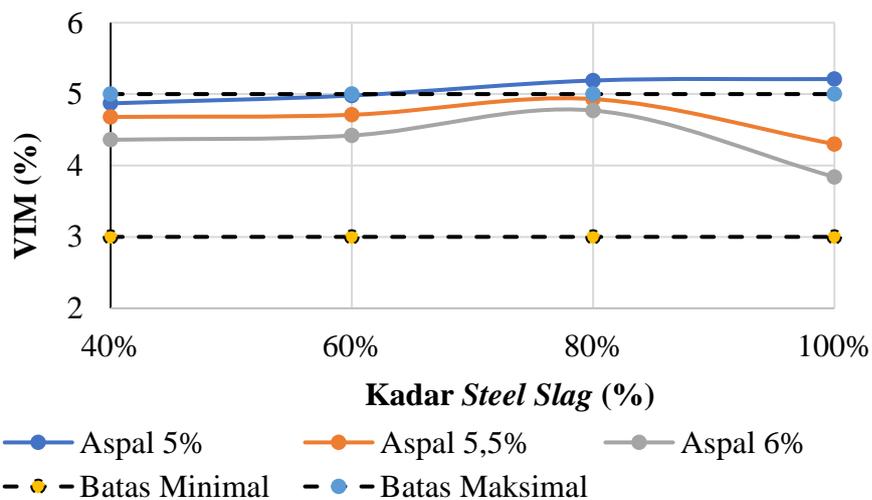
Rumus perhitungan VIM :

$$VIM = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots\dots\dots(4.6)$$



**Gambar 4.5** Pengaruh Kadar Aspal terhadap VIM

Berdasarkan Gambar 4.5 diatas ditunjukkan bahwa variasi kadar aspal pada campuran memenuhi dan tidak memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 3% dan maksimum 5%. Pada kadar aspal 5% nilai vim tidak sesuai dengan batas maksimal standar Bina Marga. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah kadar aspal maka nilai VIM akan semakin turun. Terdapat literatur yang menjelaskan seiring dengan bertambahnya kadar aspal, maka nilai VIM menjadi semakin menurun [24]. Hal ini disebabkan karena semakin banyak penggunaan kadar aspal maka aspal akan mengisi rongga pada campuran perkerasan jalan dan menurunkan nilai VIM.



**Gambar 4.6** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VIM

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai VIM (*Voids in Mixture*) dalam perkerasan jalan. Terlihat bahwa *penambahan steel slag* hingga 80% cenderung meningkatkan nilai VIM untuk semua kadar aspal yang diuji. Peningkatan ini disebabkan oleh karakteristik fisik *steel slag*

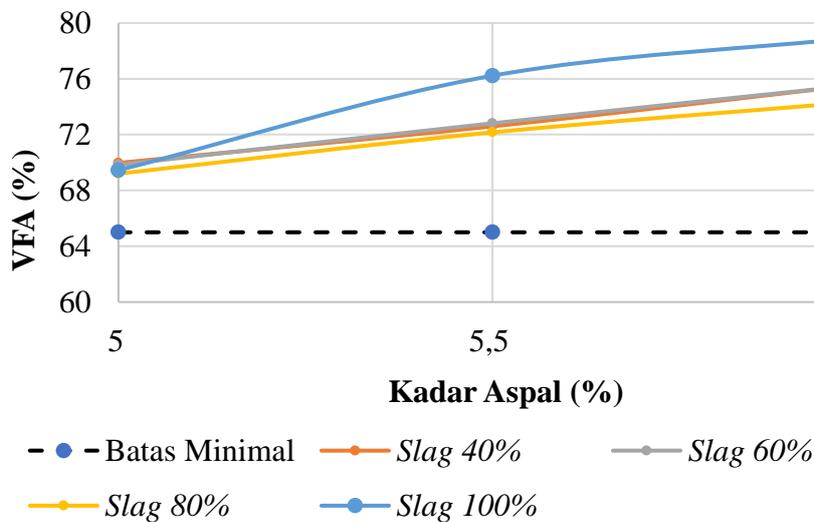
yang memiliki bentuk lebih *angular* dan tekstur permukaan yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat alam, sehingga menciptakan lebih banyak rongga dalam campuran. Namun, fenomena menarik terjadi pada penggunaan kadar *steel slag* 100%, di mana terjadi penurunan nilai VIM untuk semua kadar aspal. Penurunan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, pada konsentrasi 100%, *steel slag* mungkin menjadi lebih rapat dalam campuran karena distribusi ukuran partikel yang lebih seragam. Kedua, sifat fisik *steel slag* yang unik memungkinkan pemadatan yang lebih efektif pada jumlah yang banyak sehingga mengurangi rongga antar partikel. Nilai optimal terlihat pada penggunaan *steel slag* 80%, di mana nilai VIM untuk semua kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga (3-5%). Pada titik ini, campuran mencapai keseimbangan optimal antara penggunaan *steel slag* dan memenuhi persyaratan nilai untuk rongga dalam campuran. Kadar *steel slag* 80% dapat memberikan kombinasi terbaik antara stabilitas struktur dan durabilitas campuran, membuat cukup ruang untuk ekspansi aspal tanpa membuat campuran terlalu *porous* atau terlalu padat. Hasil penelitian yang ditunjukkan dalam Gambar 4.6 menunjukkan tren yang menarik bila dibandingkan dengan literatur yang dikemukakan oleh Rahmawati [6]. Menurut Rahmawati, peningkatan jumlah *steel slag* dalam campuran aspal cenderung meningkatkan jumlah rongga (VIM). Penelitian ini sesuai dengan hasil yang terlihat pada grafik untuk kadar *steel slag* hingga 80%. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan penyimpangan dari tren tersebut pada kadar *steel slag* 100%.

### 4.2.3 Hasil Analisa VFA (*Void Filled with Asphalt*)

VFA (*Void Filled Asphalt*), menyatakan persen rongga yang terdapat diantara partikel agregat (VFA) yang terisi oleh aspal, tetapi tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Rongga ini dalam kondisi kering akan diisi oleh udara dan dalam kondisi basah akan diisi oleh air. *Steel slag* memiliki pengaruh yang signifikan pada VFA karena sifat *steel slag* sendiri yang berpori dapat memungkinkan untuk menyerap aspal yang seharusnya aspal mengisi rongga diantara campuran, namun terserap oleh *steel slag*.

Rumus perhitungan VFA :

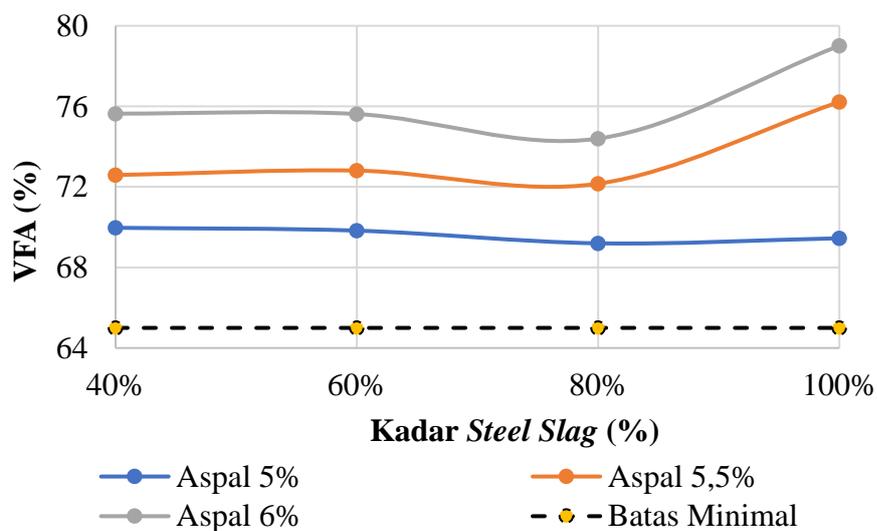
$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VIM}{VMA} \dots\dots\dots(4.6)$$



**Gambar 4.7** Pengaruh Kadar Aspal terhadap VFA

Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai VFA (*Voids Filled with Asphalt*) dalam perkerasan jalan. Grafik menunjukkan tren peningkatan nilai VFA seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Berdasarkan Gambar 4.7 diatas ditunjukkan bahwa semua variasi campuran

memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 65%. Peningkatan nilai VFA ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pengisian rongga antar agregat oleh aspal. Saat kadar aspal bertambah, lebih banyak aspal tersedia untuk mengisi rongga-rongga dalam campuran, yang mengakibatkan peningkatan persentase rongga yang terisi aspal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua campuran memenuhi batas minimal VFA yang ditetapkan (65%). Hal tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki cukup aspal untuk mengikat agregat dan memberikan durabilitas yang memadai. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai VFA yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan campuran yang terlalu "basah" dan berpotensi mengalami *bleeding* atau deformasi plastis. Campuran dengan persentase *steel slag* yang lebih tinggi cenderung memerlukan lebih banyak aspal untuk mencapai nilai VFA yang sama dengan campuran yang menggunakan lebih sedikit *steel slag*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam karakteristik *steel slag*.



**Gambar 4.8** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VFA

Gambar 4.8 menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai *Voids Filled with Asphalt* (VFA) pada tiga variasi kadar aspal, yaitu 5%, 5,5%, dan 6%. Secara umum, VFA meningkat seiring bertambahnya kadar *steel slag* dalam campuran, meskipun pada kadar tertentu perubahan cenderung stabil. Pada kadar *steel slag* 40% hingga 80%, nilai VFA meningkat secara bertahap namun tidak signifikan. Namun, terjadi lonjakan signifikan pada kadar 100%, terutama pada kadar aspal 5,5% dan 6%. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa nilai VFA umumnya menurun seiring bertambahnya kadar *steel slag* dalam campuran agregat. Hal ini dikarenakan semakin banyak agregat *slag* yang digunakan, semakin banyak pula aspal yang terserap oleh *slag*, karena sifat *slag* yang lebih porous [24]. Dalam situasi seperti ini, jumlah aspal yang mengisi *voids* dalam campuran cenderung menurun, sehingga nilai VFA menjadi lebih rendah. Namun, fenomena lonjakan nilai VFA pada kadar 100% *steel slag* pada grafik ini mengindikasikan adanya faktor lain yang mempengaruhi hasil. Lonjakan VFA pada 100% *steel slag* dapat dijelaskan oleh peran karakteristik fisik *slag* itu sendiri. *Steel slag* adalah agregat yang sangat keras dan memiliki stabilitas yang tinggi. Pada kadar 100%, jumlah *voids* yang terbentuk dalam campuran bisa lebih terkontrol karena *steel slag* yang lebih besar dan padat mampu memperbaiki struktur dan *interlock* antar agregat, sehingga ruang kosong antar agregat berkurang. Meskipun ada lebih banyak aspal yang terserap oleh *slag*, pada kadar yang sangat tinggi (100%), *steel slag* juga dapat membantu mengurangi *voids*, sehingga VFA meningkat karena lebih banyak volume *void* yang diisi aspal. Hal ini mungkin

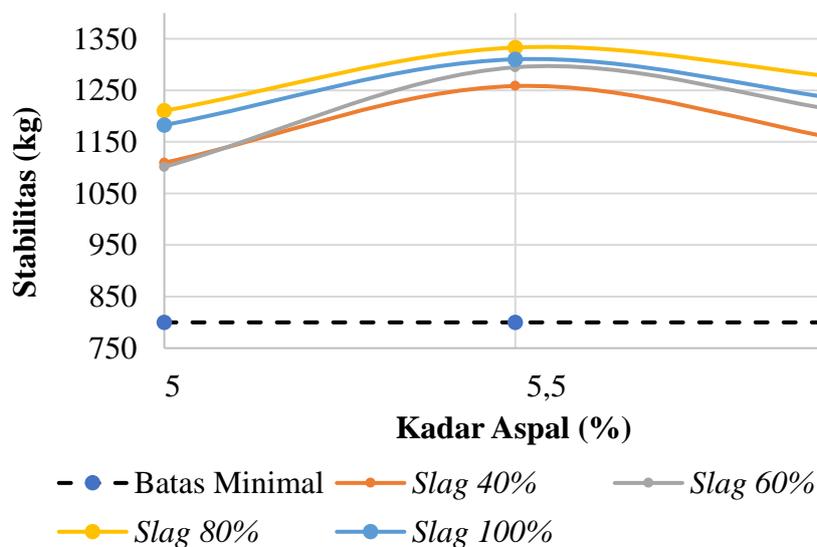
menjelaskan mengapa pada kadar 100%, terjadi lonjakan yang tidak sesuai dengan literatur.

#### 4.2.4 Hasil Analisa Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, ataupun *bleeding*. Semakin tinggi volume lalu lintas yang membebani sebuah jalan, maka stabilitas yang dibutuhkan oleh perkerasan jalan tersebut akan semakin tinggi agar perkerasan jalan tidak mudah berubah bentuk dan dapat menahan beban lalu lintas. Stabilitas campuran pada pengujian *Marshall* ditunjukkan dengan pembacaan nilai stabilitas yang dikoreksi dengan angka koreksi tebal benda uji [25].

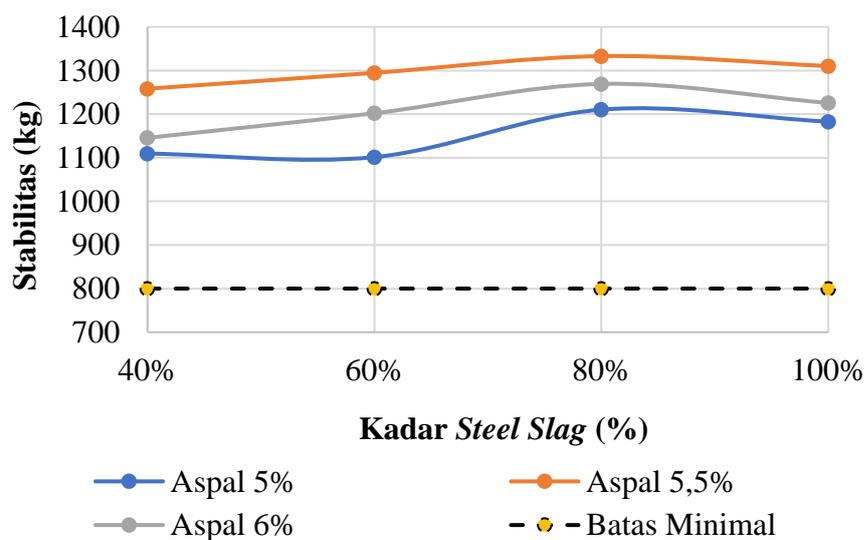
Rumus perhitungan stabilitas :

$$\text{Stabilitas} = \text{Bacaan dial} \times \text{angka kalibrasi} \times \text{angka korelasi berat} \dots (4.7)$$



**Gambar 4.9** Pengaruh Kadar Aspal terhadap Stabilitas

Berdasarkan Gambar 4.9 ditunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg. Pada grafik diatas dapat terlihat bahwa terjadi penurunan nilai stabilitas pada kadar aspal 6%. Ketika kadar aspal ditingkatkan dalam campuran perkerasan jalan, nilai stabilitas umumnya meningkat hingga mencapai titik optimal karena aspal berfungsi sebagai pengikat yang menyatukan agregat dan mengisi rongga dalam campuran. Namun, jika kadar aspal terlalu tinggi, kelebihan aspal akan menyebabkan lapisan aspal yang terlalu tebal di sekitar agregat. Hal tersebut dapat mengurangi gesekan antar partikel agregat dan menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak atau "tergeser" di bawah beban. Akibatnya, stabilitas campuran menurun karena campuran tidak lagi mampu menahan beban secara efektif dan dapat mengalami deformasi atau kerusakan lebih cepat. Oleh karena itu diperlukan jumlah kadar aspal yang optimal untuk digunakan.



**Gambar 4.10** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap Stabilitas

Berdasarkan Gambar 4.10 diatas ditunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa seiring dengan bertambahnya nilai kadar *steel slag* maka nilai stabilitas semakin naik. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa kenaikan nilai stabilitas ini dikarenakan sifat fisik *steel slag* yang berongga dan berbentuk tidak beraturan sehingga memungkinkan terjadinya ikatan (*interlock*) yang lebih kuat diantara agregat. Kenaikan nilai tersebut akan mengakibatkan campuran yang memiliki kadar *slag* yang lebih tinggi akan lebih mampu menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja diatasnya [26]. Hasil penelitian ini sesuai dengan literatur yang digunakan semakin banyak kadar *steel slag* yang digunakan maka nilai stabilitas akan semakin besar. Namun, terjadi penurunan pada kadar *steel slag* 100% sehingga didapat nilai stabilitas yang optimum pada kadar *steel slag* 80%.

Terdapat pula pengaruh komposisi *steel slag* terhadap nilai stabilitas. Kandungan utama *steel slag* yang terdiri dari  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , dan  $\text{SiO}_2$  memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas campuran perkerasan.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dengan struktur kristal keras dan stabilnya membentuk fasa hematit yang tahan terhadap deformasi dan abrasi [28].  $\text{CaO}$  berkontribusi melalui sifat penyemenannya yang membentuk  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , meningkatkan kohesi dan interlocking antar agregat [29]. Sementara  $\text{SiO}_2$  dengan titik leleh tinggi meningkatkan stabilitas pada suhu tinggi dan memperkuat daya rekat antara aspal dan agregat [30]. Kombinasi ketiga komposisi ini menghasilkan

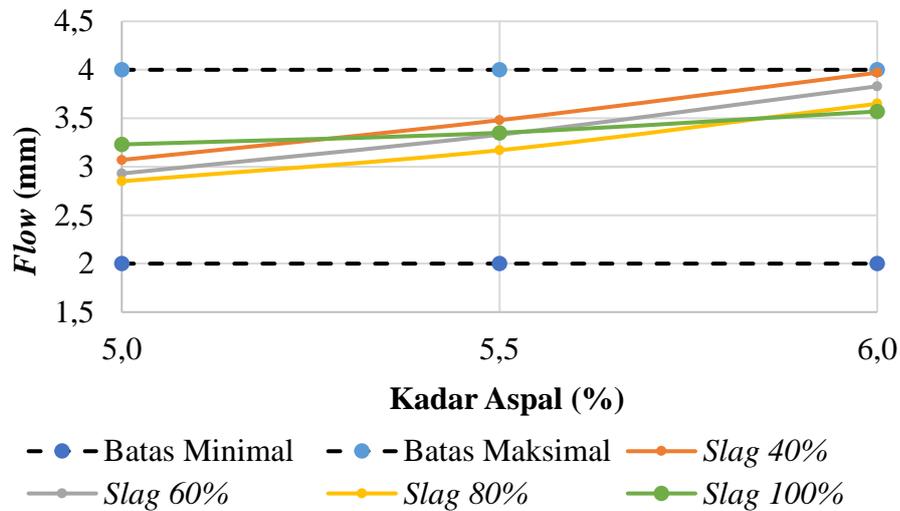
campuran yang lebih tahan terhadap deformasi, sehingga meningkatkan nilai stabilitas dan membuat perkerasan jalan lebih kuat menahan beban lalu lintas.

#### 4.2.5 Hasil Analisa *Flow*

Kelelehan atau *flow* menunjukkan besarnya penurunan atau deformasi yang terjadi terhadap perkerasan jalan akibat menahan beban yang diterimanya. Kelelehan merupakan parameter empiris yang menjadi indikator terhadap kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang diakibatkan oleh beban. Campuran yang memiliki nilai *flow* yang rendah dan stabilitas yang tinggi, cenderung menjadi kaku, getas (*brittle*), dan rentan terhadap retak, sedangkan campuran yang memiliki nilai *flow* yang tinggi dengan stabilitas yang rendah cenderung mudah berubah bentuk apabila mendapatkan beban lalu lintas. Untuk mencapai kualitas campuran yang optimal, diperlukan keseimbangan yang tepat antara nilai *flow* dan stabilitas. Nilai *flow* diperoleh saat sampel benda uji ditekan menggunakan alat uji Marshall. Selama proses ini, nilai *flow* dapat langsung diamati melalui dial pengukuran yang terdapat pada alat uji *Marshall*.

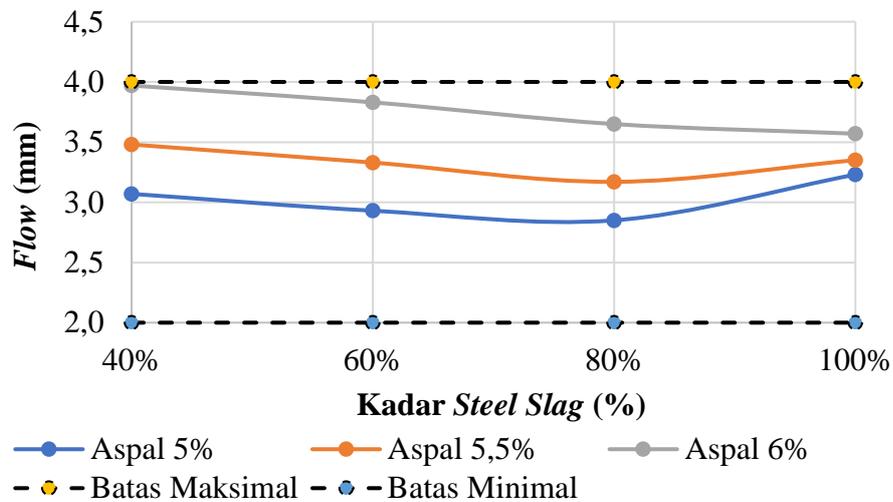


**Gambar 4.11** Alat Uji *Marshall*



**Gambar 4.12** Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Flow*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai *flow*. Pada grafik, terlihat bahwa seiring dengan peningkatan kadar aspal, nilai *flow* juga meningkat. Nilai *flow* menunjukkan kemampuan campuran untuk mengalir, yang merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kerja campuran aspal. Kenaikan kadar aspal menyebabkan campuran menjadi lebih plastis dan memungkinkan aliran yang lebih mudah, sehingga nilai *flow* meningkat. Hal tersebut terjadi karena aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dalam campuran, memberikan fleksibilitas dan kemampuan deformasi pada campuran. Terdapat batas minimal dan maksimal yang harus diperhatikan untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas campuran. Nilai *flow* yang terlalu tinggi atau terlalu rendah bisa mempengaruhi performa jalan aspal, seperti daya tahan terhadap deformasi plastis atau kerusakan akibat beban berlebih. Kadar aspal yang lebih tinggi memberikan pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan kemampuan aliran dalam campuran perkerasan jalan.



**Gambar 4.13** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap *Flow*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai *flow* pada tiga kadar aspal yang berbeda: 5%, 5,5%, dan 6%. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa nilai *flow* umumnya mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kadar *steel slag* hingga 80%, tetapi kemudian terjadi lonjakan pada kadar 100%. Penambahan *steel slag* dalam campuran seharusnya menyebabkan nilai *flow* semakin menurun karena *steel slag* memiliki tekstur yang kasar dan tidak beraturan. Tekstur tersebut meningkatkan kepadatan campuran dengan mengisi rongga yang ada, sehingga campuran menjadi lebih padat dan kaku, membuatnya lebih sulit untuk mengalami deformasi. Dalam literatur, dijelaskan bahwa semakin banyak *steel slag* yang ditambahkan, semakin padat campuran, yang secara langsung mengurangi kemampuan alir (*flow*). Oleh karena itu, nilai *flow* yang rendah umumnya menunjukkan bahwa campuran lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi. Namun, pada kadar *steel slag* 100%, terjadi peningkatan nilai *flow*, yang berarti campuran menjadi lebih mudah terdeformasi lagi. Hal

tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah bahwa pada kadar *slag* yang sangat tinggi, kemungkinan terbentuk *void* (rongga kecil) lebih banyak dalam campuran karena distribusi material yang tidak homogen. *Void* ini dapat mengurangi kepadatan campuran secara keseluruhan, sehingga meskipun *steel slag* pada dasarnya membuat campuran lebih kaku, pada kadar yang sangat tinggi seperti 100%, kelebihan *slag* justru bisa mengurangi kontak antar partikel dan mengurangi kepadatan efektif. Hal ini menyebabkan campuran memiliki lebih banyak ruang untuk bergerak, yang meningkatkan nilai *flow* dan membuatnya lebih mudah terdeformasi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa ada titik optimal dalam penambahan *steel slag*, seperti pada 80%, di mana kepadatan, kekakuan, dan fleksibilitas campuran tercapai dalam keseimbangan yang ideal. Pada kadar 100%, kelebihan *slag* malah menciptakan struktur yang lebih longgar, menyebabkan peningkatan *flow*.

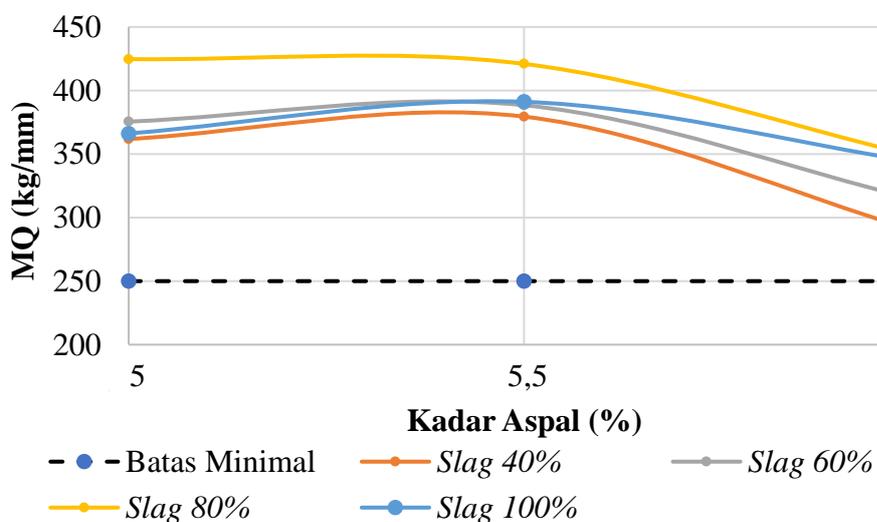
Nilai *flow* pada campuran perkerasan dipengaruhi secara signifikan oleh komposisi kimia dalam *steel slag*, terutama kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CaO}$ . Struktur kristal  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang sangat keras memberikan resistensi tinggi terhadap perubahan bentuk. Sifat ini membuat material membutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk mengalami deformasi plastis [29]  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  juga memberikan kekakuan tambahan pada campuran, yang berkontribusi pada pengurangan nilai *flow*. Sementara itu,  $\text{CaO}$  melalui proses penyemenannya menghasilkan ikatan yang kuat antar partikel, sehingga membantu mengontrol deformasi.  $\text{CaO}$  bereaksi membentuk ikatan yang sangat kuat

antara partikel-partikel dalam campuran. Proses penyemenan ini menciptakan matriks yang lebih padat dan kohesif. Ikatan yang terbentuk membantu dalam menahan pergerakan plastis di dalam campuran [30]. Kombinasi kedua sifat ini mengakibatkan nilai *flow* yang cenderung menurun, mengindikasikan campuran yang lebih tahan terhadap deformasi permanen namun memiliki fleksibilitas yang lebih rendah.

#### 4.2.6 Hasil Analisa *Marshall quotient* (MQ)

Nilai *Marshall quotient* (MQ) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelahan (*flow*) dan merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan fleksibilitas campuran. Semakin besar nilai *Marshall quotient* (MQ) berarti campuran semakin kaku dan sebaliknya semakin kecil *Marshall quotient* (MQ) maka perkerasannya semakin lentur. Rumus perhitungan *Marshall quotient*:

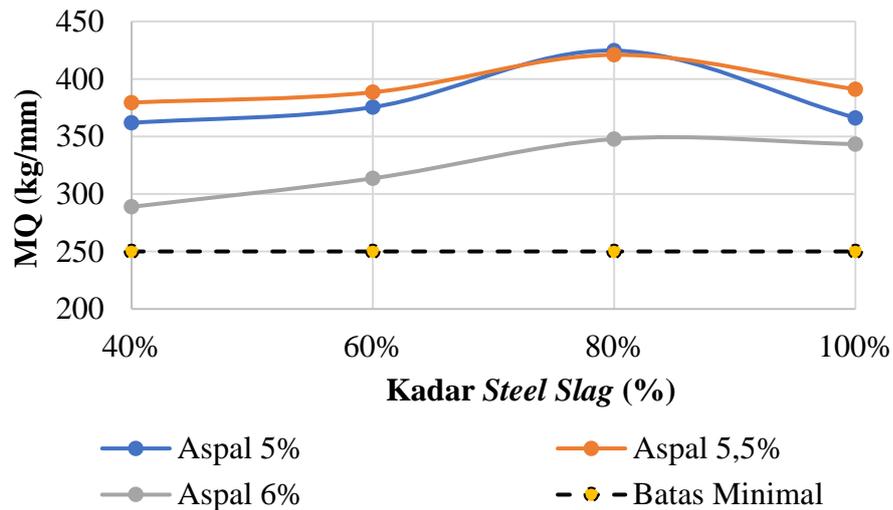
$$\text{Marshall Quotient} = \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}} \dots\dots\dots(4.8)$$



Gambar 4.14 Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Marshall quotient*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap Marshall quotient (MQ) pada campuran perkerasan jalan. MQ adalah indikator kekakuan campuran aspal yang diperoleh dari rasio stabilitas Marshall terhadap kelelahan (*flow*). Dari grafik, terlihat bahwa nilai MQ meningkat dari kadar aspal 5,0% ke 5,5% menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Namun, penurunan berubah pada kadar aspal 6,0% di mana nilai MQ mengalami penurunan signifikan untuk semua campuran. Penurunan ini dapat dijelaskan karena kadar aspal yang terlalu tinggi cenderung membuat campuran menjadi lebih plastis dan kurang kaku. Ketika kadar aspal melampaui titik optimal, aspal berlebih dapat berfungsi sebagai pelumas antar agregat, mengurangi gesekan internal dan kohesi campuran, sehingga menurunkan kekakuan dan stabilitas. Kadar aspal 5,5% tampak menjadi titik optimal karena memberikan nilai MQ tertinggi untuk semua variasi *slag*. Pada kadar ini, aspal cukup untuk mengikat agregat dengan baik tanpa mengurangi kekakuan campuran. Aspal optimal di 5,5% membuat keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas, menghasilkan campuran yang tahan terhadap deformasi permanen namun tidak terlalu kaku hingga rentan terhadap retak. Semua campuran berada di atas batas minimal MQ yang ditetapkan, menunjukkan bahwa penggunaan *steel slag* dalam berbagai persentase dapat menghasilkan campuran yang memenuhi standar kekakuan yang diperlukan. Namun, perlu dipertimbangkan bahwa campuran yang terlalu kaku (nilai MQ terlalu tinggi) mungkin rentan terhadap retak, sementara yang terlalu lunak berisiko mengalami deformasi. Oleh karena itu,

pemilihan kadar aspal dan persentase *slag* optimal harus mempertimbangkan keseimbangan antara ketahanan terhadap deformasi dan fleksibilitas untuk mencegah retak.



**Gambar 4.15** Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap *Marshall Quotient*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap *Marshall Quotient* (MQ) pada campuran perkerasan jalan. MQ adalah indikator kekakuan campuran aspal yang diperoleh dari rasio stabilitas Marshall terhadap kelelahan (*flow*), menunjukkan gambaran tentang ketahanan campuran terhadap deformasi permanen. Terlihat bahwa nilai MQ cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar *steel slag* dari 40% hingga 80% untuk semua variasi kadar aspal. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan *steel slag* secara umum meningkatkan kekakuan campuran. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa penggunaan *steel slag* cenderung meningkatkan nilai Marshall Quotient (MQ) [6]. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fisik *steel slag* yang umumnya lebih keras, lebih angular, dan

memiliki tekstur permukaan yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat alam. Sifat-sifat ini membuat peningkatan gesekan internal dan *interlocking* antar partikel dalam campuran, yang menyebabkan meningkatnya stabilitas dan kekakuan campuran. Ketika kadar *steel slag* mencapai 100%, beberapa faktor mulai berperan yang dapat mengurangi efektivitas campuran. Pertama, densitas yang sangat tinggi dari campuran 100% *steel slag* dapat meningkatkan fleksibilitas yang diperlukan untuk ketahanan terhadap retak. Bentuk angular *steel slag* yang seragam juga dapat menciptakan lebih banyak ruang kosong ketika digunakan 100%, dibandingkan dengan campuran yang memiliki variasi bentuk partikel.

Kadar *steel slag* 80% muncul sebagai titik optimal karena memberikan nilai MQ tertinggi untuk semua variasi kadar aspal. Pada kadar ini, campuran mencapai keseimbangan optimal antara kekakuan yang diberikan oleh *steel slag*. Campuran dengan 80% *steel slag* tampaknya mampu memaksimalkan manfaat dari karakteristik *steel slag* seperti kekerasan, namun tetap mempertahankan workabilitas yang baik dari campuran keseluruhan. Semua campuran termasuk yang menggunakan 100% *steel slag*, masih berada di atas batas minimal MQ yang ditetapkan. Hal tersebut menjelaskan bahwa penggunaan *steel slag* dalam berbagai persentase dapat menghasilkan campuran yang memenuhi standar kekakuan yang diperlukan untuk perkerasan jalan. Namun, pemilihan kadar *steel slag* optimal harus mempertimbangkan tidak hanya nilai MQ, tetapi juga faktor-faktor lain seperti *workabilitas* campuran dan pertimbangan ekonomi dan lingkungan.

Kandungan kimia *steel slag*, terutama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , dan  $\text{SiO}_2$  juga terbukti berkontribusi dalam meningkatkan nilai *Marshall Quotient* pada campuran aspal.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atau Besi Oksida membentuk ikatan molekul yang kuat sehingga material menjadi lebih tahan terhadap perubahan bentuk, yang berarti meningkatkan ketahanan campuran aspal secara keseluruhan.  $\text{CaO}$  atau Kalsium Oksida memiliki dua peran penting yaitu memperkuat sifat semen yang menambah stabilitas campuran dan mengatur *flow* dengan memperbaiki daya ikat antar material.  $\text{SiO}_2$  atau Silika membantu material tetap stabil pada suhu tinggi dan menyeimbangkan antara kekuatan rekat dengan ketahanan terhadap perubahan bentuk. Kombinasi ketiga senyawa dalam *steel slag* ini saling memberikan pengaruh,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  meningkatkan kekuatan,  $\text{CaO}$  menambah stabilitas, dan  $\text{SiO}_2$  memberi ketahanan suhu, sehingga menghasilkan nilai *Marshall Quotient* yang baik untuk konstruksi jalan yang awet dan bermutu.