

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH STEEL SLAG SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR UKURAN $\frac{1}{2}$ " DAN $\frac{3}{8}$ " PADA CAMPURAN HOT ROLLED SHEET WEARING COURSE (HRS-WC)

UTILIZATION OF STEEL SLAG WASTE AS A COARSE AGGREGATE $\frac{1}{2}$ " AND $\frac{3}{8}$ " ON
HOT ROLLED SHEET WEARING COURSE (HRS-WC)

Anita Rahmawati

Email : anita_ygy@yahoo.com

Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak — *Hot Rolled Sheet* (HRS) merupakan campuran aspal yang menggunakan gradasi senjang dengan kandungan agregat kasar, agregat halus dan memiliki kandungan aspal yang tinggi sehingga dibutuhkan mutu campuran beraspal yang baik untuk menghasilkan perkerasan jalan yang baik. Pada penelitian ini digunakan limbah industri yaitu *steel slag* sebagai pengganti agregat kasar No. $\frac{1}{2}$ " dan $\frac{3}{8}$ " pada campuran HRS. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan *steel slag* dalam campuran HRS terhadap karakteristik Marshall. Metode penelitian berupa pengujian di laboratorium dengan tahapan sebagai berikut, persiapan alat dan bahan, pengujian bahan perencanaan campuran, pembuatan benda uji, pengujian karakteristik marshall yang meliputi stabilitas, kelelahan (*flow*), *Void in the Mix* (VIM), *Void in mineral aggregate* (VMA), *Void filled with asphalt* (VFA) dan *Marshall Quotient* (MQ), analisis perhitungan dan terakhir pembahasan dan kesimpulan. Penelitian ini menggunakan kadar aspal optimum sebesar 7%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kadar *steel slag* dengan persentase sebesar 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari berat agregat no. $\frac{3}{8}$ " memberikan hasil yang lebih baik bila dibandingkan dengan penambahan kadar *steel slag* dengan ukuran $\frac{1}{2}$ " ditinjau dari karakteristik Marshall yang meliputi nilai stabilitas, *flow*, VIM, VMA, VFA, dan MQ.

Kata kunci — HRS, karakteristik Marshall, *steel slag*.

Abstract — *Hot Rolled Sheet* is an asphalt mixture which has gap gradation of coarse aggregate, fine aggregate and has a high content of bitumen to produce a good pavement. In this research, steel slag waste was used to replace coarse aggregate with size No. $\frac{1}{2}$ " and $\frac{3}{8}$ " on HRS mixture. The aim of this study to determine the effect of utilizing steel slag as an aggregate in HRS mixture using Marshall design parameters. The method will be used consists of preparation of equipment and materials, testing of materials, design of specimens, Marshall testing, analysis and calculation, discussion and conclusions. This study use bitumen optimum 7%. The results showed that the addition of steel slag with a percentage of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of the aggregate size no. $\frac{3}{8}$ " gives better results when compared with the addition of steel slag with the size of $\frac{1}{2}$ " in terms of Marshall characteristics that includes the value of stability, flow, VIM, VMA, VFA, and MQ.

Keywords — HRS, Marshall characteristic, steel slag.

I. PENDAHULUAN

Lapis tipis aspal beton (Lataston) atau yang sering di sebut HRS merupakan campuran aspal yang menggunakan gradasi senjang dengan kandungan agregat kasar, agregat halus dan memiliki kandungan aspal yang tinggi sehingga dibutuhkan mutu campuran beraspal yang baik untuk menghasilkan jalan dengan kelenturan dan keawetan yang baik [1]. Untuk meningkatkan kualitas

perkerasan jalan tentu saja dibutuhkan material perkerasan yang memenuhi spesifikasi. Dalam hal penyediaan bahan material yang memenuhi persyaratan inilah yang sering muncul permasalahan dimana saat ini ditemukan kondisi semakin sedikitnya pengadaan material alami yang dimaksud.

Slag merupakan limbah yang diperoleh dari proses pengolahan baja pada proses tanur tinggi. Indonesia merupakan negara yang berkembang

dalam industri baja, pada tahun 2010 Indonesia menghasilkan limbah *slag* yang cukup tinggi sekitar 800 ribu ton/tahun [2].

Sesuai dengan [3], pengertian limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Pengelolaan limbah B3 adalah rangkaian kegiatan yang mencakup reduksi, penyimpanan, pengumpulan, pengangkutan, pemanfaatan, pengolahan dan penimbunan B3. Pengolahan ini bertujuan untuk mencegah dan menanggulangi pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang diakibatkan oleh limbah B3 serta melakukan pemulihan kualitas lingkungan yang telah tercemar [4][5]. Apabila masih dihasilkan limbah B3, maka diupayakan pemantauan limbah B3 untuk mengurangi jumlah limbah B3 dan meminimalkan beban pengolahan. Pemantauan limbah B3 mencakup perolehan kembali (*recovery*), penggunaan kembali (*reuse*), dan daur ulang (*recycle*). Timbulan limbah B3 yang sudah tidak dapat diolah atau dimanfaatkan yang harus ditimbun pada lokasi penimbunan (*landfill*) yang memenuhi syarat-syarat yang sudah ditetapkan. Berawal dari beberapa masalah di atas maka perlu dilakukan penelitian tentang penggunaan *steel slag* sebagai bahan pengganti agregat terhadap karakteristik campuran beraspal.

II. LANDASAN TEORI

A. Hot Rolled Sheet (HRS)

Campuran ini terdiri dari agregat bergradasi timpang, *filler* dan aspal keras dengan perbandingan tertentu, yang dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas. Tebal padat 2,5 cm atau 3,0 cm [6]. Pembuatan HRS bertujuan untuk mendapatkan suatu lapisan permukaan atau lapisan antar pada perkerasan jalan raya yang mampu memberikan sumbangan daya dukung serta berfungsi sebagai lapisan kedap air yang dapat melindungi konstruksi bawahnya. HRS bersifat lentur dan mempunyai durabilitas yang tinggi, hal ini disebabkan campuran HRS dengan gradasi timpang mempunyai rongga dalam campuran yang cukup besar, sehingga mampu menyerap jumlah aspal dalam jumlah banyak (7-8 %) tanpa terjadi *bleeding*. Selain itu, HRS mudah dipadatkan sehingga lapisan yang dihasilkan mempunyai kedekatan terhadap air dan udara tinggi.

B. Steel Slag

Steel slag adalah batuan kasar berbentuk kubikal tidak teratur. Batuan ini terbentuk dari mineral-

mineral yang digunakan sebagai pemurnian baja dari dapur tinggi. Batuan *steel slag* mempunyai kekerasan yang tinggi dan digabung dengan permukaan yang kasar menyebabkan batuan ini menguntungkan bila dipergunakan sebagai tempat parkir [7]. Berdasarkan [8], agregat *steel slag* memenuhi persyaratan agregat standar dimana berat jenis *steel slag* lebih tinggi dari pada agregat standar, sehingga menyebabkan volume pekerjaan lebih kecil dari pada standar, untuk itu dilakukan upaya pencampuran sebagian agregat *steel slag* dengan bahan lainnya. Pencampuran ini akan menurunkan berat jenis campuran, sehingga volume pekerjaan akan tercapai, dan kekuatan campuran perkerasan lebih baik.

Campuran beraspal bisa seluruhnya terdiri dari agregat *slag* (100%) dari padat sampai halus sehingga nilai kepadatannya menjadi tinggi, tetapi hal ini akan menjadi kendala di lapangan karena dengan tonase yang sama volumenya akan menjadi lebih kecil [9].

Pemrosesan *slag* adalah proses pelaburan baja yang mengakibatkan terbentuknya *slag* dibagian atas, kemudian *slag* dialirkan dan ditampung dalam *slag* pot pada kondisi cair. Dalam waktu 5 menit *slag* membeku. Agar terbentuk serpihan, *slag* yang terhampar disemprot dengan air. Perubahan suhu yang mendadak membuat *slag* pecah, kemudian *slag* yang berbentuk serpihan dimasukkan ke dalam *processing plant* agar menjadi granular [7].

III. METODE PENELITIAN

Pelaksanaan pengujian dilakukan secara bertahap, yaitu pemeriksaan bahan seperti agregat maupun aspal, penentuan gradasi campuran, serta dilanjutkan dengan pengujian *Marshall*.

A. Tahap Persiapan

Hal pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah studi literatur atau studi pustaka yang bertujuan untuk mendapatkan referensi-referensi yang berguna sebagai dasar dalam penelitian ini. Selanjutnya persiapan bahan dan alat, bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain agregat kasar, agregat halus, aspal dan *steel slag*. Agregat kasar dan halus didapatkan dari Clereng, Kulonprogo Yogyakarta, sedangkan untuk *steel slag* didapatkan dari pabrik baja PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk, sedangkan aspal yang digunakan adalah Aspal pen 60/70. Alat-alat yang digunakan untuk pengujian agregat kasar, agregat halus, aspal dan *steel slag*, serta benda uji *Marshall* harus dalam

kondisi bersih, baik dan terkalibrasi. Gambar-1, Gambar-2, dan Gambar-3 menunjukkan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar-1. Aspal pen 60/70.



Gambar-2. Agregat.



Gambar-3. Steel Slag.

B. Pengujian Bahan

Karena jalannya penelitian tersebut berada di laboratorium, maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini sebagian besar adalah pekerjaan laboratorium. bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terlebih dahulu dilakukan pengujian sesuai dengan metode pengujian yang digunakan.

Adapun untuk pengujian *steel slag*, meliputi abrasi dengan mesin Los Angeles, berat jenis, dan kelekatan aspal. Sedangkan untuk aspal pengujian yang dilakukan meliputi pengujian penetrasi, daktilitas, titik lembek, titik nyala, titik bakar dan kehilangan berat minyak.

C. Perencanaan Campuran

Pada perencanaan campuran terlebih dahulu kita menentukan kadar aspal optimum dengan menggunakan material tanpa campuran *steel slag*. Kadar aspal yang digunakan adalah 6%, 6,5%, 7%, 7,5% dan 8% dari total campuran agregat. Jumlah sampel yang dibuat untuk mendapatkan kadar aspal optimum (KAO) sebanyak 10 sampel (duplo untuk tiap variasi kadar aspal). Dari pengujian campuran diatas kita akan mendapatkan kadar aspal optimum (KAO), KAO inilah yang akan kita gunakan untuk mendesign benda uji dengan aggregate *steel slag*.

D. Pembuatan Benda Uji

Pada tahapan ini, agregat ditimbang sesuai dengan perencanaan gradasi campuran HRS-WC setiap nomor saringan atau fraksinya. Misalnya jumlah agregat yang tertahan saringan No. $\frac{1}{2}$ " sebanyak 60 gram dari total berat agregat (1200 gram) yang akan diganti dengan *steel slag* sebanyak 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari berat total agregat No.1/2. Sedangkan untuk jumlah agregat yang tertahan saringan no $\frac{3}{8}$ " sebanyak 180 gram. Hal ini sesuai dengan persentase jumlah agregat dengan ukuran setiap nomer saringan yang dibutuhkan untuk membentuk campuran HRS.

Setelah dilakukan penimbangan, lalu agregat dipanaskan hingga suhu 160°C , lalu dilakukan pencampuran dengan aspal panas sampai suhu mencapai 170°C sesuai dengan KAO yang telah di dapatkan. Kemudian campuran tersebut dimasukkan ke dalam cetakan untuk ditumbuk sebanyak 2×75 kali. Suhu pada saat pemadatan tidak boleh kurang dari 160°C . Benda uji dibuat sebanyak dua (2) buah atau duplo untuk setiap persentase *steel slag* yang digunakan. Jadi banyaknya benda uji untuk pengujian dengan *steel slag* ukuran $\frac{1}{2}$ " dan $\frac{3}{8}$ " adalah 20 benda uji.

E. Pengujian Benda Uji

Prinsip dasar dari metode *Marshall* adalah pemeriksaan stabilitas dan kelelahan (*flow*), serta analisis kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk. Pengujian *Marshall* untuk mendapatkan stabilitas dan kelelahan (*flow*) mengikuti prosedur SNI 06-2489-1991. Dari hasil

gambar hubungan antara kadar aspal dan parameter *Marshall*, maka akan diketahui kadar aspal optimumnya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Agregat

Hasil pengujian sifat-sifat fisik agregat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Tabel-1. Pada Tabel-1 dapat dilihat bahwa agregat yang digunakan pada penelitian ini sudah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh SNI 03-1969-1990 dan SNI 03-2417-1991, sehingga agregat tersebut dapat digunakan pada penelitian ini.

Tabel-1. Hasil pengujian agregat kasar dan halus.

No	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi Pengujian	
				Min	Maks
Agregat Kasar					
1	Berat Jenis <i>Bulk</i>	-	2,5	-	-
2	Berat jenis <i>Apparent</i>	-	2,67	2,5	-
3	Penyerapan	%	2,48	-	3
Agregat Halus					
1	Berat Jenis <i>Bulk</i>	-	2,52	-	-
2	Berat jenis <i>Apparent</i>	-	2,72	2,5	-
3	Penyerapan	%	3,00	-	3

B. Hasil Pengujian Aspal

Jenis aspal yang digunakan dalam penelitian ini ialah aspal dengan penetrasi 60/70 murni. Sebelum melakukan penelitian terhadap campuran dengan menggunakan *steel slag*, maka aspal yang digunakan perlu dilakukan pengujian guna mengetahui kelayakan aspal tersebut. Spesifikasi [6] yang telah ditetapkan dapat dilihat dalam Tabel-2. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel-2, menunjukkan bahwa aspal yang akan digunakan telah memenuhi persyaratan yang ada sehingga layak untuk digunakan.

Tabel-2. Hasil pengujian aspal keras AC 60/70 berdasarkan [6].

No	Jenis Pengujian	Hasil	Persyaratan
1	Penetrasi, 25°C,	67,2	60– 70
2	Titik lembek; °C	52,5	≥48
3	Titik Nyala; °C	320	≥232
4	Berat jenis	1,04	Min. 1,0
5	Kehilangan berat minyak	0,145	Max 1

C. Hasil Pengujian *Steel Slag*

Pemeriksaan terhadap sifat-sifat fisik *steel slag* ditunjukkan dalam Tabel-3. Dari hasil pengujian *steel slag* secara langsung didapat hasil yang memenuhi standar sebagai pengganti agregat dalam campuran perkerasan sesuai SNI 04-2005.

Tabel-3. Hasil pengujian *steel slag*.

No	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Satuan
1	Berat Jenis <i>Bulk</i>	-	2,90	-
2	Berat jenis <i>Apparent</i>	-	3,05	-
3	Abrasi Los Angles	40	20,45	%
4	Penyerapan	Mak. 3	1,675	%

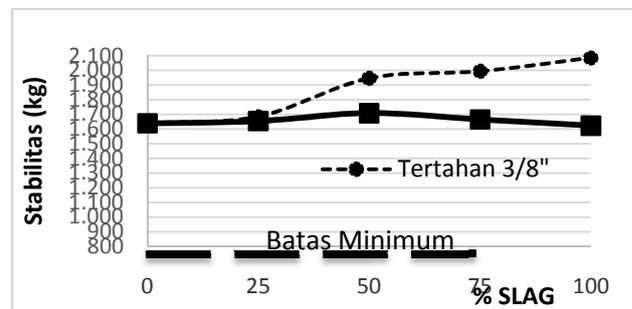
D. Hasil Pengujian Marshall

1) Stabilitas

Nilai stabilitas digunakan sebagai parameter untuk menggambarkan ketahanan terhadap kelelahan plastis dari suatu campuran aspal atau kemampuan campuran untuk menahan deformasi yang terjadi akibat beban lalu lintas seperti ditunjukkan pada gambar 4.

Tabel-4. Nilai stabilitas untuk masing-masing variasi kadar *steel slag*.

Kadar Aspal 7%	Nilai Stabilitas (Kg) Berdasarkan Variasi Kadar <i>Steel Slag</i>				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan ½"	1639	1654	1707	1665	1623
Tertahan ¾"	1639	1685	1945	1993	2085



Gambar-4. Hubungan antara stabilitas dan variasi campuran *steel slag*.

Penggunaan *steel slag* sebagai bahan campuran pada aspal mempunyai kecenderungan mengalami peningkatan. Pada Tabel-4 diperlihatkan nilai stabilitas tertinggi terjadi pada campuran *steel slag* 50% sebesar 1707 kg untuk campuran *steel slag* tertahan No. ½" dan untuk nilai stabilitas tertinggi campuran *steel slag* tertahan no. ¾" terjadi pada campuran 100%, yaitu sebesar 2085 kg. Gambar-2 menunjukkan bahwa campuran dengan *steel slag* tertahan no. ¾" mempunyai nilai stabilitas yang lebih tinggi daripada campuran dengan *steel slag* tertahan no. ½", hal ini dikarenakan jumlah total agregat yang diganti lebih banyak yang berukuran ¾" daripada yang berukuran ½" sehingga hal ini mengakibatkan nilai stabilitas meningkat untuk tiap

persentase *steel slag* yang digunakan. Selain itu dengan penambahan kadar *steel slag* dalam campuran sangat berpengaruh terhadap nilai stabilitas. Kenaikan nilai stabilitas ini dikarenakan sifat fisis *steel slag* yang berongga dan berbentuk tidak beraturan sehingga memungkinkan terjadinya ikatan yang lebih kuat diantara agregat, dimana dalam campuran yang digunakan lebih banyak agregat halus sehingga nantinya akan masuk dalam rongga tersebut. Kenaikan nilai tersebut akan mengakibatkan campuran yang memiliki kadar *steel slag* yang lebih tinggi akan lebih mampu menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya, tanpa mengalami perubahan bentuk.

Berdasarkan [6] ketentuan sifat-sifat campuran Laston modifikasi nilai stabilitas minimum ialah 800 kg, sehingga semua campuran yang menggunakan penambahan *steel slag* ini memenuhi persyaratan.

2) Kelelahan

Kelelahan menunjukkan deformasi benda uji akibat pembebanan. Nilai kelelahan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain gradasi, kadar aspal, bentuk dan permukaan agregat. Nilai ini langsung dapat dibaca dari pembacaan arloji kelelahan (*flow*) saat pengujian *Marshall*. Nilai *flow* pada arloji dalam satuan *inch*, maka harus dikonversikan dalam satuan milimeter. Hasil kelelahan ditunjukkan dalam Tabel-5 dan Gambar-5.

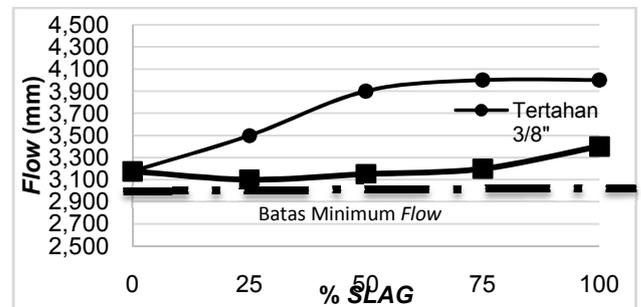
Tabel-5. Nilai kelelahan untuk masing-masing variasi kadar *steel slag*.

Kadar Aspal 7%	Nilai Kelelahan Berdasarkan Variasi Kadar <i>Steel Slag</i> (mm)				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan 1/2"	3,18	3,10	3,15	3,20	3,40
Tertahan 3/8"	3,17	3,50	3,90	4,00	4,00

Dari Gambar-5 dapat dilihat bahwa semua campuran HRS-WC untuk berbagai komposisi kadar *steel slag* memenuhi syarat minimum *flow* (≥ 3 mm). Nilai kelelahan tertinggi terjadi pada campuran HRS-WC menggunakan 100% *steel slag* sebagai pengganti agregat no. 1/2" dan no. 3/8", yakni sebesar 3,40 mm dan 4 mm.

Penggunaan *steel slag* dalam campuran HRS_WC cenderung mengalami kenaikan, hal ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai *flow* disebabkan oleh tingginya kadar aspal yang digunakan dan jenis perkerasan HRS-WC yang terdiri dari campuran agregat bergradasi timpang, *filler* dan aspal keras dengan perbandingan tertentu. Suatu campuran dengan nilai *flow* tinggi akan cenderung lembek, sehingga mudah

berubah bentuk jika menerima beban. Sebaliknya jika *flow* rendah maka campuran menjadi kaku dan mudah retak jika menerima beban melampaui daya dukungnya.



Gambar-5. Hubungan antara kelebihan (*flow*) dan variasi campuran *steel slag*.

3) Void In The Mix (VIM)

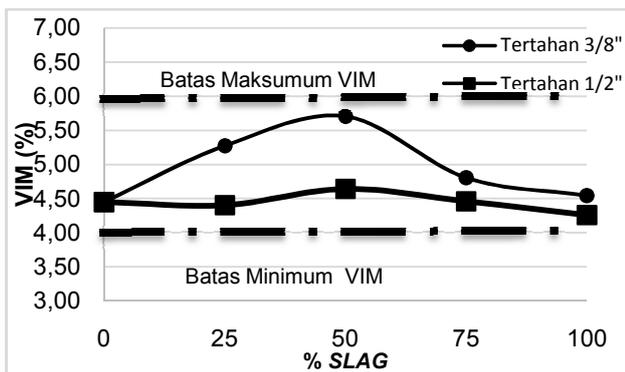
Nilai VIM menunjukkan nilai persentase rongga dalam suatu campuran aspal. Nilai VIM berpengaruh terhadap nilai dari durabilitas, semakin besar nilai VIM menunjukkan campuran bersifat keropos (*porous*). Proses ini mengakibatkan udara dan air mudah masuk ke dalam lapis perkerasan sehingga berakibat meningkatkan proses oksidasi yang dapat mempercepat penuaan aspal. Spesifikasi dari VIM berkisar antara 4%-6%. Hasil nilai VIM ditunjukkan pada Tabel-6 dan Gambar-6.

Tabel-6. Nilai VIM untuk masing-masing variasi kadar *steel slag*.

Kadar Aspal 7 %	Nilai VIM (%) Berdasarkan Variasi Kadar <i>Steel Slag</i>				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan 1/2"	4,45	4,40	4,64	4,46	4,26
Tertahan 3/8"	4,45	5,27	5,70	4,80	4,54

VIM atau rongga dalam campuran adalah parameter yang biasanya berkaitan dengan durabilitas dan kekuatan dari campuran. Semakin kecil nilai VIM, maka campuran akan bersifat lebih kedap air, namun nilai VIM yang terlalu kecil dapat mengakibatkan keluarnya aspal ke permukaan atau *bleeding*.

Dari grafik Gambar-4 dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan *steel slag* terhadap campuran HRS cenderung mengalami fluktuasi. Pada campuran 0% hingga campuran dengan penambahan *steel slag* pada kadar 50% nilai VIM terus meningkat, namun dari 50% kadar *steel slag* hingga ke kadar *steel slag* 100% nilai VIM yang didapatkan terus menurun sampai mendekati nilai VIM pada campuran normal.



Gambar-6. Hubungan antara VIM dan variasi campuran steel slag.

Kenaikan nilai VIM tersebut kemungkinan dikarenakan karakteristik dari steel slag nya sendiri yang bersifat porous sehingga membuat volume rongga dalam campuran lebih banyak. Jadi semakin banyaknya jumlah nilai steel slag yang digantikan akan semakin banyak rongga dalam campuran seperti agregat yang tertahan 3/8" akan lebih tinggi nilai VIM nya bila dibandingkan dengan agregat yang tertahan 1/2" hal ini karena berat agregat yang digantikan lebih besar agregat yang tertahan saringan no 3/8".

Nilai VIM tertinggi terjadi pada campuran dengan kadar steel slag 50% dan terendah pada kadar steel slag 0%. Dari perhitungan di atas, semakin bertambahnya kadar steel slag yang digunakan semakin tinggi nilai VIM yang diperoleh hingga kadar steel slag optimum. Maka kadar steel slag optimum yang didapat dari nilai VIM ialah pada kadar 50%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat yang terdapat dalam campuran kurang terselimuti aspal dengan baik, sehingga mengakibatkan jumlah rongga udara dalam campuran tersebut masih tergolong besar.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 (Revisi 3), 2014 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Lataston nilai VIM minimal sebesar 4% dan maksimal sebesar 6%, maka semua campuran yang digunakan telah memenuhi standart spesifikasi.

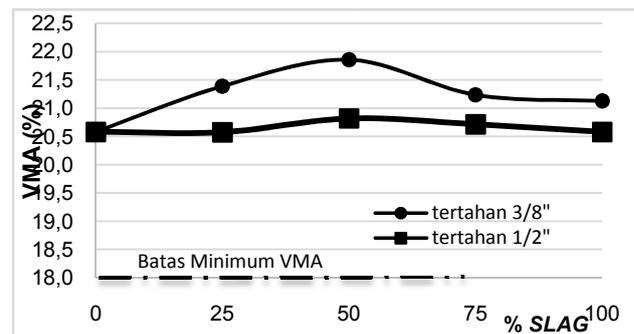
4) Void In Mineral Aggregate (VMA)

VMA adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran beraspal yang telah dipadatkan. VMA atau yang lebih dikenal dengan rongga dalam agregat merupakan salah satu parameter penting dalam rancangan campuran aspal, karena pengaruhnya terhadap ketahanan dari campuran aspal. VMA menunjukkan banyaknya % aspal dari rongga yang terisi aspal. Nilai hasil

pengujian VMA ditunjukkan pada Tabel-7 dan Gambar-7.

Tabel-7. Nilai VMA untuk masing-masing campuran.

Kadar Aspal 7%	Nilai VMA (%) Berdasarkan Variasi Kadar Steel Slag				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan 1/2"	20,58	20,57	20,82	20,71	20,58
Tertahan 3/8"	20,58	21,35	21,85	21,23	21,13



Gambar-7. Hubungan antara VMA dan variasi steel slag.

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan steel slag terhadap campuran HRS cenderung mengalami fluktuasi. Pada campuran 0% hingga campuran dengan penambahan steel slag pada kadar 50% nilai VMA terus meningkat, namun dari kadar steel slag 50% hingga ke kadar steel slag 100% nilai VMA yang didapatkan terus menurun sampai mendekati nilai VMA pada campuran normal. Sama halnya seperti VIM nilai VMA juga dipengaruhi oleh sifat fisis bahan steel slag yang porous sehingga menambah jumlah volume rongga yang ada diantara partikel agregat dalam campuran ini sendiri.

Nilai VMA tertinggi terjadi pada campuran dengan kadar steel slag 50% dan terendah pada kadar steel slag 0%. Dari perhitungan di atas, semakin bertambahnya kadar steel slag yang digunakan semakin tinggi nilai VMA yang diperoleh hingga kadar steel slag optimum. Maka kadar steel slag optimum yang didapat dari nilai VMA ialah pada kadar 50%. Bertambahnya nilai VMA ini menunjukkan bahwa bertambahnya kadar steel slag memberikan pengaruh terhadap berat isi campuran yang nilainya cenderung menurun dan mengakibatkan kenaikan nilai VMA, begitu juga sebaliknya.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 (Revisi 3), 2014 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Lataston/HRS nilai VMA minimal sebesar 18%, maka semua campuran yang digunakan telah memenuhi standart spesifikasi.

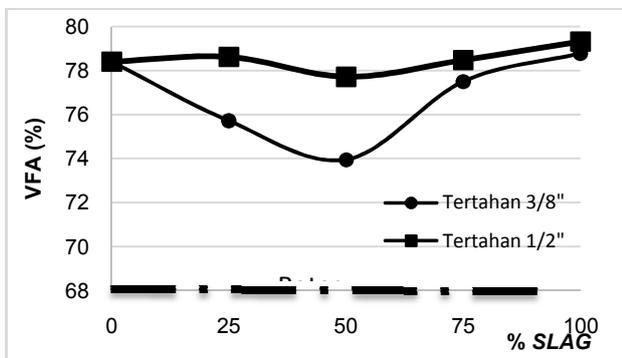
5) Void Filled with Asphalt (VFA)

Rongga dalam campuran terjadi akibat adanya ruang sisa antar butiran penyusun campuran. Rongga ini dalam kondisi keringakan diisi oleh udara dan dalam kondisi basah akan diisi oleh air. Kriteria VFA bertujuan untuk menjaga keawetan campuran beraspal dengan memberi batasan yang cukup. Hasil nilai VFA dapat dilihat pada Tabel-8 dan Gambar-8.

Tabel-8. Nilai VFA untuk masing-masing campuran.

Kadar Aspal 7 %	Nilai VFA (%) Berdasarkan Variasi Kadar Steel Slag				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan 1/2"	78,40	78,62	77,71	78,47	79,31
Tertahan 3/8"	78,40	75,72	73,95	77,51	78,78

Dari grafik di bawah ini dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan *steel slag* terhadap campuran Lataston cenderung mengalami fluktuasi. Pada campuran 0% hingga campuran dengan penambahan *steel slag* pada kadar 50% nilai VFA terus menurun, namun dari kadar *steel slag* hingga ke kadar *steel slag* 100% nilai VFA yang didapatkan terus meningkat sampai melebihi nilai VFA pada campuran normal.



Gambar-8. Hubungan antara VFA dan variasi *steel slag*.

Nilai VFA tertinggi terjadi pada campuran dengan kadar *steel slag* 100% dan terendah pada kadar *steel slag* 50%. Dari perhitungan di atas, semakin bertambahnya kadar *steel slag* yang digunakan semakin rendah nilai VFA yang diperoleh hingga kadar *steel slag* tertentu, dan akan mengalami peningkatan setelahnya. Nilai VFA yang menurun dikarenakan rongga antara *steel slag* dan agregat yang terisi oleh partikel agregat yang lebih kecil, juga dikarenakan sifat *steel slag* yang cepat menyerap panas sehingga aspal dalam campuran suhunya menurun dan tidak maksimal mengisi rongga. Kenaikan nilai tersebut dapat diakibatkan karena proses penusukan pada saat sebelum pemadatan yang baik.

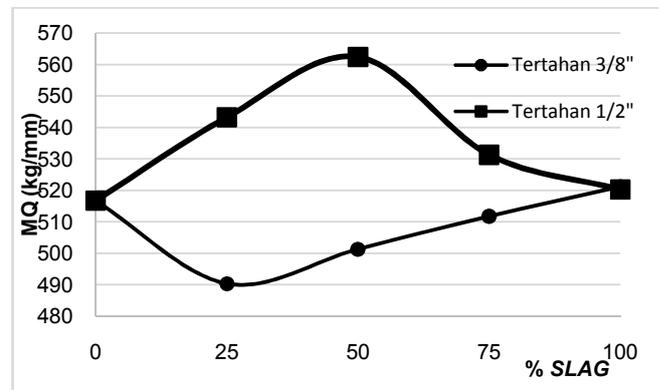
Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 (Revisi 3), 2014 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Lataston nilai VFA minimal sebesar 68%, maka semua campuran yang digunakan telah memenuhi standart spesifikasi.

6) Marshall Quotien (MQ)

MQ dihitung sebagai rasio dari stabilitas terhadap kelelahan yang digunakan sebagai indikator kekakuan campuran. Semakin tinggi nilai MQ suatu campuran, maka semakin kaku campuran tersebut. Semakin rendah nilai MQ suatu campuran, maka resiko yang memungkinkan adalah retak permukaan dan pergerakan horizontal pada arah perjalanan. Hasil untuk pengujian MQ tersebut dapat dilihat pada Tabel-9 dan Gambar-9.

Tabel-9. Nilai Marshall Quotient untuk masing-masing campuran.

Kadar Aspal 7 %	Nilai MQ (Kg/mm) Berdasarkan Variasi Kadar Steel slag				
	0%	25%	50%	75%	100%
Tertahan 1/2"	516,72	543,19	562,38	531,28	520,28
Tertahan 3/8"	516,72	490,41	501,34	511,71	521,23



Gambar-9. Hubungan antara MQ dan kadar campuran *steel slag*.

Pada grafik di atas menunjukkan bahwa semua campuran HRS-WC untuk berbagai variasi penggunaan *steel slag* memenuhi syarat yang ditetapkan untuk nilai MQ yaitu lebih dari 250 kg/mm. Nilai optimum yang didapat dari penelitian ini adalah pada kadar *steel slag* 50% terhadap berat agregat no. 1/2" sebesar 562,38 kg/mm dan pada kadar *steel slag* 100% terhadap agregat no. 3/8" yaitu sebesar 521,23 kg/mm.

Hasil bagi Marshall atau Marshall Quotient (MQ) adalah perbandingan antara nilai stabilitas dan nilai kelelahan (*flow*) yang juga merupakan indikator terhadap kekakuan campuran secara empiris. Tidak ada pembatas spesifikasi sampai dimana besar angka MQ, sehingga dapat dikatakan dengan bertambahnya

kadar *steel slag* ke dalam campuran HRS-WC, akan memperbaiki konstruksi tersebut dari segi MQ.

Penelitian [7] dengan variasi *steel slag* yang digunakan adalah 0%, 25%, 50% dan 75% terhadap semua ukuran agregat menghasilkan campuran beton aspal sebagai berikut: semakin tinggi kandungan *steel slag* sebagai agregat kasar dalam suatu campuran, akan semakin rendah workabilitasnya sedangkan nilai durabilitas akan naik dengan adanya penambahan kadar *steel slag*. Nilai workabilitas yang baik dihasilkan pada kadar *steel slag* 25% dan nilai durabilitas pada kadar *steel slag* 25% dengan kadar aspal optimum 5,575%.

V. KESIMPULAN

Adapun perbandingan nilai karakteristik *Marshall* campuran HRS-WC menggunakan *steel slag* sebanyak 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%, menghasilkan campuran dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Semakin banyak kadar *steel slag* yang digunakan dalam campuran perkerasan dapat meningkatkan nilai stabilitas. Meningkatnya nilai stabilitas campuran akan meningkatkan kemampuan campuran tersebut dalam memikul beban lalu lintas.
2. Semakin banyak kadar *steel slag* yang digunakan dalam campuran HRS dapat meningkatkan nilai kelelahan.
3. Semakin banyak kadar *steel slag* cenderung menaikkan nilai VMA dikarenakan sifat *steel slag* yang berongga (*porous*).
4. Penambahan kadar *steel slag* pada campuran HRS cenderung menurunkan nilai VFA.
5. Penggunaan kadar *steel slag* cenderung meningkatkan nilai MQ.
6. Dapat direkomendasikan bahwa dengan penambahan *steel slag* 50% dapat meningkatkan kemampuan konstruksi jalan dalam menerima beban, namun konstruksi tersebut masih fleksibel dan lentur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Lavin PG. *Asphalt Pavement*. London and New York: Spon Press. 2003.
- [2]. Leksminingsih. *Pengaruh Pemberian Bahan Tambah Katalis Bekas (Spent Catalyst) Dan Filler Slag Terhadap Campuran Beton Semen Untuk Perkerasan Jalan*. Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan. 2011
- [3]. Negara Republik Indonesia. PP No. 101 Tahun 2014. *Pengolahan Limbah Berbahaya dan Beracun*. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2014.
- [4]. Negara Republik Indonesia. PP No.18 Tahun 1999. *Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Limbah Beracun*. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2014.
- [5]. Negara Republik Indonesia. PP No.85 Tahun 1999. *Perubahan PP no. 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Limbah Beracun*. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia. 1999.
- [6]. Bina Marga. *Penyampaian Standar Dokumen Pengadaan dan Spesifikasi Umum 2010 (Revisi 3) untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Departemen Pekerjaan Umum. 2014.
- [7]. Hartati FYM. *Studi Pengaruh Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Aspal Beton Terhadap Workabilitas Dan Durabilitas*. Padang: Politeknik Negeri Padang. 2009.
- [8]. Pusat Litbang Prasarana Transportasi Badan Litbang Pekerjaan Umum. T-04-2005-B. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan*. Departemen Pekerjaan Umum. 2005.
- [9]. Gunawan G. *Pemanfaatan Slag Baja Untuk Teknologi Jalan Yang Ramah Lingkungan*. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum. 2011.