

Komparasi Karakteristik *Marshall* AC-BC dengan Penggunaan Limbah Ban Luar dan Limbah *Steel Slag* sebagai Pengganti Agregat Kasar

Marshall Characteristics Comparison of AC-BC Using Tire Waste and Steel Slag Waste as a Coarse Aggregate Substitution

Senja Rum Harnaeni^{1*}, Putri Rahayu Lestari², Rama Pratama Balich³, Gina Aulia⁴

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Pabelan, Surakarta, 57102, Indonesia

^{3,4}Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Pabelan, Surakarta, 57102, Indonesia

*email: srh289@ums.ac.id

ABSTRAK

DOI;
10.30595/jrst.v6i2.15355

Histori Artikel:

Diajukan:
22/10/2022

Diterima:
14/11/2022

Diterbitkan:
25/11/2022

Pesatnya pertumbuhan penduduk di Indonesia mengakibatkan meningkatnya jumlah pemakaian jalan dikarenakan semakin banyak orang melakukan perjalanan. Dalam rangka untuk mengurangi limbah yang ada disekitar maka digunakan *limbah steel slag* dan ban luar bekas kendaraan sebagai pengganti agregat kasar untuk campuran aspal panas pada perkerasan lentur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) dengan menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* sebagai pengganti agregat kasar. Metode pengujian diawali dengan pengujian karakteristik dan bahan campuran aspal, selanjutnya menentukan kadar aspal optimum campuran aspal AC-BC. Pengujian *Marshall* dilakukan dengan variasi limbah masing-masing 0%, 10%, 20%, 30% dan 40%. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh hasil bahwa campuran aspal AC-BC dengan menggunakan agregat pengganti limbah *steel slag* didapatkan nilai stabilitas tertinggi pada variasi limbah 20% yaitu 1900,43 kg; nilai flow dan nilai VFWA tertinggi pada variasi limbah 40% masing-masing adalah 3,50 mm, 78,40%; dan nilai MQ, nilai VMA, nilai VIM tertinggi pada campuran 10% *steel slag* yaitu sebesar 649,04 kg/mm, 16,25%, dan 4,48%. Untuk penggunaan limbah ban luar kendaraan didapatkan hasil nilai stabilitas, nilai MQ & nilai VFWA tertinggi pada campuran 10% ban luar kendaraan yaitu 1150,02 kg, 363,55 kg/mm & 70,57%, nilai Flow, nilai VMA, & nilai VIM tertinggi pada campuran 40% yaitu 3,50%, 16,89%, dan 5,33%. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC dengan menggunakan limbah *steel slag* lebih baik digunakan sebagai material pengganti agregat kasar daripada limbah ban luar kendaraan.

Kata Kunci: Campuran Aspal AC-BC (*Asphalt Concrete Wearing Course*), Karakteristik *Marshall*, Limbah Ban Luar Kendaraan, Limbah *Steel Slag*

ABSTRACT

The rapid population growth in Indonesia has resulted in an increase in the number of road users due to more and more people traveling. In order to reduce the waste that is around, steel slag and used tire are used as a

substitute for coarse aggregate for hot asphalt mixtures on flexible pavements. This study aims to analyze the Marshall characteristics of the AC-BC (Asphalt Concrete Wearing Course) with the substitution of tire waste and steel slag waste as a substitute for coarse aggregate. The test method begins with testing the characteristics and materials of the asphalt mixture, then determines the optimum asphalt content of the AC-BC. Marshall testing was carried out with variations in the waste of 0%, 10%, 20%, 30% and 40%, respectively. Based on the test results, it was found that the AC-BC using steel slag waste obtained the highest stability value at 20% waste variation, namely 1900.43 kg; the highest flow values and VFWA values in the 40% waste variation were 3.50 mm, 78.40%, respectively; and the MQ value, VMA value, the highest VIM value in a mixture of 10% steel slag, namely 649.04 kg/mm, 16.25%, and 4.48%. For the substitution of tire waste, the results obtained are stability values, MQ values & the highest VFWA values in a mixture of 10% of vehicle outer tires, namely 1150.02 kg, 363.55 kg/mm, and 70.57%, Flow value, VMA value, & value The highest VIM was in the 40% mixture, namely 3.50%, 16.89%, and 5.33%. Based on the results of this study, it can be concluded that the Marshall characteristics of the AC-BC with the substitution of steel slag waste is better used as a substitute for coarse aggregate than the tire waste.

Keywords: AC-BC (Asphalt Concrete Wearing Course), Marshall Characteristics, tire waste, steel slag waste

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan salah satu hal penting untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari dalam memperlancar kegiatan manusia baik di bidang barang maupun jasa. Campuran aspal berisi agregat kasar, agregat halus, dan filler, sehingga jumlah agregat yang dibutuhkan cukup banyak dan hal ini dapat mempengaruhi ketersediaan agregat yang pada akhirnya akan punah jika digunakan terus menerus. Berkaitan dengan hal ini maka perlu dicoba menggunakan alternatif material pengganti agregat kasar untuk campuran aspal. Keberadaan limbah ban luar kendaraan dan limbah steel slag akan mencemari lingkungan, sehingga dalam penelitian ini akan menggunakan limbah sebagai pengganti sebagian agregat kasar untuk campuran aspal AC-BC.

Menurut Warith (2006), ban adalah material komposit, biasanya karet alam/isoprena alam yang digunakan pada ban mobil dan mobil penumpang. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ban bekas kendaraan menyebabkan perubahan parameter Marshall, yaitu nilai stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM, VMA, dan VFWA [(Satyagraha, 2018), (Khairani dkk, 2018), (Rini dkk, 2015), (Laos dkk, 2015), (Fithra, 2019), (Putra dkk, 2019), (Martina dkk, 2008), (Riyanto dan Pramesti, 2022), dan (Trinugroho, 2021)].

Steel slag mempunyai kekerasan yang tinggi dan dikombinasikan dengan permukaan yang kasar menyebabkan batuan ini menguntungkan jika digunakan sebagai pecahan yang difungsikan sebagai pengganti sebagian agregat kasar (Rahmawati, 2017). Penelitian yang pernah dilakukan oleh Liu dkk (2022), Gan dkk (2022), Yang dkk (2022), Solikin (2021), Manguna (2020), Soandrijanie dkk (2017), Devi

(2017), Bethary dkk (2016), dan Demmalino dkk (2019) menyimpulkan bahwa penggunaan limbah steel slag dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran perkerasan jalan.

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis serta membandingkan karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC antara limbah ban luar dan limbah *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan pada penelitian ini ada lima, yaitu: Persiapan bahan dan peralatan penelitian, Pengujian material penyusun campuran aspal AC-BC, Perancangan campuran aspal AC-BC guna memperoleh kadar aspal optimum, Pembuatan spesimen dengan menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* untuk menentukan karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC, dan pengujian *Marshall*.

Tahap 1: Persiapan material dan peralatan penelitian. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal, agregat kasar, agregat halus, filler, limbah ban luar kendaraan, dan limbah *steel slag*. Aspal yang digunakan yaitu aspal keras penetrasi 60/70 dari PT. Pertamina, Cilacap, Jawa Tengah. Agregat kasar, agregat halus, serta filler berasal dari kabupaten Klaten, Jawa Tengah. Limbah ban luar kendaraan diperoleh di daerah Surakarta sebagaimana disajikan pada Gambar 1, serta limbah *steel slag* diperoleh di daerah Ceper, Klaten, Jawa Tengah ditampilkan pada Gambar 2. Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari satu set alat pengujian aspal, satu set alat pengujian agregat kasar, satu set alat pengujian agregat halus, satu set alat *Marshall hammer*, serta satu set alat uji *Marshall*.



Gambar 1. Limbah ban luar kendaraan yang sudah dipotong sesuai ukuran saringan



Gambar 2. Limbah *steel slag*

Tahap 2: Pengujian bahan penyusun campuran aspal AC-BC terdiri dari pengujian aspal, yang terdiri dari uji *specific gravity*, uji penetrasi uji, uji titik lembek, uji titik nyala dan titik bakar, dan uji daktilitas. Pengujian agregat kasar terdiri dari uji *specific gravity* dan penyerapan, uji Analisa saringan, uji keausan agregat, dan uji pelapukan agregat. Pengujian agregat halus berupa uji Analisa saringan, uji uji berat jenis, dan uji Sand Equivalent. Uji limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* mengikuti pengujian agregat kasar.

Tahap 3: Perancangan campuran aspal AC-BC untuk mendapatkan kadar aspal optimum. Tahap ini direncanakan campuran aspal AC-BC dengan dengan 5 variasi kadar aspal, yaitu 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% untuk mendapatkan kadar aspal optimum. Pada setiap variasi kadar

aspal dibuat 3 buah spesimen, sehingga jumlah spesimen yang dibuat sebanyak 15 buah benda uji.

Tahap 4: Pembuatan spesimen dengan menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* untuk menentukan karakteristik Marshall campuran aspal AC-BC. Pada tahap ini dibuat benda uji dengan menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*, masing-masing dengan kadar 0%, 10%, 20%, 30%, serta 40% terhadap agregat kasar. Pada setiap kadar limbah dibuat 3 spesimen, sehingga terdapat 15 spesimen campuran aspal AC-BC dengan limbah ban luar kendaraan dan 15 spesimen campuran aspal AC-BC dengan limbah *steel slag*. Gambar Pemadatan benda uji dan Gambar benda uji dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Pemasakan Spesimen



Gambar 4. Spesimen campuran aspal AC-BC

Tahap 5: Uji *Marshall*. Uji *Marshall* dilakukan untuk mendapatkan karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC dengan menggunakan limbah ban luar kendaraan dan

limbah *steel slag*. Uji *Marshall* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Uji *Marshall*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Aspal, Agregat Kasar, Agregat Halus, Limbah Pengganti Agregat Kasar dan Gradasi Campuran Aspal AC-BC

Hasil pengujian aspal, agregat kasar, agregat halus, dan limbah pengganti agregat kasar dapat disajikan pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4. Sementara untuk Gradasi campuran aspal AC-BC disajikan pada Gambar 6.

Tabel 1. Hasil Pengujian Aspal

No	Jenis Pemeriksaan	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70	68	Memenuhi
2	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48	51,5	Memenuhi
3	Daktalitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	≥100	138,7	Memenuhi
4	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥232	267	Memenuhi
5	Berat jenis	SNI 2441:2011	≥1,0	1,04	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian dan Spesifikasi Bina Marga 2018

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pemeriksaan	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Abrasi	SNI 2417:2008	Maks.40 %	21%	Memenuhi
2	Kelekatan terhadap aspal	SNI 2439:2011	Min 95%	100%	Memenuhi
3	Berat jenis	Bina Marga 2018	Selisih maks 0,2	2,55	Memenuhi
4	absorpsi	Bina Marga 2018	Maks.3%	2,55%	Memenuhi
5	Pelapukan	SNI 3407:2008	Maks.12%	1,1%	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian dan Spesifikasi Bina Marga 2018

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Halus

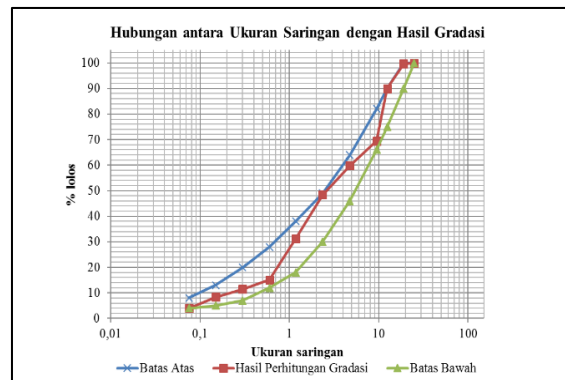
No	Jenis Pemeriksaan	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Sand equivalent	SNI-03-4428-1997	Min 50%	76,1%	Memenuhi
2	Berat jenis	Bina Marga 2018	Selisih maks 0,2	2,74	Memenuhi
3	Absorpsi	Bina Marga 2018	Maks.3%	2,46%	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian dan Spesifikasi Bina Marga 2018

Tabel 4. Hasil Pengujian Limbah Pengganti Agregat Kasar

No	Jenis Pemeriksaan	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Limbah ban luar kendaraan					
1	Abrasi	SNI 2417:2008	Maks. 40%	0%	Memenuhi
2	Kelekatan terhadap aspal	SNI 2439:2011	Min 95%	100%	Memenuhi
3	Berat jenis	Bina Marga 2018	-	1,36	Memenuhi
4	Absorpsi	Bina Marga 2018	Maks.3%	0,90%	Memenuhi
5	Pelapukan	SNI 3407:2008	Maks.12%	0%	Memenuhi
Limbah steel slag					
6	Abrasi	SNI 2417:2008	Maks.40%	39,70%	Memenuhi
7	Kelekatan Terhadap Aspal	SNI 2439:2011	Min 95%	100%	Memenuhi
8	Berat Jenis	Bina Marga 2018	-	2,75	Memenuhi
9	Absorpsi	Bina Marga 2018	Maks.3%	1,81%	Memenuhi
10	Pelapukan	SNI 3407:2008	Maks.12%	1,4%	Memenuhi

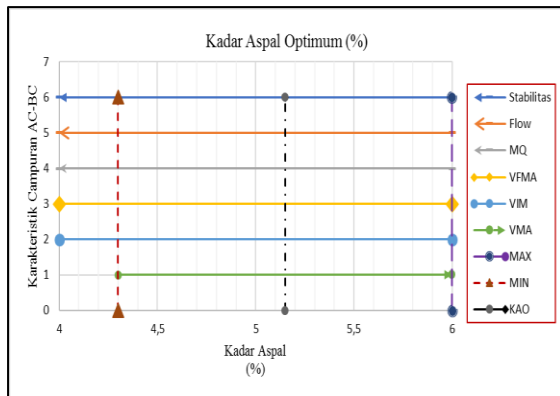
Sumber: Hasil Penelitian dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018



Gambar 6. Hasil Perhitungan Gradasi Campuran Aspal AC-BC

3.2. Hasil Pengujian Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal AC-BC

Penentuan kadar aspal optimum campuran aspal disajikan pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7 dapat ditentukan nilai kadar aspal optimum campuran aspal AC-BC adalah 5,15%.



Gambar 7. Penentuan Nilai KAO

3.3. Hasil Pengujian Karakteristik Marshall Campuran Aspal AC-BC dengan Penggunaan Limbah Ban Luar Kendaraan dan Limbah Steel Slag

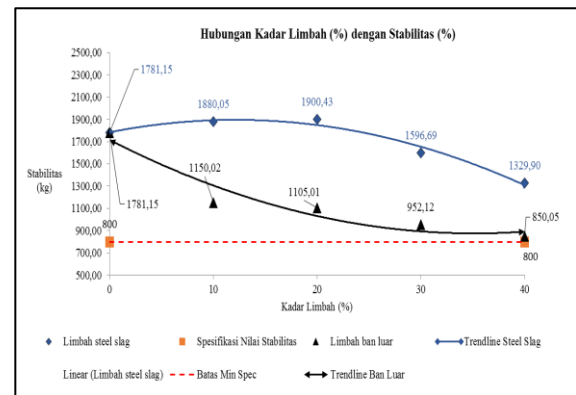
3.3.1. Stabilitas

Nilai stabilitas campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* disajikan pada Gambar 8. Menurut Gambar 8 nilai stabilitas campuran aspal AC-BC untuk semua penambahan kadar limbah memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu nilai stabilitas diatas 800 kg.

Nilai stabilitas tanpa limbah adalah sebesar 1781,15 kg. Nilai stabilitas tertinggi campuran aspal AC-BC menggunakan limbah ban luar diperoleh pada penggunaan kadar limbah 10% sebesar 1150,02 kg, dan nilai stabilitas terkecil diperoleh pada kadar limbah 40% sebesar 850,05 kg. Sementara nilai stabilitas tertinggi campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah *steel slag* diperoleh pada kadar limbah 10% sebesar 1880,05 kg, dan nilai stabilitas terkecil diperoleh pada kadar limbah 40% yaitu 1329,90 kg.

Gambar 8 menjelaskan bahwa nilai stabilitas Campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag* lebih besar daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Hal ini disebabkan karena agregat pengganti dari limbah ban luar kendaraan tidak memiliki pori-pori serta permukaannya tidak kasar, sehingga penyerapan terhadap aspal kurang dan sifat saling kunci agregat lebih rendah dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*. Hal ini mengakibatkan jika perkerasan lentur dengan campuran aspal AC-BC

yang menggunakan limbah ban luar mendapat beban lalu lintas akan memiliki stabilitas yang lebih kecil daripada campuran aspal AC-BC yang memakai limbah *steel slag*.



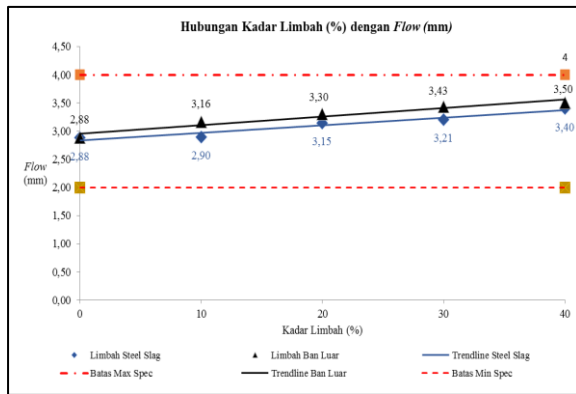
Gambar 8. Perbandingan Stabilitas antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

3.3.2. Flow

Flow campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* disajikan pada Gambar 9. Menurut Gambar 9 nilai *flow* campuran aspal AC-BC untuk semua penambahan kadar limbah sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu nilai *flow* antara 2-4 mm.

Nilai *flow* terbesar campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar dan limbah *steel slag* diperoleh pada penggunaan kadar limbah 40%, yaitu sebesar 3,5 mm untuk limbah ban luar kendaraan, dan sebesar 3,4 mm untuk limbah *steel slag*. Nilai *flow* tanpa limbah adalah sebesar 2,88 mm. Nilai *flow* terendah terjadi pada penggunaan limbah 10% untuk kedua limbah, yaitu sebesar 3,16 mm untuk penggunaan limbah ban luar kendaraan dan sebesar 2,90 mm untuk penggunaan limbah *steel slag*.

Gambar 9 mendeskripsikan bahwa nilai *flow* Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah *steel slag* lebih rendah daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Hal ini dikarenakan agregat pengganti limbah ban luar kendaraan tidak memiliki pori-pori serta permukaannya tidak kasar, sehingga penyerapan terhadap aspal kurang dan sifat saling kunci agregat lebih rendah dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*. Hal ini mengakibatkan jika perkerasan lentur dengan campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar mendapat beban lalu lintas akan terjadi ketahanan terhadap kelelahan yang lebih kecil daripada campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag*.



Gambar 9. Perbandingan *Flow* antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

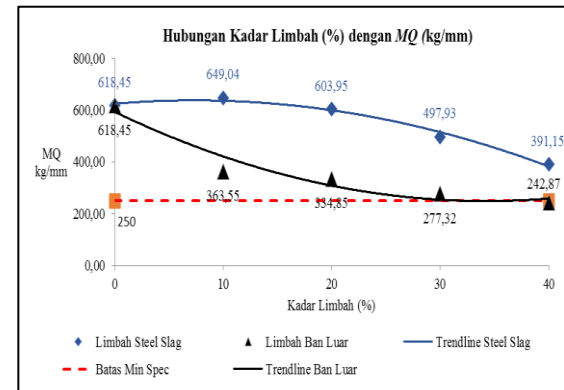
3.3.3. Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient (MQ) campuran aspal AC-BC menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* disajikan pada Gambar 10. Berdasarkan Gambar 10 dapat disimpulkan bahwa nilai *MQ* campuran aspal AC-BC untuk semua penggunaan kadar limbah memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu *MQ* di atas 250 kg/mm.

Nilai *Marshall Quotient (MQ)* tanpa limbah adalah sebesar 618,45 kg/mm. *Marshall Quotient (MQ)* tertinggi campuran aspal AC-BC dengan penggunaan kedua limbah diperoleh pada penggunaan kadar limbah 10%, yaitu sebesar 363,55 kg/mm untuk penggunaan limbah ban luar kendaraan dan sebesar 649,04 kg/mm untuk penggunaan limbah *steel slag*. Sementara nilai *Marshall Quotient (MQ)* terendah terjadi pada penggunaan limbah 10% untuk kedua limbah, yaitu sebesar 242,97 kg/mm untuk penggunaan limbah ban luar kendaraan dan sebesar 391,15 kg/mm untuk penggunaan limbah *steel slag*.

Gambar 10 mendeskripsikan bahwa nilai *Marshall Quotient (MQ)* campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah *steel slag* lebih tinggi daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Hal ini disebabkan karena agregat pengganti dari limbah ban luar kendaraan tidak memiliki pori-pori serta permukaannya tidak kasar, sehingga penyerapan terhadap aspal kurang dan sifat saling kunci agregat lebih rendah dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*. Hal ini mengakibatkan jika perkerasan lentur dengan campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar mendapat beban lalu lintas akan mempunyai stabilitas yang lebih rendah dan nilai *flow* yang lebih besar daripada campuran aspal AC-BC yang memakai limbah *steel slag*, sehingga nilai *MQ* pada campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar kendaraan lebih rendah

daripada campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag*.



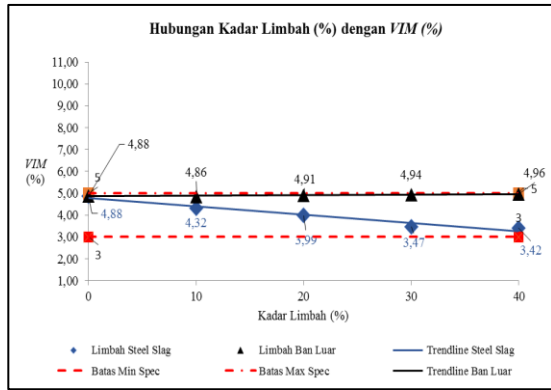
Gambar 10. Perbandingan *Marshall Quotient (MQ)* antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

3.3.4. Void in the Mix (VIM)

Nilai *VIM* campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* dapat dilihat pada Gambar 11. Menurut Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa nilai *VIM* campuran aspal AC-BC untuk semua penambahan kadar limbah sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu *VIM* 3-5%.

Nilai *VIM* tanpa limbah adalah sebesar 4,88%. *VIM* tertinggi campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar diperoleh pada kadar 40% yaitu sebesar 4,96% dan sebaliknya untuk limbah *steel slag* diperoleh pada penggunaan kadar limbah 10%, yaitu sebesar 4,86%. Nilai *VIM* terendah terjadi pada penggunaan limbah 10% untuk limbah ban luar kendaraan, yaitu sebesar 4,86%, sebaliknya pada kadar limbah 40% untuk penggunaan limbah *steel slag* yaitu sebesar 3,42%.

Berdasarkan Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa nilai *VIM* Campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag* lebih rendah daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Hal ini disebabkan karena agregat pengganti dari limbah ban luar kendaraan permukaannya tidak kasar, sehingga sifat saling kunci dan saling mengisi rongga yang ada lebih rendah dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*. Hal ini mengakibatkan rongga yang ada dalam campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar lebih tinggi daripada campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag*.



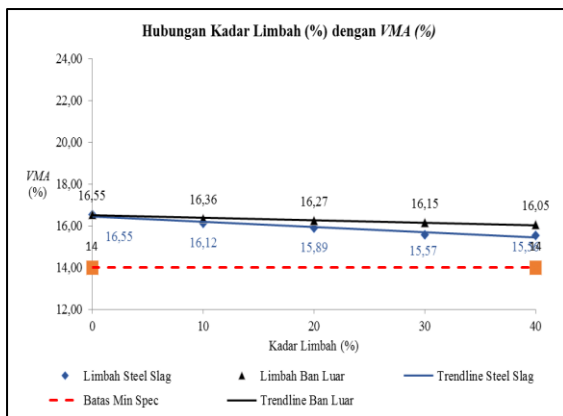
Gambar 11. Perbandingan *Void in the Mix (VIM)* antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

3.3.5. *Void in the Mineral Aggregate (VMA)*

VMA campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* disajikan pada Gambar 12. Menurut Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa nilai *VMA* campuran aspal AC-BC untuk semua penambahan kadar limbah sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu nilai *VMA* diatas 14%.

Nilai *VMA* pada campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar mempunyai kecenderungan yang sama dengan nilai *VIM*.

Menurut Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa nilai *VMA* Campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag* lebih rendah daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Hal ini disebabkan karena agregat pengganti dari limbah ban luar kendaraan permukaannya tidak mempunyai rongga/pori, sehingga rongga yang ada di antara mineral agregat lebih besar dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*.



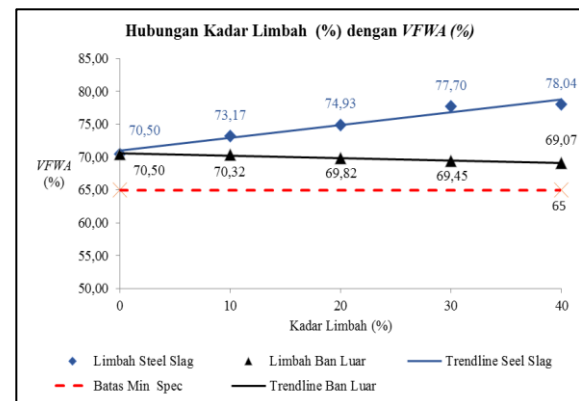
Gambar 12. Perbandingan *Void in the Mineral Aggregate (VMA)* antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

3.3.6. *Void Filled With Asphalt (VFWA)*

Nilai *VFWA* campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* disajikan pada Gambar 13. Berdasarkan Gambar 13 dapat disimpulkan bahwa nilai *VFWA* campuran aspal AC-BC untuk semua penggunaan kadar limbah memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu nilai *VFWA* diatas 65%.

Nilai *VFWA* pada campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar mempunyai kecenderungan yang berbalik dengan nilai *VMA*.

Berdasarkan Gambar 13 dapat disimpulkan bahwa nilai *VFWA* Campuran aspal AC-BC yang menggunakan limbah *steel slag* lebih tinggi daripada menggunakan limbah ban luar kendaraan. Fenomena ini dikarenakan agregat pengganti dari limbah ban luar kendaraan permukaannya tidak mempunyai rongga/pori, sehingga rongga yang terisi aspal pada campuran aspal AC-BC dengan memanfaatkan agregat limbah ban luar kendaraan lebih kecil dibandingkan agregat pengganti dari limbah *steel slag*.



Gambar 13. Perbandingan *Void Filled With Asphalt (VFWA)* antara Campuran aspal AC-BC dengan penggunaan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag*

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diberikan sesuai hasil pengujian *Marshall* campuran aspal AC-BC dengan pemanfaatan limbah ban luar kendaraan adalah sebagai berikut: Pemanfaatan limbah ban luar kendaraan dan limbah *steel slag* pada prosentase 10%, 20%, 30%, dan 40% sebagai substitusi agregat kasar masih sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018, Komparasi karakteristik *Marshall* campuran aspal AC-BC antara penggunaan limbah ban luar dan limbah *steel slag* sebagai substitusi sebagian agregat kasar adalah penggunaan *steel slag* sebagai bahan pengganti sebagian agregat kasar memberikan

kontribusi yang lebih baik daripada menggunakan bahan pengganti ban luar kendaraan. Kadar limbah ban luar maupun limbah *steel slag* yang direkomendasikan sebagai substitusi agregat kasar pada campuran aspal AC-BC adalah sebesar 10%.

DAFTAR PUSTAKA

- Bethary, R. T., Intari, D. E., & Septian. (2016). Kinerja Campuran Lapis Aus (AC-WC) Yang Memakai Material Rap dan Slag. *Proceedings Of The 19th International Symposium Of Fstpt*, 7(October), 820–830.
- Bina Marga. (2018). Spesifikasi Bina Marga 2018-Divisi 6.
- Demmalino, U. A., Sielviana, C., Lambe, W., Rachman, R., Marga, S. B., Kunci, K., Marshall, K., HRS-Base, L., & Nikel, S. (2019). Pengujian Slag Nikel sebagai Pengganti Agregat pada Campuran HRS-Base. *Paulus Civil Engineering Journal Vol 1 No 2*.
- Devi, S. (2017). Pengaruh Penambahan Limbah Steel Slag dalam Campuran AC-WC sebagai Pengganti Agregat Kasar No. ½" dan No. 8. Tugas Akhir S1 Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Gan, Y., Li, C., Zou, J., Wang, W., dan Yu, T. (2022) Evaluation of the impact factors on the leaching risk of steel slag and its asphalt mixture, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 16.
- Herman, F. (2019) Studi Karakteristik Penggunaan Serbuk Ban Bekas (Perkerasan AC dan HRS). UNIMAL PRESS. Lhokseumawe
- Charly Laos, Gedy Goestiawan, Paravita Sri Wulandari, Harry Patmadjaja. (2015). Pengaruh Penambahan Serbuk Ban Karet pada Campuran Laston Untuk Perkerasan Jalan Raya. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, Vol. 4 No. 2.
- Halimu, O., Fitriah., & Sulha. (2018). Uji Karakteristik Marshall Campuran Laston AC-BC Menggunakan Material Batu Kapur dan Variasi Aspal Kabungka dengan Kadar Aspal. *Jurnal Stabilita Vol. 6 No. 3*.
- Khairani, C., Saleh, S. M., & Sugiarto, S. (2018). Uji Marshall pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) Dengan Tambahan Parutan Ban Bekas. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(3), 559–570.
- Liu, J., Chen, S., Liu, Q., Wang, Y., dan Yu, B. (2022). Influence of steel slag incorporation on internal skeletal contact characteristics within asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, Volume 352.
- Manguna, F., Alpius., Kamba, Charles (2020). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel terhadap Indeks Kekuatan Sisa Campuran HRS-WC. *Civil Engineering Journal*. Volume 2 No 3.
- Martina, N., Fathur, M., Hasan, R., Setiawan, Y., Teknik, J., Politeknik, S., & Jakarta, N. (2008). Pengaruh Serbuk Ban Bekas sebagai Campuran Agregat Halus pada Campuran Aspal Porous. *Wahana Teknik Sipil Vol. 24 No. 2 Desember 2019* 144 - 152
- Putra, K. L., Prakoso, R. Y., & Muchtar, Z. (2019). Pengaruh Penambahan Limbah Serbuk Ban sebagai Pengganti Agregat Halus Terhadap Stabilitas Lapisan AC-WC. *Jurnal Pilar Vol 14 No 1*.
- Rahmawati, A. (2017). Pengaruh Penggunaan Limbah Steel Slag sebagai Pengganti Agregat Kasar Ukuran 1/2" dan 3/8" pada Campuran Hot Rolled Sheet Wearing Course(HRS-WC). *Dinamika Rekayasa*.Vol. 13, No.1. Hal 10-17.
- Rini, T. K., Pratama, W., & Amarwati, A. (2015). Pengaruh Penambahan Limbah Karet Ban terhadap Kuat Tekan Marshall Pada Campuran Beton Aspal. *Jurnal Kalibrasi - Karya Lintas Ilmu Bidang Rekayasa Arsitektur, Sipil, Industri*, 10(0),79-102.
- Riyanto, A. dan Pramesti, Y. (2022). Pemanfaatan Limbah Plastik dengan Teknologi Daur Ulang pada Hot Rolled Asphalt Ditinjau dari Aspek Properties Marshall, Nilai Ketidakrataan, dan Durabilitas. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Volume 15 No 1.
- Saleh, A. (2018). Pengaruh Penggunaan Zeolit Alam Sebagai Filler Pada Campuran AC-BC ditinjau dari Nilai Vitm. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, Vol 4, No. 1. 36–42.
- Satyagraha, F. (2018). Limbah Ban dalam Bekas Kendaraan dan Filler Limbah Karbit Pada Laston (AC-BC) terhadap Karakteristik Marshall. *Proyek Akhir D3 Universitas Negeri Yogyakarta*.
- Soandrijanie, J. F., Yohanes, L., & Sitohang, B. (2017). Pengaruh Steel Slag sebagai Pengganti Agregat Kasar dengan Filler Fly Ash pada Laston AC-WC. *Fakultas Teknik Universitas Atmajaya Yogyakarta*.

- Solikin, M. (2021). Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1:1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na₂SiO₃ Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Volume 14 No 1.
- Trinugroho, S. (2021). Analisis Pengaruh Bahan Tambah Serbuk Arang Briket dan Bestmittel pada Kuat Tekan Beton. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Volume 14 No 2.
- Warith, M. A. & R. S. M. (2006). Predicting The Compressibility Behaviour Of Tire Shred Samples For Landfill Applications, Elsevier.
- Yang, C., Wu, S., Xie, J., Amirkhanian, S., Liu, Q., Zhang, J., Xiao, Y., Zhao, Z., Xu, H., Li, N., Wang, F., dan Zhang, L. (2022). Enhanced induction heating and self-healing performance of recycled asphalt mixtures by incorporating steel slag, *Journal of Cleaner Production*, Volume 366.
- Zulfichar, A. (2012). Pengaruh Penambahan 'Limbah Karet Ban Dalam' terhadap Karakteristik Marshall pada Lapisan Aspal Beton (Laston). Tesis Universitas Muhammadiyah Malang.