

Analisis Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi Agregat Halus pada Lataston Lapis Aus (HRS-WC) Terhadap Kinerja Jalan Beraspal

Moch Nasrulloh, Ibnu Sholichin*, Aulia Dewi Fatikasari

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains UPN "Veteran" Jawa Timur

*Correspondence email: auliafatikaa@gmail.com, ibnu.ts@upnjatim.ac.id

Abstrak. Kerusakan pada perkerasan lentur masih sering ditemui di Indonesia. Seiring berkembangnya teknologi, banyak dikembangkan penelitian tentang pemanfaatan limbah sebagai alternatif pengganti material penyusun campuran aspal. Pada penelitian ini digunakan limbah serbuk besi sebagai bahan substitusi agregat halus pada Lataston lapis aus dengan kadar 0%, 15%, 30%, dan 45%. dilakukannya penelitian ini bertujuan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dan persentase optimum dari penambahan limbah serbuk besi sebagai substitusi agregat halus terhadap indikator uji Marshall sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2). Berdasarkan hasil uji Marshall yang dilakukan, diperoleh KAO sebesar 7,5% dengan rata-rata nilai stabilitas 2040,46 kg, kelelahan 3,40 mm, MQ 600,24 kg/mm, rongga dalam campuran 4,69%, rongga antar agregat 18,30%, dan rongga terisi aspal 74,39%. Sedangkan kadar serbuk besi optimum didapatkan sebesar 13% dengan nilai rata-rata stabilitas 2091,90 kg, kelelahan 3,17 mm, MQ 662,79 kg/mm, rongga dalam campuran 3,92%, rongga antar agregat 17,59%, dan rongga terisi aspal 77,72%. Hasil tersebut memenuhi persyaratan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2). Penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus pada HRS-WC mampu meningkatkan stabilitas, tetapi mengurangi rongga udara pada campuran aspal. Hal ini mengakibatkan campuran aspal bersifat lebih kedap dan plastis.

Kata Kunci: perkerasan lentur, lataston lapis aus, serbuk besi, dan pengujian *marshall*.

Abstract. Damage to flexible pavements is still commonly found in Indonesia. As technology develops, there is some research regarding using iron powder as an alternative replacement material for asphalt mixtures. This research used iron powder waste as a substitute for fine aggregate in Hot Rolled Sheet-Wearing Course with levels of 0%,15%,30%, and 45%. The purpose of this research to determine the Optimum Asphalt Content (OAC) and optimum percentage of iron powder waste addition as a substitute for fine aggregate to the indicator of Marshall test based on The General Specification of Bina Marga 2018 (Revision 2). Based on Marshall testing that has been carried out, the OAC values are 7,5% with an average of stability 2040,46 kg, flow 3,40 mm, MQ 600,24 kg/mm, voids in mix 4,69%, voids in mineral aggregate 18,30%, and voids filled with asphalt 74,39%. While the optimum percentage of iron powder value is 13% with an average of stability 2091,90 kg, flow 3,17 mm, MQ 662,79 kg/mm, voids in mix 3,92%, voids in mineral aggregate 17,59%, and voids filled with asphalt 77,72%. The result met the General Specification of Bina Marga 2018 (Revision 2). The addition of iron powder as a substitute for fine aggregate in HRS-WC is can increase stability but reduce air voids in the asphalt mixture. This result makes the asphalt mixture more impermeable and plastic.

Keywords: flexible pavements; hot rolled sheet-wearing course, iron powder; marshall test.

PENDAHULUAN

Perkerasan jalan memiliki peranan penting sebagai sarana penghubung suatu tempat guna memudahkan mobilisasi manusia. Selain itu, perkerasan jalan juga berfungsi sebagai pemberi rasa aman dan nyaman bagi penggunaannya (Sukirman, 2010). Namun, kerusakan pada perkerasan jalan terutama perkerasan lentur masih sering ditemui di Indonesia. Umumnya kerusakan tersebut disebabkan karena peningkatan volume kendaraan dan kegagalan struktur akibat genangan air yang dapat menyebabkan ikatan aspal dan agregat lepas sehingga menyebabkan jalan berlubang dan dapat merusak fondasi jalan (Sholichin & Utama, 2019). Salah satu jenis campuran aspal pada perkerasan lentur yaitu Lataston atau *Hot Rolled Sheet*. Lataston memiliki kelebihan spesifik dalam hal elastisitas yang lebih tinggi daripada campuran aspal lainnya (Nahyo dkk., 2015). Kekuatan serta ketahanan perkerasan lentur dipengaruhi oleh kualitas material penyusun serta nilai daya dukung tanah pada perkerasan tersebut (Devi&Affandy, 2021). Kegagalan struktur pada perkerasan lentur dapat ditanggulangi dengan pemilihan material dengan kualitas yang baik (Utomo dkk., 2020). Seiring

berkembangnya teknologi, banyak dikembangkan penelitian yang memanfaatkan limbah sebagai alternatif pengganti material penyusun campuran aspal. Dalam penelitian ini akan digunakan limbah dari serbuk besi sebagai substitusi agregat halus pada lataston lapis aus (HRS-WC). Serbuk besi merupakan produk sisa yang dihasilkan dari proses pemotongan atau pembubutan besi tuang, yang dihasilkan oleh proses industri (Bahri & Irawan, 2010). Serbuk besi memiliki kandungan kimia yang mirip dengan agregat halus (pasir). Senyawa seperti mineral silika, besi, dan kalsium secara umum terkandung dalam pasir yang ada di Indonesia (Rahmanto & Wulandari, 2020). Penelitian bertujuan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), persentase optimum kadar serbuk besi serta pengaruh dari penggunaan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus pada HRS-WC terhadap indikator *Marshall* sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2).

Perkerasan Lentur

Perkerasan jalan merupakan struktur suatu konstruksi yang dibangun di atas lapisan tanah dasar (*subgrade*) yang memiliki peranan sebagai penerima beban pada kendaraan yang melintas (L. Hendarsin, 2000). Perkerasan jalan digolongkan menjadi tiga yaitu perkerasan kaku (*rigid pavement*), perkerasan lentur (*flexible pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*) yang memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Perkerasan lentur merupakan tipe perkerasan yang lebih banyak digunakan karena tipe perkerasan ini dapat diaplikasikan pada berbagai tingkat volume lalu lintas dan semua klasifikasi jalan (Lestari, 2013). Perkerasan lentur tersusun atas aspal, agregat, dan *filler* dengan komposisi tertentu yang lalu dicampur, dihampar, dan dipadatkan pada temperatur yang ditentukan. Perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan, yaitu lapis permukaan (*wearing course*), lapis pengikat (*binder course*), lapis fondasi atas (*base course*), lapis fondasi bawah (*sub-base*), dan lapis tanah dasar (*sub-grade*) (Nur dkk., 2021).

Lapis Tipis Aspal Beton (Lataston)

Lataston (HRS) merupakan beton aspal bergradasi senjang yang memiliki ukuran agregat maksimum 19 mm pada tiap campurannya dan dirancang untuk jalan dengan lalu lintas kurang dari 10 juta ESA (*Equivalent Standart Axle*) (Sukirman, 2016). Lataston merupakan gabungan antara aspal dan agregat bergradasi senjang dengan proporsi yang ditentukan dan kemudian dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas dengan suhu tertentu (Apriyanto & Yamali, 2018). Lataston (HRS) memiliki keunggulan berupa ketahanan terhadap oksidasi serta elastisitas yang lebih baik dibanding aspal *hotmix* lainnya (Rumagit dkk., 2017). Lataston (HRS) dibedakan menjadi dua jenis yaitu lataston lapis fondasi dan lapis aus (Aditama dkk., 2021). Ketentuan mengenai spesifikasi gradasi agregat gabungan untuk lataston telah diatur dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2).

Tabel. 1 Spesifikasi Gradasi Agregat Untuk Lataston

Saringan		Persentase Lolos Terhadap Total Agregat	
		Lataston (HRS)	
No. saringan	(mm)	Lapis aus	Lapis fondasi
1,5"	37,5	-	-
1"	25	-	-
0,75 "	19	100	100
0,5"	12,5	90-100	90-100
3/8 "	9,5	75-85	65-90
4	4,75	-	-
8	2,36	50-72	35-55
16	1,18	-	-
30	0,6	35-60	15-35
50	0,3	-	-
100	0,15	-	-
200	0,075	6-10	2-9

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2 (2018)

Pengujian Material

Pengujian material yang dilakukan yaitu pengujian agregat dan aspal. pengujian ini bertujuan untuk memastikan apakah karakteristik material yang dipakai telah memenuhi persyaratan yang

ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2). Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian material seperti uji analisis saringan, berat jenis agregat kasar dan halus, berat jenis serbuk besi, penetrasi aspal, titik lembek aspal, titik nyala dan bakar aspal, serta berat jenis aspal.

Pengujian Marshall

Uji *Marshall* dilakukan untuk memperoleh campuran aspal yang sesuai dengan standar dalam perencanaan (SNI 06-2489-1991). Pengujian ini menghasilkan beberapa indikator yang menunjukkan sifat suatu campuran aspal. Persyaratan mengenai indikator uji *Marshall* untuk lataston telah ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2) berikut:

Tabel. 2 Ketentuan Indikator *Marshall* untuk Lataston

Indikator <i>Marshall</i>	Lataston	
	Lapis Aus	Lapis Fondasi
Stabilitas	Min.	600 kg
<i>Flow</i>	Min.	3 mm
VIM	Min.	3%
	Maks.	5%
VMA	Min.	17%
VFA	Min.	68%
<i>Marshall Quotient</i>	Min.	250 kg/mm

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2 (2018)

Perencanaan Kadar Aspal

Perencanaan kadar aspal tengah bertujuan untuk memperoleh KAO dan dapat dihitung melalui metode *Asphalt Institute* yang terdapat dalam SE Menteri PUPR No.14/SE/M/2019 yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$Pb = 0,035 a + 0,045 b + Kc + F$$

Dimana:

- Pb : Kadar aspal tengah (%)
a : persentase agregat yang tertahan oleh ayakan No.8
b : persentase agregat yang lolos oleh ayakan No.8 dan tertahan oleh ayakan No.200
c : persentase agregat yang lolos oleh ayakan No.200
K : 0,15 jika persentase lolos ayakan No.200 sebesar 11-15%
0,18 jika persentase lolos ayakan No.200 sebesar 6-10%
0,20 jika persentase lolos ayakan No.200 sebesar < 5%
F : 0-2% untuk penyerapan agregat

METODE

Penelitian ini berlokasi di Laboratorium Bahan Jalan Program Studi Teknik Sipil yang terletak di UPN “Veteran” Jawa Timur. Serbuk besi yang digunakan merupakan sisa pembubutan industri besi yang memiliki ukuran cocok sebagai agregat halus dan merupakan hasil persentase tertahan terbesar dari pengujian analisis saringan sesuai dengan spesifikasi amplop gradasi untuk lataston dengan variasi 0%, 15%, 30%, dan 45% dengan jumlah masing-masing 5 benda uji tiap variasi. Kadar aspal rencana yang dipakai yaitu Pb-1, Pb, Pb+1 dengan jumlah masing-masing 5 benda uji tiap variasi. Pencampuran bahan penelitian menggunakan metode kering. Aspal yang dipakai yaitu aspal Pertamina pen.60/70. Agregat kasar yang dipakai berupa batu pecah 5-10 mm dan 10-15 mm. sedangkan agregat halus berupa abu batu < 5 mm. Adapun tahapan penelitian yang dilakukan ditunjukkan sebagai berikut:

1. Pengujian material
2. Penentuan kadar aspal rencana Pb-1, Pb, Pb+1
3. Pembuatan benda uji dengan kadar aspal rencana
4. Uji *Marshall* untuk penentuan KAO
5. Pembuatan benda uji dengan penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus variasi 0%, 15%, 30%, dan 45% dengan KAO yang sudah ditentukan
6. Uji *Marshall* untuk penentuan kadar serbuk besi optimum

7. Penarikan kesimpulan

HASIL

Analisis Saringan untuk Agregat

Tabel. 3 Hasil Analisis Saringan untuk HRS-WC

Saringan		Spesifikasi	Nilai Tengah Lolos	Nilai Tengah Tertahan	Berat
No. Saringan	(mm)	(%)	(%)	(%)	(Gram)
3/4"	19	100	100	0	0
1/2"	12,5	90-100	95	5	60
3/8"	9,5	75-85	80	15	180
4	4,75				
8	2,36	50-72	61	19	228
16	1,18				
30	0,60	36-60	48	13	156
50	0,30				
100	0,15				
200	0,075	6-10	8	40	480
PAN	< 0,075		0	8	96
Total			100	100	1200

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Analisis Saringan untuk Serbuk Besi

Tabel. 4 Hasil Analisis Saringan untuk Serbuk Besi

Kadar Serbuk Besi (%)	Berat Agregat No.200 (Gr)	Berat (gr)
15	480	72
30	480	144
45	480	216

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Berat Jenis Agregat dan Serbuk Besi

Tabel. 5 Hasil Pengujian Berat Jenis Material

Material	Berat jenis	Hasil
Agregat Uk. 10-15 mm	Curah	2,71 gr/cm ³
	Jenuh Kering Permukaan (SSD)	2,75 gr/cm ³
	Semu	2,83 gr/cm ³
	Penyerapan	1,57%
Agregat Uk. 5-10 mm	Curah	2,60 gr/cm ³
	Jenuh Kering Permukaan (SSD)	2,65 gr/cm ³
	Semu	2,73 gr/cm ³
	Penyerapan	1,85%
Agregat Uk. < 5 mm	Curah	2,61 gr/cm ³
	Jenuh Kering Permukaan (SSD)	2,65 gr/cm ³
	Semu	2,72 gr/cm ³
	Penyerapan	1,55%
Serbuk besi	Curah	2,65 gr/cm ³
	Jenuh Kering Permukaan (SSD)	2,69 gr/cm ³
	Semu	2,76 gr/cm ³
	Penyerapan	1,46%

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Pengujian Aspal

Tabel. 6 Hasil Pengujian Aspal

Jenis pengujian	Spesifikasi	Hasil
Penetrasi aspal	60-70 mm	65,15 mm
Titik nyala	Min.232°C	356°C
Titik bakar	-	360°C
Titik lembek	Min 48°C	52,5°C
Berat jenis aspal	Min.1 gr/cm ³	1,043 gr/cm ³

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Hasil Kadar Aspal Rencana

Tabel. 7 Hasil Kadar Aspal Rencana

Variasi kadar aspal	Persentase (%)	Berat (gr)
Pb-1	5,9	77,88
Pb	6,9	91,08
Pb+1	7,9	104,28

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

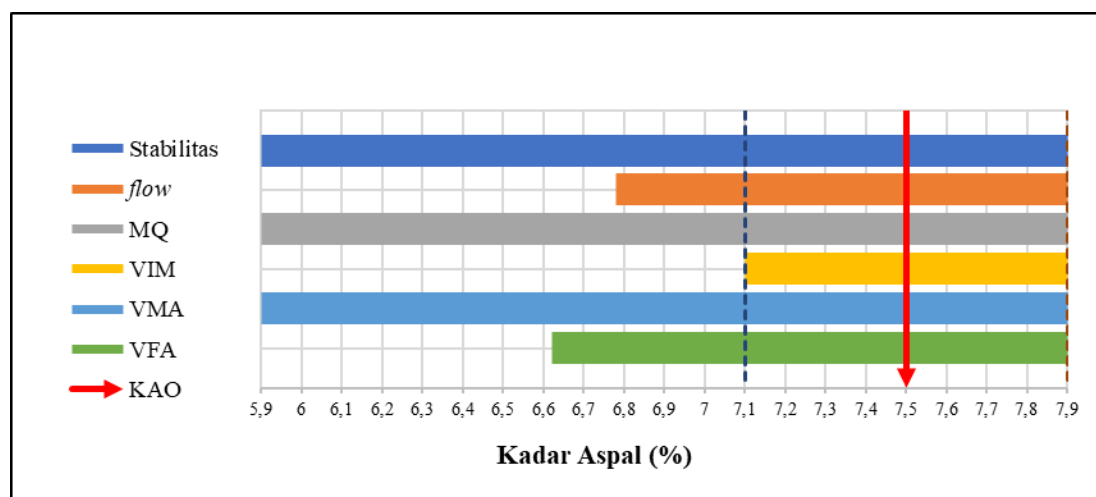
Hasil Kadar Aspal Optimum

Metode untuk menentukan KAO pada penelitian berupa pendekatan grafis dengan menetapkan batas-batas nilai tiap indikator *Marshall* sesuai dengan persyaratan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 pada benda uji yang telah dibuat, dihitung, dan diuji sesuai dengan kadar variasi aspal rencana yaitu 5,9%, 6,9%, dan 7,9% dengan jumlah total agregat 1320 gr. Rekapitulasi nilai rata-rata indikator uji *Marshall* ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel. 8 Rekapitulasi Nilai Rata-Rata Indikator Uji *Marshall*

Kadar aspal	Stabilitas	Flow	MQ	VIM	VMA	VFA
5,9%	1715,13 kg	2,7 mm	635,77 kg/mm	6,53%	17,03%	61,64%
6,9%	1872,72 kg	3,05 mm	613,87 kg/mm	5,24%	17,72%	70,4%
7,9%	2162 kg	3,55 mm	608,97 kg/mm	3,98%	18,4%	78,36%
Spesifikasi	600 kg	3 mm	250 kg/mm	3-5%	17%	68%

Sumber: Hasil Penelitian (2024)



Gambar 1. Grafik Hasil KAO

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Berdasarkan nilai komposisi agregat yang ditentukan sebesar 1320 gr. Didapatkan KAO sebesar 7,5% dari berat total agregat sehingga berat kadar aspal yang digunakan sebesar 99 gr. Maka, berat total campuran aspal saat pembuatan benda uji dengan penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus sebesar 1419 gr.

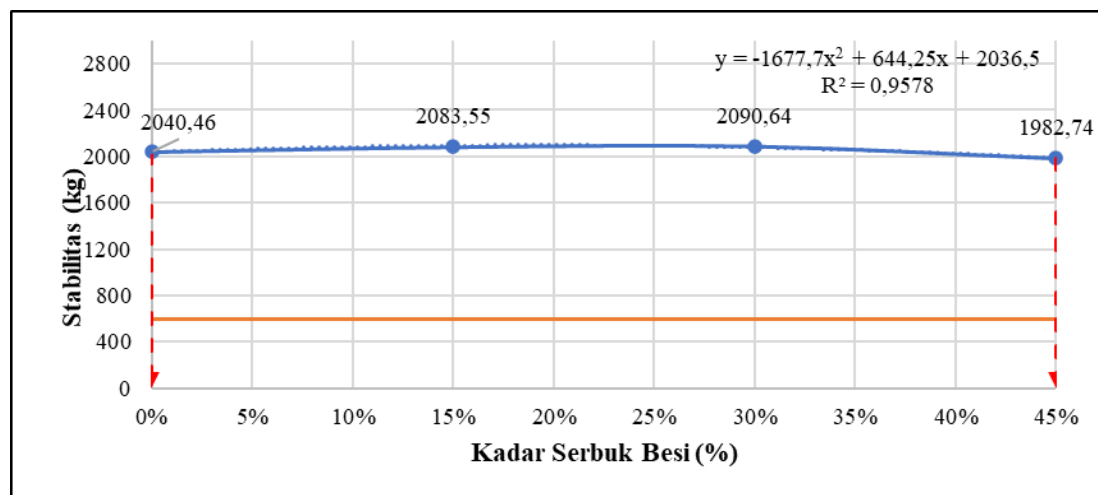
Hasil Penentuan Kadar Serbuk Besi Optimum

Tabel. 9 Rekapitulasi Nilai Rata-Rata Indikator Uji Marshall

Kadar Serbuk Besi dengan KAO 7,5%	Stabilitas	Flow	MQ	VIM	VMA	VFA
0%	2040,46 kg	3,40 mm	600,24 kg/mm	4,69%	18,30%	74,39%
15%	2083,55 kg	3,17 mm	658,00 kg/mm	3,72%	17,40%	78,64%
30%	2090,64 kg	2,96 mm	705,52 kg/mm	3,39%	17,05%	80,14%
45%	1982,74 kg	2,98 mm	664,64 kg/mm	2,94%	16,60%	82,27%
Spesifikasi	600 kg	3 mm	250 kg/mm	3-5%	17%	68%

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

1. Stabilitas

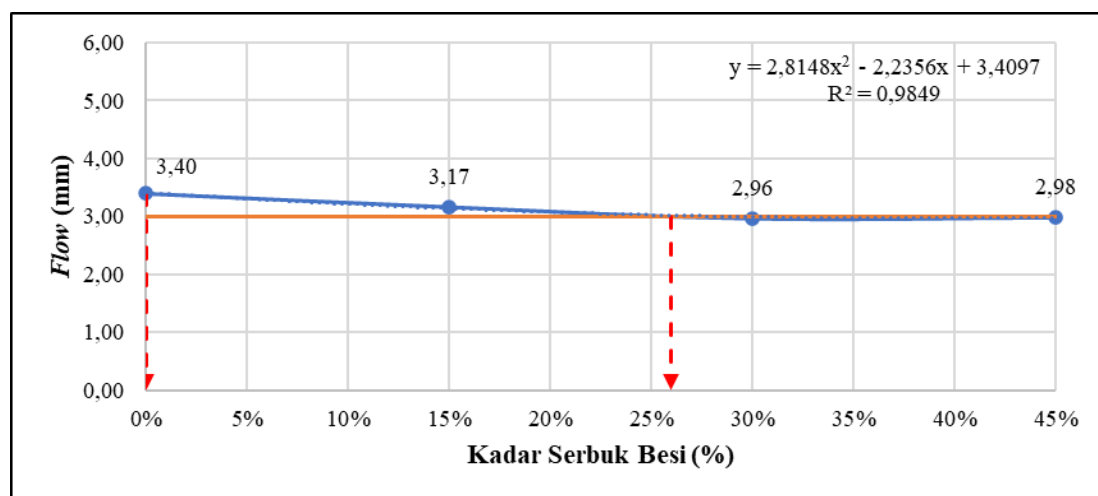


Gambar 2. Grafik Nilai Rata-Rata Stabilitas

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata stabilitas mengalami kenaikan dan penurunan (fluktuatif) pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa semua kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 dengan nilai minimal stabilitas untuk aspal HRS atau lataston sebesar 600 kg.

2. Kelelehan (Flow)

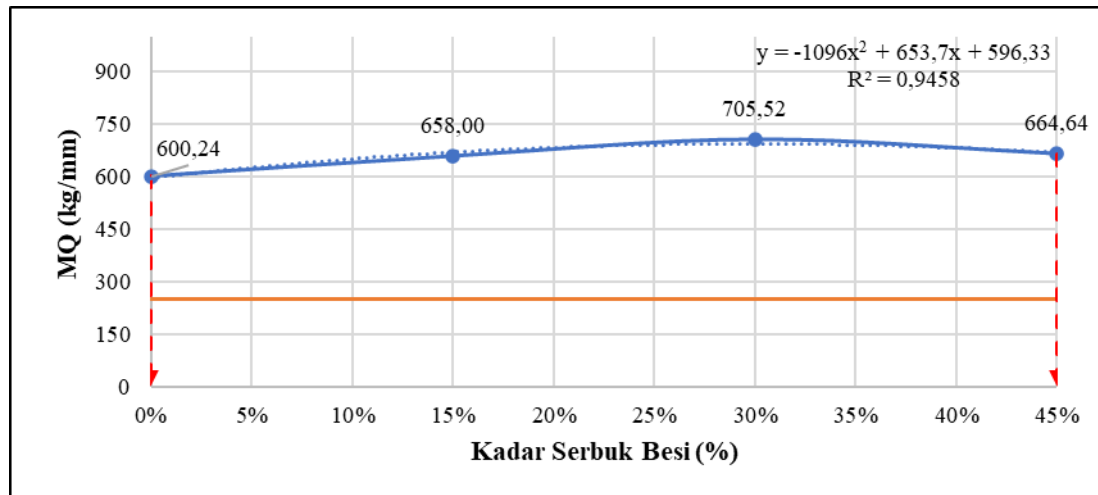


Gambar 3. Grafik Nilai Rata-Rata Flow

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata *flow* mengalami kenaikan dan penurunan (fluktuatif) pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 dengan nilai minimal *flow* sebesar 3 mm yaitu 0%, 15% dan 26%.

3. Marshall Quotient (MQ)

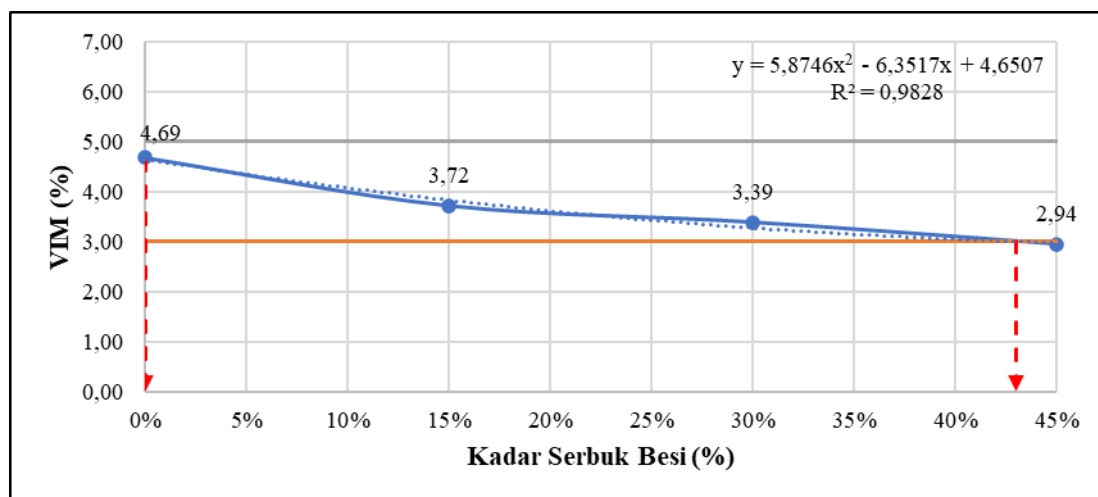


Gambar 4. Grafik Nilai Rata-Rata MQ

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata MQ mengalami kenaikan dan penurunan (fluktuatif) pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa semua kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 dengan nilai minimal MQ sebesar 250 kg/mm.

4. Rongga Dalam Campuran (VIM)

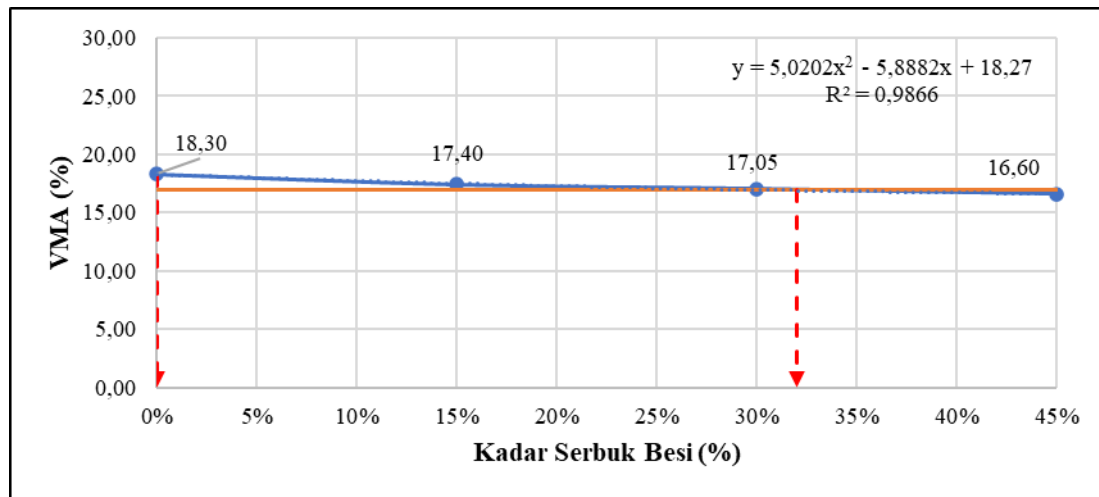


Gambar 5. Grafik Nilai Rata-Rata VIM

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata VIM mengalami penurunan pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 dengan nilai VIM sebesar 3-5% yaitu 0%, 15%, 30% dan 43%.

5. Rongga Antar Agregat (VMA)

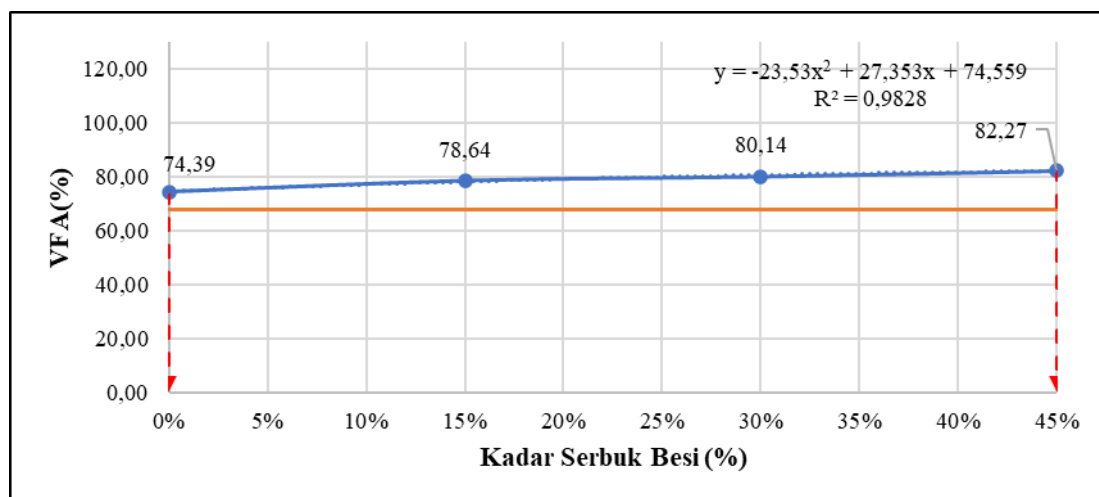


Gambar 6. Grafik Nilai Rata-Rata VMA

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata VMA mengalami penurunan pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 dengan nilai minimal VMA sebesar 17% yaitu 0%, 15%, 30%, dan 32%.

6. Rongga Terisi Aspal (VFA)

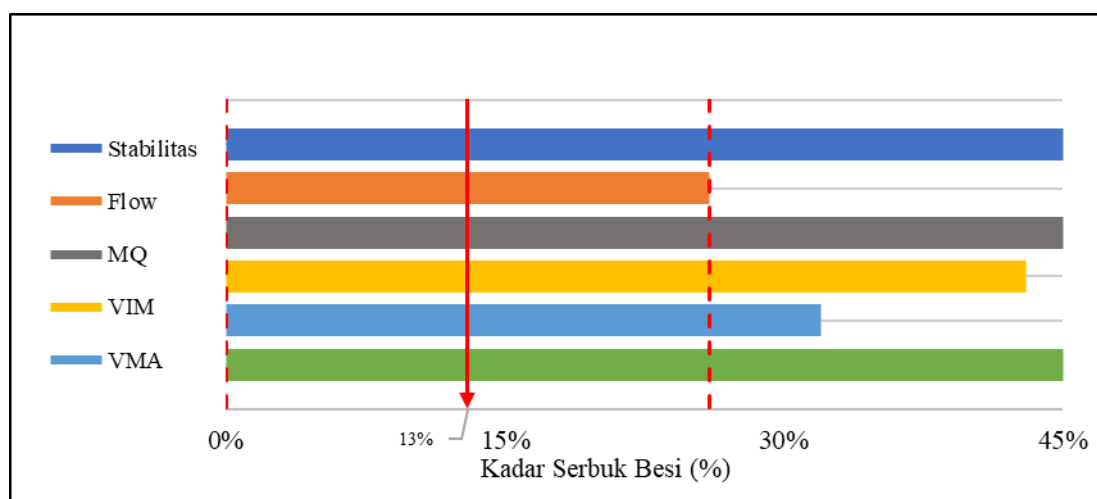


Gambar 7. Grafik Nilai Rata-Rata VFA

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai rata-rata VFA mengalami kenaikan pada setiap variasi penambahan serbuk besi. Diketahui bahwa semua kadar penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018, dengan nilai minimal VFA sebesar 68%.

7. Kadar Serbuk Besi Optimum



Gambar 8. Kadar Serbuk Besi Optimum

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Berdasarkan nilai-nilai indikator uji *Marshall* yang telah didapatkan sebelumnya, dengan berat total campuran sebesar 1419 gram. Diperoleh kadar serbuk besi optimum yang digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam penelitian ini sebesar 13% dan kadar serbuk besi maksimum yang memenuhi spesifikasi yaitu 26%. Nilai dari tiap indikator uji *Marshall* dari kadar serbuk besi optimum didapatkan dengan perhitungan persamaan polinomial yang tercantum pada grafik uji *Marshall* sebelumnya dan nilai tersebut secara keseluruhan telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (revisi 2) yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel. 10 Rekapitulasi Perbandingan Indikator Uji *Marshall* Antara KAO dan Kadar Serbuk Besi Optimum

Indikator <i>Marshall</i>	Syarat Spesifikasi	Satuan	Variasi Kadar Serbuk Besi		Persentase Kenaikan / Penurunan	Keterangan
			0%	13%		
Stabilitas	Min. 600	kg	2040,46	2091,9	2,52%	Kenaikan
Kelelahan (<i>Flow</i>)	Min. 3	mm	3,4	3,17	-6,76%	Penurunan
MQ	Min. 250	kg/mm	600,24	662,79	10,42%	Kenaikan
VIM	3-5	%	4,69	3,92	-16,42%	Penurunan
VMA	Min. 17	%	18,3	17,59	-3,88%	Penurunan
VFA	Min. 68	%	74,39	77,72	4,48%	Kenaikan

Sumber: Hasil Penelitian (2024)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, dapat ditarik beberapa kesimpulan. Pertama, Kadar Aspal Optimum (KAO) yang diperoleh dari variasi kadar aspal awal 5,9%, 6,9%, dan 7,9% pada Lataston lapis aus (HRS-WC) sebesar 7,5% dengan nilai rata-rata pada setiap indikator uji *Marshall* terhadap nilai KAO yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2). Kedua, Persentase optimum penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus dengan variasi 0%, 15%, 30%, dan 45% pada Lataston lapis aus (HRS-WC) yang telah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) yaitu sebesar 13% dan persentase maksimum sebesar 26%. Ketiga, penambahan serbuk besi sebagai substitusi agregat halus pada Lataston lapis aus (HRS-WC) mampu meningkatkan tingkat stabilitas, tetapi mengurangi rongga udara dan rongga antar agregat pada campuran aspal yang mengindikasikan campuran aspal bersifat lebih kedap dan plastis. Kondisi ini dapat menyebabkan campuran aspal pada perkerasan jalan mengalami *bleeding* apabila penambahan serbuk besi melebihi persentase maksimum yang telah ditentukan.

DAFTAR PUSTAKA

Aditama, Vega, Mohammad Erfan, and Afriza Marianti S. 2021. "The Effect Of Natural Rubber (Latex) Addition On Hrs-Wc Asphalt Mixing With Fly Ash As Filler." *International Journal of*

- Scientific & Technology Research* 10(05). <https://eprints.itn.ac.id/5551/>.
- Apriyanto, and Fakhrul Rozi Yamali. 2018. "Pengaruh Variasi Material Yang Bergradasi Senjang Pada Campuran Aspal Panas." *Jurnal Talenta Sipil* 1(2): 50.
- Bahri, Samsul, and Dwi Agust Susilo Irawan. 2010. "Pengaruh Limbah Serbuk Besi Sebagai Pengganti Sejumlah Agregat Halus Terhadap Campuran Aspal." *Jurnal Teknik Sipil Inersia* 1(2): 25–32. <https://ejournal.unib.ac.id/inersiajurnal/article/view/6691>.
- Devi, Umma Chintya, and Nur Azizah Affandy. 2021. "Penggunaan Limbah Serbuk Besi Sebagai Campuran Agregat Halus Pada Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)." *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil* 4(3): 533–44. <https://journal.untar.ac.id/index.php/jmts/article/view/11851>.
- L. Hendarsin, Shirley. 2000. *Penuntun Praktis Perencanaan Teknik Jalan Raya*. 1st ed. Bandung: Politeknik Negeri Bandung - Jurusan Teknik Sipil. <https://id.scribd.com/document/350343541/Shirley-L-Hendarsin-Penuntun-Praktis-Perencanaan-Teknik-Jalan-Raya>.
- Lestari, I Gusti Agung Ayu Istri. 2013. "Perbandingan Perkerasan Kaku Dan Perkerasan Lentur." *Jurnal Transportasi* 7(1): 128–34. <http://unmasmataram.ac.id/wp/wp-content/uploads/18.-I-Gusti-Agung-Ayu-Istri-Lestari.pdf>.
- Nahyo, Sudarno, and Bagus Hario Setiadji. 2015. "Durabilitas Campuran Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC) Akibat Rendaman Menerus Dan Berkalan Air Rob." 13(1): 124–35. <https://www.neliti.com/id/publications/143191/durabilitas-campuran-hot-rolled-sheet-wearing-course-hrs-wc-akibat-rendaman-mene>.
- Nur, Nur Khaerat et al. 2021. Yayasan Kita Menulis *Perancangan Perkerasan Jalan*. 1st ed. eds. Abdul Karim and Janner Simarmata. Yayasan Kita Menulis. <https://kitamenulis.id/2021/07/07/perancangan-perkerasan-jalan/>.
- Rahmanto, Adam Dwi, and Sri Wulandari. 2020. "Pengaruh Kandungan Mineral Pada Tanah Pasir Terhadap Nilai CBR Tanah." *Jurnal Jalan-Jembatan* 37(1): 28–35. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/928>.
- Rumagit, Stevan Estevanus Rein, Oscar H Kaseke, and N Palenewen, Steve Ch. 2017. "Pengaruh Energi Pemadatan Benda Uji Terhadap Besaran Marshall Campuran Beraspal Panas Bergradasi Senjang." *Jurnal Sipil Statik* 5(8): 533–40. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v2/index.php/jss/article/view/17640>.
- Sholichin, Ibnu, and Devi A. Utama. 2019. "Variations in the Addition of Polypropylene Fiber, Fly Ash and Immersion in Asphalt Mixtures on Stability and Flow." *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10(2): 2032–39. https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=VARIATIONS+IN+THE+ADDITION+OF+POLYPROPYLENE+FIBER%2C+FLY+ASH+AND+IMMERSION+IN+ASPHALT+MIXTURES+ON+STABILITY+AND+FLOW+Ibnu&btnG=.
- SNI 06-2489-1991. 1991. "Metode Pengujian Campuran Aspal Dengan Alat Marshall." *Badan Standardisasi Nasional* (1): 7.
- Sukirman, Silvia. 2010. *Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya*. 1st ed. ed. Sofyan Triana. Bandung: Nova. https://www.academia.edu/81267479/Perkerasan_lentur_jalan_raya_Sukirman.
- Sukirman, Silvia 2016. Institut Teknologi Nasional *Beton Aspal Campuran Panas*. 3rd ed. Bandung: Institut Teknologi Nasional. <http://ebook.itenas.ac.id/repository/9df74dd5f5afcf366e0fffb21e5a8a92.pdf>.
- Utomo, Nugroho, Iwan Wahjudijanto, and Fitri Sri Rizki Yasin. 2020. "PENGUNAAN LIMBAH SERBUK BESI SEBAGAI MATERIAL PENGISI (FILLER) PADA CAMPURAN STRUKTUR PERKERASAN JALAN KOLEKTOR PONCO – JATIROGO." *Jurnal Environtek* 12(2): 64–74. <https://www.semanticscholar.org/paper/PENGUNAAN-LIMBAH-SERBUK-BESI-SEBAGAI-MATERIAL-PADA-Utomo-Wahjudijanto/90744ac85c290d6c06604901fe842519218461bf>.