

KINERJA MARSHALL CAMPURAN HRS-WC MENGGUNAKAN BAHAN PENGGANTI *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH*

Desy Yofianti^{1*}, Muhammad Rizki Septiadi¹, dan Roby Hambali¹

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bangka Belitung, Kompleks Terpadu Universitas Bangka Belitung.

Balunujuk, Bangka

e-mail: desyyofianti@gmail.com

ABSTRAK

Hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap dapat berupa *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* maupun *bottom ash* dapat digunakan untuk campuran beton maupun campuran beraspal. Pada campuran beraspal, *fly ash* dapat digunakan sebagai *filler*, sedangkan *bottom ash* dapat digunakan sebagai alternatif pengganti agregat halus. Campuran beraspal yang menggunakan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai material pengganti tersebut bermacam-macam, diantaranya adalah *Asphalt Concrete Wearing Course*, *AC-Base*, *stone mastic asphalt* (SMA), dan *polymer-modified asphalt concrete mixtures*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja marshall dan menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) campuran HRS-WC dengan menggunakan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bahan pengganti. Jumlah benda uji sebanyak 75 buah dengan 5 kadar aspal, yaitu: 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5%. Variasi *fly ash* yang digunakan 0% dan 100%, sedangkan variasi *bottom ash* 0%, 50%, dan 100%. Kinerja marshall terdiri dari VIM (*Void In Mix*), VMA (*Void In the Mineral Agregate*), VFB (*Void Filled Bitumen*), stabilitas, *flow*, MQ (*marshall quotient*). Nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan dengan variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0% pada kadar aspal 6,5%, 7%, dan 7,5% serta Variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% dengan kadar aspal 7,5%. Pada semua variasi campuran HRS-WC mengalami penurunan setiap bertambahnya persentase kadar aspal. Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) diperoleh untuk variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0% sebesar 7 %; *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% sebesar 7,5%, sedangkan untuk variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 100%; *fly ash* 100% + *bottom ash* 50%, dan *fly ash* 100% + *bottom ash* 100% tidak diperoleh nilai KAO karena ada beberapa nilai kinerja marshall yaitu nilai VIM dan VFB yang tidak memenuhi persyaratan.

Kata kunci: HRS-WC, Fly Ash, Bottom Ash, Kinerja Marshall. Kadar Aspal Optimum

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur yang sangat berperan penting bagi masyarakat adalah jalan. Jalan yang baik adalah jalan yang tidak memiliki tingkat kerusakan atau kerusakan jalan yang terjadi sangat kecil (termasuk kerusakan ringan) (Yofianti, et al., 2024; Yofianti and Muradi, 2023). Pembangunan maupun pemeliharaan jalan memerlukan material yang baik sehingga menghasilkan jalan yang berkualitas. Selain itu, faktor pelaksanaan dan pengawasan pekerjaan turut menentukan kualitas jalan yang dihasilkan.

Hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap dapat berupa *fly ash* dan *bottom ash* (Mohammed, et al. (2025); Yofianti and Yuukho, 2019). *Fly ash* maupun *bottom ash* dapat digunakan untuk campuran beton maupun campuran beraspal. Pada campuran beraspal, *fly ash* dapat digunakan sebagai *filler*, sedangkan *bottom ash* dapat digunakan sebagai alternatif pengganti agregat halus (Mohammed, et al., 2025; Sun, et al., 2025; Kim, et al., 2024; Yofianti dan Aswadi, 2023). Campuran beraspal yang menggunakan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai material pengganti tersebut bermacam-macam, diantaranya adalah *Asphalt Concrete Wearing Course* (Al qurny, dkk., 2022; Rachman, dkk., 2022; Hasmiaati dan Arsyad, 2014; Rohmatulloh, 2018); Prayoga, dkk., 2020), *AC-Base* (Surianti dan Agus, 2020), *stone mastic asphalt* (SMA) (Mohammed, et al., 2025), *polymer-modified asphalt concrete mixtures* (Kim, et al., 2024).

Keuntungan dari penggunaan *fly ash* maupun *bottom ash* pada perkerasan jalan, yaitu: memberikan dampak yang besar terhadap pengurangan kedalaman alur pada perkerasan jalan (Sun, et al, 2025), meningkatkan kinerja dan umur perkerasan jalan (Kim, et al., 2024), dan meningkatkan nilai stabilitas jalan (Yofianti dan Aswadi, 2023).

Filler pada campuran beraspal panas sangat mempengaruhi dari sifat aspal tersebut sebagai bahan pengikat (Nofrianto, dkk, 2021). *Filler* adalah bahan yang lolos saringan nomor 200 (0,075mm) tidak kurang dari 75% terhadap beratnya dan berfungsi untuk mengisi ruang atau rongga antar butiran agregat kasar dan halus (Direktorat Jendral Bina Marga, 2020).

Bottom ash mempunyai ukuran partikel yang lebih besar dan berat daripada *fly ash*. *Fly ash* mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan bersifat *pozzolanic*. *Fly ash* memiliki kandungan alumina (Al_2O_3), kalsium oksida (CaO), fero oksida (Fe_2O_3), dan silika (SiO_2) (Yofianti and Yukho, 2019). *Fly ash* dalam penggunaannya relatif lebih murah dibandingkan semen (Nofrianto, dkk, 2021). Pada PLTU Air Anyir yang berada di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan mencapai 35.000 ton (Yofianti and Yukho, 2019). Banyaknya limbah batu bara yang penanganannya kurang maksimal diharapkan bisa menjadi salah satu bahan alternatif yang dapat dimanfaatkan dalam campuran beraspal (Yofianti and Yukho, 2019).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja marshall campuran laston lapis aus dengan

menggunakan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bahan pengganti pada campuran HRS-WC dan menentukan nilai Kadar Aspal Optimun (KAO) pada campuran HRS-WC menggunakan variasi persentase *fly ash* dan *bottom ash*.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan *fly ash* dan *bottom ash* yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Air Anyir, Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Variasi penggunaan *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus adalah 0%, 50%, dan 100%, sedangkan variasi *fly ash* sebagai *filler* yaitu: 0% dan 100%. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70. Variasi persentase kadar aspal, antara lain: 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5%. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada Direktorat Jendral Bina Marga Tahun 2020.

Hot Roll Sheet-Wearing Course (HRS-WC)

HRS-WC berfungsi sebagai lapisan kedap air dan mempunyai kehalusan permukaan. Berdasarkan Direktorat Jendral Bina Marga (2020), Lataston memiliki ketentuan-ketentuan sifat yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketentuan sifat-sifat campuran lataston

Sifat-sifat campuran		Lataston Lapis Aus (HRS-WC)
Kadar aspal efektif (%)	Min	5,9
Jumlah tumbukan per bidang		50
Rongga dalam campuran (%)	Min	3,0
	Maks	5,0
Rongga dalam Agregat (VMA)	Min	17
Rongga terisi aspal (%)	Min	68
Stabilitas Marshall (kg)	Min	600
Marshall Quotient (kg/mm)	Min	250

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2020)

Pengujian Agregat Kasar

Pada penelitian ini pengujian yang dilakukan pada agregat kasar adalah pengujian analisis saringan, keausan, dan penyerapan. Standar ketentuan pemeriksaan agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini

Tabel 2. Standar Pemeriksaan Agregat Kasar

No	Jenis pengujian	Standar uji
1	<i>Los Angeles Test</i>	SNI 03-2417:2008
2	Berat jenis (Berat jenis <i>Bulk</i> , Berat jenis SSD dan Berat jenis Semu) serta penyerapan air agregat kasar	SNI 03-1969-2016

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2020)

Pengujian Agregat Halus

Pengujian yang dilakukan pada agregat halus yakni pengujian analisis saringan dan penyerapan air. Standar ketentuan pemeriksaan agregat halus dijabarkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Standar Pemeriksaan Agregat Halus

No	Jenis pengujian	Standar uji
1	Analisis Saringan	SNI ASTM C136:2021
2	Berat jenis (Berat jenis <i>Bulk</i> , Berat jenis SSD dan Berat jenis Semu) serta penyerapan air agregat halus	SNI 03-1970-2016

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2020)

Gradasi Agregat

Gradasi adalah persentase pembagian ukuran butiran batu yang akan digunakan pada suatu konstruksi. Gradasi agregat akan mempengaruhi rongga antar butir agregat yang akan menentukan stabilitas pada campuran beraspal. Gradasi agregat dapat dinyatakan dengan tabel gradasi yang sekurang-kurangnya dapat membuat ukuran atau nomor saringan dan persentase berat lolos saringan. Dalam penelitian ini menggunakan campuran aspal *Hot Roll Sheet* (HRS), gradasi agregat gabungan untuk campuran aspal *Hot Roll Sheet* (HRS) dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Gradasi agregat gabungan untuk campuran lapis beton aspal

Ukuran Ayakan		Jumlah Persentase yang lolos (%)
ASTM	1)	Lataston (HRS) WC
3/4"		
1/2"	;	100
3/8"		35
No.8	;	72
No.30	0	50
No.200	5	

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2020).

Pengujian Aspal

Pengujian yang dilakukan pada aspal yakni pengujian penetrasi, titik lembek, daktilitas, berat jenis aspal, serta titik nyala dan titik bakar. Standar ketentuan pemeriksaan agregat aspal pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Standar Pemeriksaan aspal

No	Jenis pengujian	Standar uji
1	Penetrasi 25°C (min)	SNI 2456:2011
2	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:211
3	Berat Jenis	SNI 2441:2011

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2020)

Kebutuhan Benda Uji

Jumlah tumbukkan sesuai dengan campuran aspal yang digunakan yaitu sebanyak 50 kali setiap sisi mol dan didiamkan selama 12 jam. Pada penelitian ini kebutuhan benda uji dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Kebutuhan Benda Uji

No	Variasi Campuran HRS-WC	Kadar Aspal					Jumlah
		Pb-0,1	Pb-0,5	Pb	Pb+0,5	Pb+1	
1	FA 0% + BA 0%	3	3	3	3	3	15
2	FA 0% + BA 50%	3	3	3	3	3	15
3	FA 0% + BA 100%	3	3	3	3	3	15
4	FA 100% + BA 50%	3	3	3	3	3	15
5	FA 100% + BA 100%	3	3	3	3	3	15
Jumlah benda uji keseluruhan							75

Pengujian Marshall

Pengujian campuran HRS-WC menggunakan alat uji *Marshall*. Ada 2 bagian pada pengujian *Marshall*, yaitu: Pengujian ini dilakukan untuk menentukan nilai stabilitas terhadap *flow* pada campuran aspal sesuai dengan prosedur SNI 06-2489-1991.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Agregat Kasar

Pengujian agregat kasar yang dilakukan terdiri dari pengujian keausan agregat menggunakan mesin *los angeles*, pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air. Hasil pengujian agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Pengujian	Standar Pengujian	Persyaratan		Hasil	Satuan
			Min	Max		
1	Berat jenis kering (<i>Bulk</i>)	SNI-03-1969-2016	2,5	-	2,619	
	Berat jenis kering permukaan (<i>SSD</i>)		2,5	-	2,656	
	Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)		2,5	-	2,719	
	Berat jenis <i>Effektif</i>		-	-	2,669	
	Penyerapan air		-	3	1,409	%
2	Keausan agregat	SNI 2417-2008	-	40	22,46	%

Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai berat jenis (*Bulk*), berat jenis kering permukaan (*SSD*), berat jenis semu (*Apparent*), dan berat jenis efektif agregat kasar telah memenuhi persyaratan yang telah ditentukan yaitu minimal 2,5. Nilai penyerapan air yang didapatkan sebesar 1,409% telah memenuhi persyaratan yaitu maksimal 3% dan untuk nilai keausan agregat sebesar yaitu 22,46% telah memenuhi persyaratan yaitu maksimal 40%.

Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian agregat kasar yang dilakukan yaitu pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air. Data hasil pengujian agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian	Standar Pengujian	Persyaratan		Hasil	Satuan
		Min	Max		
Berat jenis kering (<i>Bulk</i>)	SNI -03-1970-2016	2,5	-	2,585	
Berat jenis kering permukaan (<i>SSD</i>)		2,5	-	2,611	
Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)		2,5	-	2,655	
Berat jenis <i>Effektif</i>		-	-	2,620	
Penyerapan air		-	3	1,022	%

Berdasarkan Tabel 8, didapatkan nilai berat jenis (*Bulk*), berat jenis kering permukaan (*SSD*), berat jenis semu (*Apparent*), dan berat jenis efektif agregat kasar masing-masing sebesar 2,585; 2,611; 2,655; dan 2,620. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan yang telah ditentukan yaitu minimal 2,5. Nilai penyerapan air yang didapatkan sebesar 1,022% telah memenuhi persyaratan yaitu maksimal 3%.

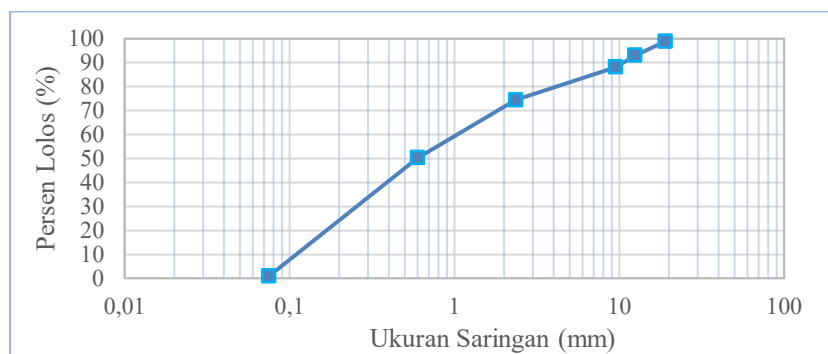
Hasil Pengujian *Bottom Ash*

Data hasil pengujian *bottom ash* sebagai agregat halus meliputi analisis saringan, pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Pengujian *Bottom Ash*

Pengujian	Standar Pengujian	Persyaratan		Hasil	Satuan
		Min	Max		
Berat jenis kering (<i>Bulk</i>)	SNI-03-1970-2016	2,5	-	2,502	
Berat jenis kering permukaan (<i>SSD</i>)		2,5	-	2,569	
Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)		2,5	-	2,681	
Berat jenis <i>Effektif</i>		-	-	2,592	
Penyerapan air		-	3	2,667	%

Berdasarkan Tabel 9 didapatkan nilai berat jenis (*Bulk*), berat jenis kering permukaan (*SSD*), berat jenis semu (*Apparent*), dan berat jenis efektif agregat kasar masing-masing sebesar 2,502; 2,569; 2,681; dan 2,592. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan yang telah ditentukan yaitu minimal 2,5. Nilai penyerapan air yang didapatkan sebesar 2,667% telah memenuhi persyaratan yaitu maksimal 3%. Grafik analisis saringan ditunjukkan pada Gambar 1.



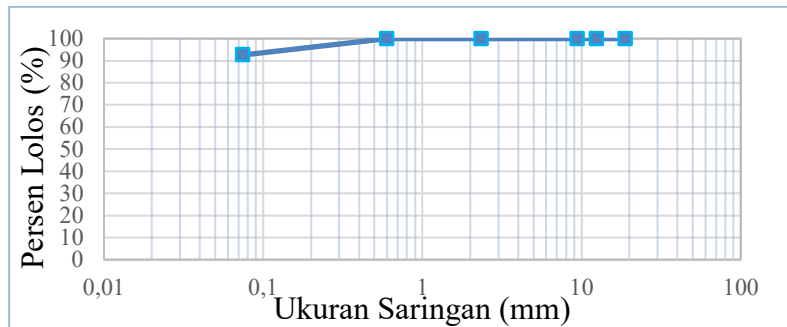
Gambar 1. Grafik Analisis Saringan *Bottom Ash*

Hasil Pengujian *Filler* Abu Batu

Pengujian *filler* abu batu yang dilakukan yaitu pemeriksaan berat jenis abu batu menggunakan metode SNI-1964-2008. Dari hasil pengujian ini diperoleh nilai berat jenis sebesar 2,66.

Hasil Pengujian *Filler Fly Ash*

Pengujian *filler fly ash* yang dilakukan analisis saringan dan berat jenis menggunakan metode SNI-1964-2008. Dari hasil pengujian ini diperoleh nilai berat jenis sebesar 2,5. telah memenuhi Spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga (2020) minimal 2,5. Grafik hasil analisis saringan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Analisis Saringan *Fly Ash*

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian analisis saringan *fly ash* sebagai substitusi *filler* yang lolos saringan No. 200 sebesar 92,62 %.

Hasil Pengujian Aspal

Pengujian aspal penetrasi 60/70 yang dilakukan meliputi pengujian penetrasi, titik leleh dan berat jenis. Hasil pengujian aspal dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Data Hasil Pengujian Aspal penetrasi 60/70

No	Pengujian	Standar Pengujian	Persyaratan		Hasil	Satuan
			Min	Max		
1	Penetrasi	SNI 06-2456-2011	60	70	63,58	mm
2	Titik Lembek (<i>ring and ball</i>)	SNI 06-2434-2011	≥ 48	-	51,5	°C
3	Berat Jenis	SNI 06-2441-2011	≥ 1	-	1,029	

Tabel 10 menunjukkan nilai penetrasi sebesar 63,58 mm yang memenuhi persyaratan dengan rentang 60-70 mm. Nilai titik leleh sebesar 51,5 °C serta nilai berat jenis 1,029 telah memenuhi Spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga Tahun 2020.

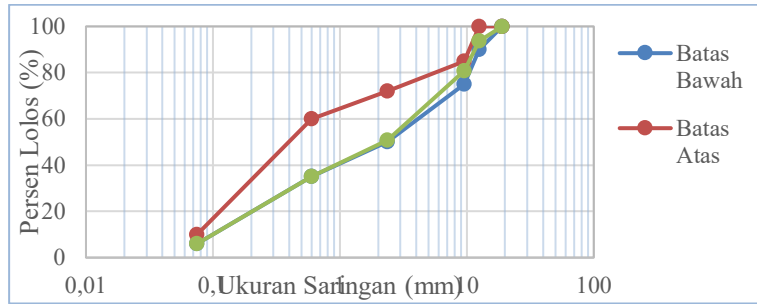
Analisis Saringan Gabungan Agregat

Hasil analisis gradasi campuran agregat dapat dilihat pada Tabel 11 dan Gambar 3.

Tabel 11. Hasil Analisis Saringan Gabungan Agregat

No. Saringan (inci)	Berat Tertahan (gram)	Komulatif Tertahan		Gradasi % Lolos	Spesifikasi	
		Berat (gram)	%		Min	Max
3/4"	0,0	0,0	0,000	100,000	100	100
1/2"	71,1	71,1	6,253	93,747	90	100
3/8"	146,7	217,8	19,156	80,844	75	85
No.8	341,8	559,6	49,217	50,783	50	72
No.30	179,0	738,6	64,960	35,040	35	60
No.200	330,1	1068,7	93,993	6,007	6	10
Pan	68,3	1137,0	100,000	0,000		
Total	1137,0					

Sumber: Hasil Pengujian, 2024



Gambar 3. Grafik Analisis Saringan Gabungan Agregat

Tabel 11 menunjukkan nilai gradasi persen lolos telah memenuhi Spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga (2020). Gambar 3 menyajikan grafik hasil gradasi campuran yang berada diantara nilai batas bawah dan batas atas.

Analisis Kinerja Marshall Campuran HRS-WC

Pengujian *marshall* pada campuran HRS-WC dengan *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus dan *fly ash* sebagai *filler*, dan terdiri dari beberapa parameter, yaitu kepadatan (*density*), *Void In Mix* (VIM), *Void In Minerall Agregate* (VMA), *Void Filled Bitumen* (VFB), stabilitas, kelelahan (*flow*), dan *marshall quotient* (*MQ*). Hasil data pengujian *marshall* pada campuran HRS-WC menggunakan *bottom ash* dan *fly ash* disajikan pada Tabel 12 sampai Tabel 16.

Tabel 12. Hasil Analisis Campuran HRS-WC dengan *Fly Ash* 0% dan *Bottom ash* 0%

Karakteristik Marshall	Satuan	Standar mutu	Kadar Aspal				
			5,5	6	6,5	7	7,5
Density	%	-	2,284	2,283	2,301	2,297	2,316
VIM	%	3-5.	6,567	5,983	4,649	4,199	2,806
VMA	%	Min. 17	16,805	17,217	16,967	17,484	17,187
VFB	%	Min. 68	60,933	65,299	72,619	76,038	83,686
Sabilitas	kg	Min.600	3581,526	2768,505	2629,001	2660,912	2932,319
Flow	mm	2-4.	2,76	2,78	2,57	3,23	4,54
<i>MQ</i>	kg/mm	Min. 250	1355,541	1034,270	1032,352	826,506	649,308

Pada Tabel 12 bahwa kadar aspal 7% telah memenuhi persyaratan yang ditentukan oleh Direktorat Jendral Bina Marga (2020).

Tabel 13. Hasil Analisis Campuran HRS-WC dengan *Fly Ash* 0% dan *Bottom ash* 50%

Karakteristik Marshall	Satuan	Standar mutu	Kadar Aspal				
			5,5	6	6,5	7	7,5
Density	%	-	2,175	2,208	2,230	2,258	2,281
VIM	%	3-5.	11,030	9,095	7,581	5,853	4,272
VMA	%	Min. 17	20,779	19,957	19,520	18,908	18,436
VFB	%	Min. 68	46,922	54,436	61,166	69,053	76,836
Sabilitas	kg	Min.600	2153,757	2561,267	2294,267	2210,897	2555,036
Flow	mm	2-4.	2,79	2,61	2,66	2,59	2,94
<i>MQ</i>	kg/mm	Min. 250	783,592	994,916	861,780	879,614	892,903

Sumber: Hasil Pengujian, 2024

Pada Tabel 13 menunjukkan bahwa kadar aspal 7,5% telah memenuhi persyaratan yang ditentukan oleh Direktorat Jendral Bina Marga (2020).

Tabel 14. Hasil Analisis Campuran HRS-WC dengan *Fly Ash* 0% dan *Bottom ash* 100%

Karakteristik Marshall	Satuan	Standar mutu	Kadar Aspal				
			5,5	6	6,5	7	7,5
Density	%	-	2,029	2,058	2,066	2,074	2,094
VIM	%	3-5.	17,008	15,276	14,376	13,502	12,153
VMA	%	Min. 17	26,102	25,400	25,437	25,497	25,151
VFB	%	Min. 68	34,859	39,943	43,538	47,059	51,715
Sabilitas	kg	Min.600	1706,288	1756,401	2546,487	1936,703	1726,929
Flow	mm	2-4.	2,41	2,57	2,52	2,12	2,25
<i>MQ</i>	kg/mm	Min. 250	706,385	683,211	1011,095	911,195	765,095

Sumber: Hasil Pengujian, 2024

Pada Tabel 14 menunjukkan bahwa pada kadar aspal 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% terdapat nilai VIM dan nilai VFB tidak memenuhi persyaratan yang ditentukan oleh Direktorat Jendral Bina Marga (2020). Nilai VIM dan VFB tidak memenuhi disebabkan *bottom ash* yang memiliki penyerapan air yang tinggi.

Tabel 15. Hasil Analisis Campuran HRS-WC dengan *Fly Ash* 100% dan *Bottom ash* 50%

Karakteristik Marshall	Satuan	Standar mutu	Kadar Aspal				
			5,5	6	6,5	7	7,5
Density	%	-	2,179	2,199	2,225	2,232	2,263
VIM	%	3-5.	10,859	9,435	7,801	6,937	5,057
VMA	%	Min. 17	20,626	20,257	19,712	19,842	19,105
VFB	%	Min. 68	47,360	53,434	60,429	65,060	73,530
Sabilitas	kg	Min.600	2933,893	2943,513	3066,882	2767,574	2700,153
Flow	mm	2-4.	2,94	2,36	2,32	2,75	2,86
<i>MQ</i>	kg/mm	Min. 250	1023,982	1253,359	1321,826	792,456	955,478

Sumber: Hasil Pengujian, 2024

Pada Tabel 15 menunjukkan persentase kadar aspal 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% untuk nilai VIM tidak memenuhi persyaratan. Selain itu, pada persentase kadar aspal 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% untuk nilai VFB yang tidak memenuhi, hal ini disebabkan *bottom ash* memiliki daya serap air yang tinggi.

Tabel 16. Hasil Analisis Campuran HRS-WC dengan *Fly Ash* 100% dan *Bottom ash* 100%

Karakteristik Marshall	Satuan	Standar mutu	Kadar Aspal				
			5,5	6	6,5	7	7,5
Density	%	-	2,008	2,019	2,039	2,067	2,074
VIM	%	3-5.	17,835	16,847	15,518	13,800	12,983
VMA	%	Min. 17	20,626	20,257	19,712	19,842	19,105
VFB	%	Min. 68	33,546	37,098	41,293	46,430	49,797
Sabilitas	kg	Min.600	2518,291	2413,030	2777,785	2846,092	2480,794
Flow	mm	2-4.	3,35	3,10	2,83	3,37	2,95
<i>MQ</i>	kg/mm	Min. 250	751,358	793,267	1019,262	858,650	840,570

Sumber: Hasil Pengujian, 2024

Pada Tabel 16 menunjukkan persentase kadar aspal 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% untuk nilai VIM dan nilai VFB yang tidak memenuhi persyaratan.

Analisis Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal Optimum (KAO) merupakan nilai yang dari rentang kadar aspal yang memenuhi semua persyaratan

dengan parameter *marshall*. Kadar aspal optimum yang baik adalah kadar aspal yang memenuhi semua parameter *marshall* dalam rentang kadar aspal $\pm 0,5\%$. Rekapitulasi Kadar Aspal Optimum (KAO) pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17 Nilai KAO pada campuran HRS-WC dengan menggunakan *bottom ash* dan *fly ash*

No	Jenis Campuran	Nilai KAO %	Keterangan
1	Fa 0% + Ba 0%	7	Memenuhi Spesifikasi
2	Fa 0% + Ba 50%	7,5	Memenuhi Spesifikasi
3	Fa 0% + Ba 100%	-	Tidak Memenuhi Spesifikasi
4	Fa 100% + Ba 50%	-	Tidak Memenuhi Spesifikasi
5	Fa 100% + Ba 100%	-	Tidak Memenuhi Spesifikasi

Sumber: Hasil Pengujian, 2024

Berdasarkan Tabel 17 dapat disimpulkan bahwa campuran beraspal menggunakan variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0% dan *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% yang memenuhi nilai kinerja *marshall* sesuai spesifikasi Direktorat Jendral Bina Marga (2020) pada kadar aspal tertentu. Nilai KAO untuk campuran aspal HRS-WC menggunakan variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0% sebesar 7%, sedangkan pada variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% sebesar 7,5%. Penentuan nilai kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan lima variasi kadar aspal yang memenuhi persyaratan pada semua kinerja *marshall*, setelah itu menentukan garis batas kiri dan batas kanan pada semua karakteristik *marshall* yang memenuhi persyaratan lalu menentukan garis tengah yang menjadi nilai kadar aspal optimum, maka diperoleh nilai kadar aspal optimum (KAO) pada campuran HRS-WC.

4. KESIMPULAN

Kinerja *marshall* terdiri dari VIM (*Void In Mix*), VMA (*Void In the Mineral Agregate*), VFB (*Void Filled Bitumen*), stabilitas, *flow*, MQ (*marshall quotient*). Nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan dengan variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0%y pada kadar aspal 6,5%, 7%, dan 7,5% serta Variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% dengan kadar aspal 7,5%. Pada semua variasi campuran HRS-WC mengalami penurunan setiap bertambahnya persentase kadar aspal. Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) diperoleh untuk variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 0% sebesar 7 %; *fly ash* 0% + *bottom ash* 50% sebesar 7,5%, sedangkan untuk variasi *fly ash* 0% + *bottom ash* 100%; *fly ash* 100% + *bottom ash* 50%, dan *fly ash* 100% + *bottom ash* 100% tidak diperoleh nilai KAO karena ada beberapa nilai kinerja marshal yaitu nilai VIM dan VFB yang tidak memenuhi persyaratan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Qurny, A. U., Puspito, I. H., dan Tinumbia, N. (2022). Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi (Filler) Fly Ash Terhadap Campuran Aspal Beton Lapis Aus (Asphalt Concrete Wearing Course/AC-WC), *Jurnal Artesis*, Vol. 2(1), 87-97
- Anshar, N., Saleh, S. M., Fisaini, J. (2023). Karakteristik Campuran Aspal Beton Menggunakan Coal Bottom Ash dengan Persentase 0%, 5%, dan 10% Sebagai Substitusi Agregat Halus, *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil*, Vol. 5(1), 85-91
- Badan Standarisasi Nasional. (1991). *SNI 06-2489-1991, Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall*, Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6723-2002, Spesifikasi Bahan Pengisi untuk Campuran Beraspal*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional,. (2002). *SNI 03-6819-2002, Spesifikasi Agregat Halus untuk Campuran Perkerasan Beraspal*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2008). *SNI 2417:2008, Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 2432:2011, Cara Uji Daktilitas Aspal*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 2434:2011, Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 2433:2011, Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal dengan Alat Cleveland Open Cup*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 2441:2011, Cara Uji Berat Jenis Aspal*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 2456:2011, Cara Uji Penetrasi Aspal*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C136:2012, Metode Uji untuk Analisa Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar (ASTM C 136-06, IDT)*, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 1969:2016, Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*,

Jakarta

- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1970:2016, Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*, Jakarta
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Hasmiati dan Arsyad, L. O. M. N. (2014). Mix Design Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan Menggunakan Fly Ash Batu Bara Sebagai Pengganti Filler, *Jurnal Stabilita*, Vol. 2
- Irfansyah, P. A., Setyawan, A., dan Djumari. (2017). Karakteristik Marshall Pada Campuran Aspal Beton Menggunakan Daspal Sebagai Bahan Pengikat. *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*
- Kim, Y.M., Kim, K., and Le T.H.M. (2024). Advancing Sustainability and Performance with Crushed Bottom Ash as Filler in Polymer- Modified Asphalt Concrete Mixtures, *Polymers (Basel)*, 16(12), 1683, doi: [10.3390/polym16121683](https://doi.org/10.3390/polym16121683)
- Mohammed, S.A.; Koting, S.; Babalghaith, A.M.; Isa, M.H.M.; Khairuddin, F.H. Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregate Replacement on the Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt. *Appl. Sci.* **2025**, *15*(12), 826; <https://doi.org/10.3390/app15126826>
- Nofrianto, H., Wahab, W., Syofian, N., dan Wardi, S. (2021). Kajian Bahan Pengisi (Filler) pada Campuran Panas Aspal Agregat (AC-BC) Dengan Pengujian Marshall, *Jurnal Penelitian Menara Ilmu*, Vol. 15(1)
- Prayoga, D., Winarto, S., dan Cahyo, Y. (2020). Penelitian Campuran Lataston AC-WC Dengan Menggunakan Agregat Halus Limbah Batubara, *Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik sipil*, Vol. 3 (1)
- Rachman, D. N., Riwayati, S., Sirait, D. R., dan Arfan, M. (2022). Penambahan Fly Ash Batu Bara PLTU Sebagai Filler Aspal AC WC, *Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, Vol. 7(4)
- Santoso, I., Roy, S. K., Patrick., dan Andarias. (2003). Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton, *Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 5 (2)
- Surianti, S dan Agus, I. (2020). Analisis Pengaruh Fly Ash Sebagai Filler pada Campuran Hot Mix Asphlat untuk Lapis Perkerasan AC-base, *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil Unidayan*, Vol. 9(2), 83-88
- Sun, Y., Ji, L., Liao, J. *et al.* (2025). Performance analysis and prediction of asphalt pavement containing municipal solid waste incineration bottom ash aggregate based on MEPDG. *Sci Rep* **15**, 7597, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91686-6>
- Yofianti, D., Wardanti, A., and Fahriani, F. (2024). Relationship between soil conditions and road quality degradation, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **1419** 012070 DOI 10.1088/1755-1315/1419/1/012070
- Yofianti, D. dan Aswadi, M. (2023). Campuran Beraspal HRS-WC Menggunakan Bottom Ash PLTU Air Anyir Sebagai Filler, *Jurnal Berkala Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi*, Vol. 1(1), 169-177
- Yofianti, D. and Yukho, H.A. (2019). Utilization of FABA Waste from coal combustion at the PLTU Air Anyir as an alternative to local construction materials, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **353** 012027 DOI 10.1088/1755-1315/353/1/012027
- Yofianti, D. and Muradi, D. (2023). Investigation of subgrade conditions on the Airbara – Toboali road section to improve road quality, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **1267** 012104 DOI 10.1088/1755-1315/1267/1/012104