

**KARAKTERISTIK CAMPURAN HRS-WC (*HOT ROLLED SHEET-WEARING COURSE*)
DENGAN SUBSTITUSI AGREGAT HALUS MENGGUNAKAN IBA (*INCINERATOR
BOTTOM ASH*)**

**I Gusti Raka Purbanto¹, Putu Kwintaryana Winaya¹, I Nyoman Arya Thanaya¹,
dan I Made Adi Paramarta¹**

¹*Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jl Raya Kampus
Unud, Jimbaran, Bali*

Email: rakapurbanto@gmail.com

ABSTRAK: Insinerator merupakan teknologi pembakaran sampah yang menghasilkan residu berupa IBA (*incinerator bottom ash*), bila terakumulasi dalam jumlah banyak dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. IBA dapat dimanfaatkan sebagai agregat substitusi campuran aspal yang umumnya menggunakan agregat alam yang dalam jangka panjang ketersediaannya akan habis. Penelitian ini menggunakan IBA sebagai substitusi agregat halus pada campuran HRS-WC dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik campuran pada substitusi 25%; 50%; dan 100% IBA berdasarkan volume kemudian dibandingkan dengan spesifikasi. IBA diayak terlebih dahulu lalu dipakai ukuran lolos saringan 4,75 mm tertahan 0,075 mm. Sampel diproduksi dan diuji secara *Marshall*. Hasil menunjukkan karakteristik campuran dengan disubstitusi IBA 25%, 50%, dan 100% berturut-turut adalah kepadatan: 2,150, 2,082, 1,583; stabilitas tertinggi: 2804,164 kg, 2480,607 kg, 1143,236 kg; rentang *flow*: 2,709–4,064 mm, 3,387–4,487 mm, 3,556–5,080 mm; MQ: 857,982 kg/mm, 637,194 kg/mm, 275,584 kg/mm. VIM memenuhi spesifikasi pada substitusi 25% dan 50% IBA yaitu pada kadar aspal 8,1–9,0% dan 8,7–9,0%. VMA memenuhi pada semua variasi ($\geq 18\%$). VFB hanya memenuhi pada substitusi 25% dan 50% IBA pada kadar aspal 8,2–9,0% dan 8,8–9,0%. KAO pada campuran disubstitusi 25% dan 50% IBA didapat 8,6% dan 8,9%, sedangkan pada substitusi 100% IBA tidak dapat ditentukan. Berdasarkan pengujian *Cantabro*, campuran disubstitusi 25% dan 50% IBA pada KAO diperoleh hasil 2,01% dan 2,65%.

Kata kunci: IBA, HRS-WC, Marshall, Cantabro

***CHARACTERISTICS OF HOT ROLLED SHEET-WEARING COURSE (HRS-WC)
WITH FINE AGGREGATE SUBSTITUTION USING
INCINERATOR BOTTOM ASH (IBA)***

ABSTRACT: An incinerator is waste burning technology that produces residue in form of IBA (*incinerator bottom ash*), if it is accumulated massively it could pollute the environment. IBA can be used as an substitute aggregate for asphalt mixtures that generally use natural aggregates, which will run out of availability during the long term. This research using IBA as a substitute for fine aggregate in the HRS-WC and aimed to know the mixture characteristics at IBA substitution of 25%; 50%; and 100% based on volume and then compared to specifications. IBA was sieved and then used a size of passed 4,75 mm retained 0,075 mm. Samples were produced and tested on *Marshall*. The results showed of mixture characteristics with substituted IBA 25%, 50%, and 100% respectively were density: 2,150, 2,082, 1,583; highest stability: 2804,164 kg, 2480,607 kg, 1143,236 kg; flow range: 2,709– 4,064 mm, 3,387–4,487 mm, 3,556–5,080 mm; MQ: 857,982 kg/mm, 637,194 kg/mm, 275,584 kg/mm. VIM was fulfilled the specifications for the substitution of 25% and 50% IBA in asphalt content of 8,1-9,0% and 8,7-9,0%. VMA complied with all variations ($\geq 18\%$). VFB only fulfilled the substitution of 25% and 50% IBA at 8,2–9,0% and 8,8–9,0% asphalt content. The optimum of asphalt content in the mixture substituted with 25% and 50% IBA was obtained 8,6% and 8,9%, meanwhile at 100% substitution IBA could not be determined. Based on *Cantabro* test, the mixture substituted 25% and 50% IBA in optimum of asphalt content showed the results of 2,01% and 2,65%, respectively.

Keywords: IBA, HRS-WC, Marshall, Cantabro

PENDAHULUAN

Insinerator merupakan teknologi pembakaran sampah yang beroperasi dengan cara oksidasi pada suhu tinggi (insinerasi) (Khairuna et al., 2017). Hasil pembakaran dari insinerator menghasilkan residu berupa FABAs (*fly ash & bottom ash*) dan *flue gas* (Yuliani, 2016). Residu abu bawah insinerator atau *incinerator bottom ash* (IBA) yang dihasilkan dari pembakaran sampah sebesar 80% sampai 90% terhadap massa total residu, sisanya adalah abu terbang (*fly ash*) dan gas buangan lainnya (Lam et al., 2010). Residu yang dihasilkan ini tidak dapat langsung dibuang ke tempat penimbunan/*landfill* karena mengandung zat berbahaya terutama residu hasil pembakaran limbah medis (Khairuna et al., 2017).

Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Mengwitani di Kabupaten Badung, Bali, menggunakan 2 buah insinerator sebagai alat pengolahan sampah utama dengan kapasitas pembakaran 2000 kg per hari. Sejalan ini IBA yang dihasilkan insinerator ditempatkan di sekitar area TPST dan belum ada pengolahan lebih lanjut. IBA yang dibuang ke lingkungan dapat menyebabkan pencemaran mengingat residu dari insinerator mengandung zat berbahaya, sehingga diperlukan inovasi yang memanfaatkan IBA salah satunya sebagai bahan baku material (Khairuna et al., 2017).

Hot Rolled Sheet (HRS) atau Lapisan Tipis Aspal Beton (Lataston) adalah campuran beraspal panas dengan menggunakan gradasi agregat senjang (Lusyana et al., 2021). Penggunaan agregat pada campuran ini biasanya berasal dari alam, dimana dalam jangka panjang ketersediaannya akan habis karena tidak dapat diperbaharui (Gunandi et al., 2013). Berdasarkan hal tersebut, penggunaan material alternatif diperlukan sebagai pengganti agregat alam, namun tetap memperhatikan karakteristik campuran yang akan dihasilkan.

Penggunaan IBA sebagai substitusi agregat halus dalam campuran HRS-WC merupakan salah satu solusi untuk memanfaatkan residu dari insinerator sebagai bahan baku material. Penggunaan IBA sebagai agregat juga menjadi salah satu solusi material alternatif untuk mengurangi penggunaan agregat yang berasal dari alam.

Pada penelitian ini, campuran yang digunakan adalah HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi IBA sebesar 25%, 50%, dan 100% berdasarkan volume. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik material IBA (berat jenis dan penyerapannya), serta untuk menganalisis karakteristik campuran HRS-WC dengan substitusi agregat halus memakai IBA yang dibandingkan dengan Spesifikasi Pekerjaan Umum 2018.

Incinerator Bottom Ash (IBA)

Incinerator bottom Ash (IBA) adalah bahan butiran yang merupakan produk samping industri yang dihasilkan dari pembakaran limbah domestik menggunakan insinerator. Potensi pemanfaatan penggunaan material ini pada bidang konstruksi jalan adalah sebagai pengganti agregat alami konvensional (Becquart et al., 2009). IBA yang dihasilkan oleh insinerator sebesar 80% sampai 90% terhadap massa dan sisanya adalah abu terbang (*fly ash*) dan gas buangan lainnya (Lam et al., 2010). Sifat dan karakteristik IBA sangat bergantung pada komposisi limbah yang dibakar, yang secara langsung dipengaruhi oleh kebiasaan masyarakat, perekonomian, dan teknologi yang digunakan (Vaitkus et al., 2018).

IBA biasanya mengandung slag, kaca, dan sisa pembakaran organik. IBA secara umum merupakan *coarse sandy* dengan ukuran partikel bervariasi antara 0,1 mm hingga 100 mm. Penggunaan saringan dapat dilakukan untuk mengeliminasi fraksi partikel yang terlalu besar sehingga didapatkan fraksi yang sesuai untuk material pada konstruksi jalan. IBA dapat diklasifikasikan sebagai SW (*Sand Well* / pasir dengan gradasi baik), SM (*Sand Mjalah* / pasir kelanauan), atau SP-SM (*Sand Poor – Sand Mjalah* / pasir kelanauan dengan gradasi buruk) berdasarkan sistem klasifikasi tanah USCS (*unified soil classification system*) (Lynn et al., 2017). Bila dikaitkan dengan sistem klasifikasi AASHTO, IBA kemungkinan termasuk kategori bahan non-plastik mendekati klasifikasi material A-3 pada AASHTO dimana cocok sebagai material *filler*, *sub-grade*, dan *sub-base*. Sifat non-plastik pada IBA akan dapat meningkatkan kekuatan geser campuran (Alhassan and Tanko, 2012). Sifat fisis rata-

rata IBA yang berasal dari berbagai insinerator di berbagai negara ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Sifat Fisik Sampel IBA di Berbagai Insinerator

Parameter	Rata-Rata	Rentang
Densitas:		
-berat jenis	2,3	1,2-2,8
-berat volume, kg/m ³	1387	510-2283
Absorpsi:		
-fraksi butir besar, %	8,0	2,9-14,2
-fraksi butir halus, %	11,3	1,0-17,1

Sumber: Lynn et al. (2017)

Hot Rolled Sheet (HRS)

Hot Rolled Sheet (HRS) atau Lapisan Tipis Aspal Beton (Lataston) adalah campuran beraspal panas dengan menggunakan gradasi agregat senjang dengan aspal sebagai bahan pengikat (Lusyana et al., 2021). Campuran HRS memiliki sedikit proporsi agregat berukuran sedang (2,3 mm – 10 mm) yang menyebabkan campuran memiliki gradasi senjang.

Tabel 2. Amplop Gradasi Agregat HRS

Ukuran Saringan (mm)	% Berat Agregat yang Lolos HRS	
	WC	Base
19,00	100	100
12,50	90 – 100	90 – 100
9,50	75 – 85	65 – 90
4,75		
2,36	50 – 72	35 – 55
1,18		
0,60	35 – 60	15 – 35
0,30		
0,150		
0,075	6 – 10	2 – 9

Sumber: Kementerian PUPR (2018)

Gradasi senjang dalam campuran yang menyebabkan campuran HRS memiliki sifat tahan terhadap cuaca dan durabilitas yang mampu mengakomodasi beban lalu lintas sedang (<1.000.000 ESA) (Chalid, 2016). HRS terdiri dari 2 jenis yaitu HRS-Base (HRS Fondasi) dan HRS-WC (HRS Wearing Course/lapis aus) dengan ukuran butir agregat maksimum adalah 19 mm (Kementerian PUPR, 2018).

Tabel 3. Persyaratan Sifat-sifat Campuran

Sifat-sifat Campuran		HRS	
		WC	Base
Kadar aspal efektif	Min	5,9	5,5
Jumlah tumbukan per bidang		50	50
VIM	Min.	4,0	4,0
	Maks.	6,0	6,0
VMA (%)	Min.	18	17
VFB (%)	Min.	68	68
Stabilitas (kg)	Min.	600	600
MQ (kg/mm)	Min.	250	250

Sumber: Kementerian PUPR (2018)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan peralatan yang ada di Laboratorium Jalan Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana. Bahan material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari agregat alam (kasar, halus, dan filler), aspal penetrasi 60/70 diperoleh dari PT. Adhi Murti dan IBA diperoleh dari insinerator TPST (Tempat Pengolahan Sampah Terpadu) Mengwitani Badung, Bali.

Penelitian ini diawali dengan persiapan bahan meliputi pengumpulan agregat alam, aspal, dan IBA. Langkah selanjutnya adalah pengujian bahan/material yang kemudian dibandingkan dengan spesifikasi. Tahap berikutnya adalah pembuatan rancangan campuran dengan variasi substitusi berdasarkan volume IBA sebesar 25%, 50%, dan 100% terhadap agregat halus. Selanjutnya dibuat benda uji kemudian dilakukan pemeriksaan karakteristik secara Marshall, lalu dicari KAO (kadar aspal optimum) dari masing-masing variasi IBA dan dilakukan test Cantabro pada KAO tiap campuran.

Perlakuan Terhadap IBA

IBA yang didapatkan dari TPST Mengwitani tidak langsung digunakan sebagai substitusi agregat halus alam pada campuran. Pencucian IBA dilakukan terlebih dahulu untuk membuang material yang mengapung di atas air (seperti arang kayu, daun, dan lain-lain). Setelah pencucian IBA dilakukan penjemuran dibawah sinar matahari, sehingga IBA tidak jenuh air. Selanjutnya IBA diayak sehingga diperoleh fraksi-fraksi ukuran tertahan saringan yang akan digunakan sebagai substitusi dalam campuran.

Proporsi Material

Pada penelitian ini, proporsi agregat kasar, halus, dan *filler* didasarkan pada gradasi titik tengah mengacu pada amplot gradasi HRS-WC dalam Spesifikasi Pekerjaan Umum Kementerian PUPR 2018. Agregat kasar merupakan agregat tertahan saringan 4,75 mm, agregat halus adalah agregat lolos saringan 4,75 mm tertahan 0,075 mm, dan *filler* lolos saringan 0,075 mm.

Tabel 4. Proporsi Agregat HRS-WC

Ukuran Saringan (mm)	% Berat Agregat Lolos Saringan			
	Batas bawah	Batas tengah	Batas atas	% tertahan
19,00	100	100	100	0
12,50	90	95	100	5
9,50	75	80	85	15
4,75	62	70	78	10
2,36	50	61	72	9
1,18	42	53,5	65	7,5
0,60	35	47,5	60	6
0,30	25	33,5	42	14
0,15	15	20	25	13,5
0,075	6	8	10	12
Pan				8
Jumlah				100

Berdasarkan gradasi tengah didapatkan persentase masing-masing fraksi agregat, yaitu agregat kasar 30%, agregat halus 62%, dan *filler* 8%. Nilai tersebut digunakan untuk

menentukan kadar aspal awal (P_b) campuran HRS-WC menggunakan Persamaan 1.

$$P_b = 0,035(\%CA) + 0,04(\%FA) + 0,18(\%FF) + k \tag{1}$$

Dengan CA adalah agregat kasar, FA adalah agregat halus, FF adalah *filler*, dan k adalah konstanta (untuk HRS = 2 – 3).

Nilai k dipakai 3 karena sifat IBA yang memiliki penyerapan yang tinggi, sehingga diperoleh $P_b = 7,97\% \approx 8,0\%$; kemudian divariasikan menjadi: 7,0%; 7,5%; 8,0%; 8,5%; dan 9,0% terhadap berat total campuran.

Proporsi agregat campuran HRS-WC disubstitusi IBA

Prinsip substitusi agregat campuran berdasarkan volume adalah dengan mencari volume agregat alam pada masing-masing ukuran saringan yang kemudian dikalikan dengan berat volume agregat substitusi yaitu IBA sehingga diperoleh berat agregat yang akan disubstitusi. Berdasarkan pengujian didapatkan berat jenis kering agregat halus alam dan IBA yaitu 2,56 gr/cm³ dan 1,94 gr/cm³, sehingga berat agregat disubstitusi IBA tertahan pada masing-masing ukuran saringan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Berat Tertahan Saringan Agregat Campuran dengan Agregat Halus Disubstitusi IBA

Jenis Agregat	Ukuran saringan (mm)	Agregat Alam (gr)	Volume Agregat Alam (cm ³)	Disubstitusi 25% IBA		Disubstitusi 50% IBA		Disubstitusi 100% IBA
				Berat Agregat Halus Alam (gr)	Berat IBA (gr)	Berat Agregat Halus Alam (gr)	Berat IBA (gr)	Berat Agregat Halus Alam (gr)
Agregat Kasar	19	0						
	12,5	50						
	9,5	150						
	4,75	100						
	2,36	90	35,12	67,50	17,04	45,00	34,07	68,14
Agregat Halus	1,18	75	29,26	56,25	14,20	37,50	28,39	56,78
	0,6	60	23,41	45,00	11,36	30,00	22,71	45,43
	0,3	140	54,63	105,00	26,50	70,00	53,00	106,00
	0,15	135	52,67	101,25	25,55	67,50	51,11	102,21
	0,075	120	46,82	90,00	22,71	60,00	45,43	90,85
Filler	pan	80						

Pembuatan Benda Uji

Sampel dibuat sebanyak 3 buah pada masing-masing kadar aspal pada tiap-tiap variasi substitusi IBA yang kemudian karakteristik campuran diambil dari nilai rata-rata 3 sampel. Pemasakan sampel menggunakan alat penumbuk *Marshall* sebanyak 2x50 tumbukan dengan berat 4,5 kg dan tinggi jatuh 45,7 cm.

Penentuan KAO

Kadar aspal optimum ditentukan dengan mencari kadar aspal yang memberikan karakteristik campuran yang memenuhi semua persyaratan spesifikasi campuran. Kadar aspal optimum ditentukan dengan menggunakan metode *bar-chart*. Nilai kadar aspal optimum ditentukan sebagai nilai tengah dari rentang kadar aspal maksimum dan minimum yang memenuhi spesifikasi.

Pengujian *Cantabro Abrasion Loss*

Tujuan dari pengujian *Cantabro Abrasion Loss* (CAL) adalah untuk mengevaluasi campuran beraspal terhadap pelepasan butir agregat karena pengaruh gesekan berulang akibat roda kendaraan. Untuk mensimulasikan pengaruh gesekan roda digunakan mesin *Los Angeles* dengan 300 kali putaran pada kecepatan 30-33 rpm tanpa bola-bola baja. Besarnya nilai CAL dihitung dengan Persamaan 2 (Mashuri et al., 2014).

$$CAL = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \tag{2}$$

Dengan CAL adalah nilai *Cantabro* (%), M_1 adalah berat mula-mula benda uji (gr), dan M_2 adalah berat benda uji setelah pengujian (gr).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemeriksaan Agregat

Pemeriksaan agregat dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat agregat yang akan digunakan dalam campuran aspal. Sifat-sifat agregat yang diuji dan hasilnya terhadap agregat kasar dan agregat halus alam ditunjukkan pada Tabel 6 dan Tabel 7. Pemeriksaan IBA meliputi analisa saringan, berat jenis dan penyerapannya. Berdasarkan analisa saringan diketahui IBA tersusun atas fraksi agregat kasar, agregat halus, dan *filler*

secara berturut-turut sebesar 15,5%; 83,9%; dan 0,5%. Hasil pemeriksaan berat jenis dan penyerapan IBA secara berturut-turut yaitu 1,94 dan 11,11%.

Tabel 6. Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Berat jenis:		
-) Bulk	2,37	-
-) SSD	2,41	
-) Apparent	2,46	
Penyerapan (%)	1,39	Maks. 3
Keausan Agregat (%)	33,56	Maks. 40
Angulalitas (%)	100	Min. 95
Kadar Lumpur (%)	0,90	Maks. 1
Kelekatan thd. Aspal (%)	98,50	Min. 95
<i>Soundness</i> (%)	1,117	Maks. 12

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan Agregat Halus Alam

Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Berat jenis:		
-) Bulk	2,56	-
-) SSD	2,62	
-) <i>Apparent</i>	2,71	
Penyerapan (%)	2,15	Maks. 3
Angulalitas (%)	45,60	Min. 45
Kadar Lumpur (%)	0,37	Maks. 1
<i>Sand Equivalent</i> (%)	84,94	Min. 50

Hasil Pemeriksaan Aspal

Pemeriksaan sifat-sifat aspal dilakukan di laboratorium meliputi pengujian penetrasi, berat jenis, titik lembek, titik nyala, kehilangan berat, dan daktilitas aspal. Hasil pemeriksaan aspal diperlihatkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pemeriksaan Aspal

Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Penetrasi pada 25°C, (0,1 mm)	63,1	60 – 70
Berat Jenis	1,11	≥ 1,0
Titik Lembek (°C)	49,50	≥ 48
Titik Nyala (°C)	345	≥ 232
Kehilangan Berat Aspal (%)	0,52	Maks. 0,80
Daktilitas pada 25°C (cm)	130,38	≥ 100

Karakteristik Campuran Lataston HRS-WC

Hasil pengujian *Marshall* menghasilkan data berupa stabilitas dan *flow* campuran aspal. Karakteristik campuran yang diuji meliputi stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*, VIM, VMA, dan VFB. Hasil pengujian karakteristik diperlihatkan pada Tabel 9 sampai Tabel 11, menunjukkan bahwa

karakteristik campuran HRS-WC dengan substitusi agregat halus menggunakan 25% dan 50% IBA untuk beberapa variasi kadar aspal sudah memenuhi spesifikasi, sedangkan untuk campuran disubstitusi 100% IBA tidak memenuhi spesifikasi pada nilai VIM dan VFB.

Tabel 9. Karakteristik Campuran Disubstitusi 25% IBA pada Variasi Kadar Aspal

Karakteristik	Kadar Aspal					Persyaratan Campuran
	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	
Stabilitas (kg)	2322,423	2545,318	2681,931	2804,164	2696,312	Min. 600
Flow (mm)	2,709	3,048	3,217	3,810	4,064	-
MQ (kg/mm)	857,982	837,965	833,989	737,686	664,753	Min. 250
VIM (%)	9,561	7,467	6,288	4,787	4,503	4 - 6
VMA (%)	19,740	18,789	18,664	18,275	18,937	Min. 18
VFB (%)	51,566	60,262	66,312	73,805	76,221	Min. 68

Tabel 10. Karakteristik Campuran Disubstitusi 50% IBA pada Variasi Kadar Aspal

Karakteristik	Kadar Aspal					Persyaratan Campuran
	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	
Stabilitas (kg)	1905,394	2315,233	2401,515	2480,607	2300,853	Min. 600
Flow (mm)	3,387	3,641	3,810	4,318	4,487	-
MQ (kg/mm)	564,268	637,194	631,852	574,920	513,746	Min. 250
VIM (%)	12,274	10,713	8,873	6,748	5,328	4 - 6
VMA (%)	20,715	20,178	19,414	18,428	18,082	Min. 18
VFB (%)	40,750	46,908	54,299	63,388	70,542	Min. 68

Tabel 11. Karakteristik Campuran Disubstitusi 100% IBA pada Variasi Kadar Aspal

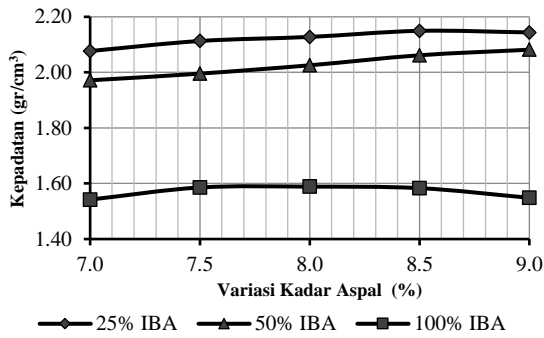
Karakteristik	Kadar Aspal					Persyaratan Campuran
	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	
Stabilitas (kg)	841,249	941,912	1143,236	1092,905	920,341	Min. 600
Flow (mm)	3,556	3,810	4,149	4,657	5,080	-
MQ (kg/mm)	237,090	249,714	275,584	234,177	180,183	Min. 250
VIM (%)	28,036	25,636	25,123	25,005	26,290	4 - 6
VMA (%)	32,483	30,952	31,195	31,800	33,662	Min. 18
VFB (%)	13,730	17,180	19,493	21,401	21,901	Min. 68

Hubungan Karakteristik dengan Kadar Aspal pada Substitusi 25%, 50%, dan 100% IBA

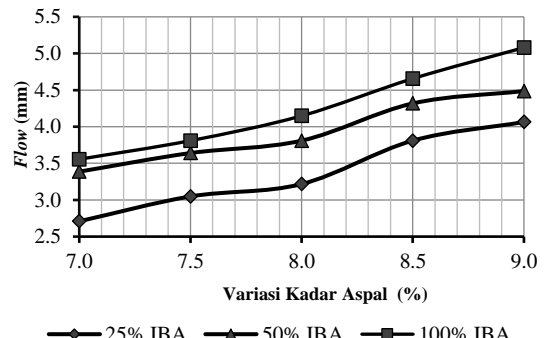
Kepadatan

Campuran dengan disubstitusi IBA 25% memiliki nilai kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran disubstitusi 50% dan 100% IBA. Namun campuran dengan disubstitusi IBA menghasilkan nilai

kepadatan yang rendah bila dibandingkan dengan campuran menggunakan agregat alam pada umumnya. Hal ini disebabkan karena berat jenis IBA lebih kecil dibandingkan berat jenis agregat alam. Nilai kepadatan campuran tertinggi pada substitusi 25%, 50%, dan 100% IBA berturut-turut yaitu 2,150; 2,082; dan 1,583.



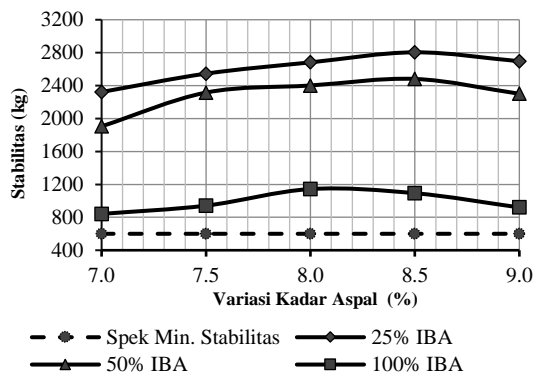
Gambar 1. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Kepadatan



Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Flow

Stabilitas

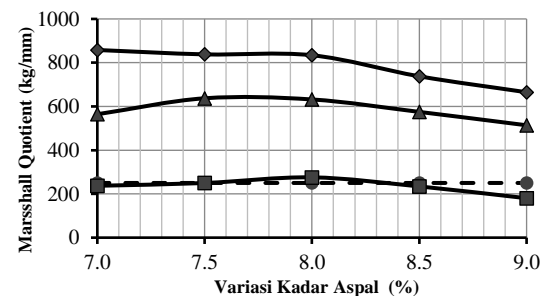
Stabilitas tertinggi terjadi pada kadar aspal 8,5% dengan campuran disubstitusi 25% IBA yaitu sebesar 2804,164 kg, sedangkan stabilitas terendah terjadi pada campuran disubstitusi 100% IBA dengan kadar aspal 7,0% yaitu 841,249 kg. Secara keseluruhan campuran dengan substitusi agregat halus menggunakan 25%, 50%, dan 100% IBA pada kadar aspal 7,0%, 7,5%, 8,0%, 8,5%, dan 9,0% sudah memenuhi spesifikasi minimum untuk stabilitas campuran HRS-WC.



Gambar 2. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas

Marshall Quotient (MQ)

Nilai MQ pada campuran disubstitusi 25%, 50%, dan 100% IBA terus mengalami penurunan, hal ini disebabkan semakin tinggi substitusi IBA pada campuran menghasilkan stabilitas yang lebih rendah dengan flow yang lebih tinggi. Nilai MQ campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25% dan 50% IBA pada kadar aspal 7,0%; 7,5%; 8,0%; 8,5%; dan 9,0% sudah memenuhi persyaratan, sedangkan pada substitusi 100% IBA nilai MQ yang memenuhi hanya terjadi pada rentang kadar aspal 7,5% sampai 8,3%.



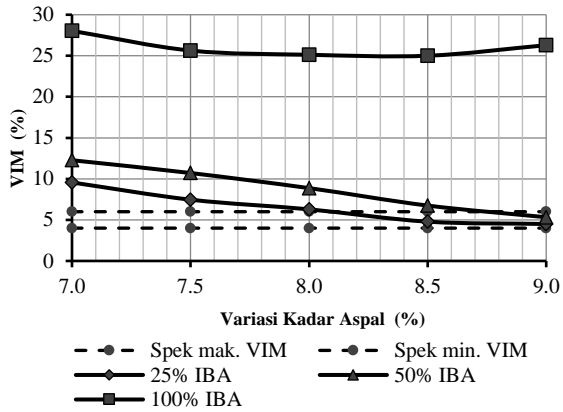
Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan MQ

Flow

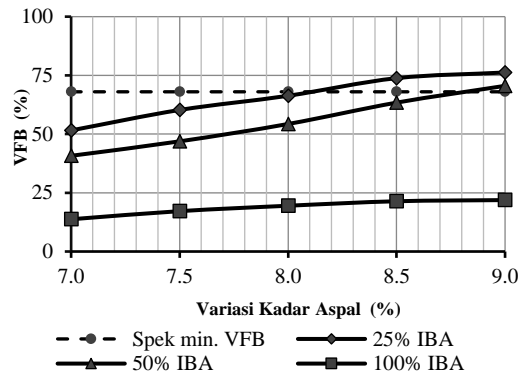
Berdasarkan hasil pemeriksaan, nilai flow akan meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Hal ini disebabkan karena semakin banyak rongga udara dalam campuran yang terisi aspal yang mengakibatkan rongga udara semakin kecil. Pada campuran dengan substitusi IBA, nilai flow akan semakin naik seiring bertambahnya substitusi IBA yang digunakan. Hal ini menunjukkan penggunaan proporsi IBA yang lebih tinggi menghasilkan campuran yang lebih plastis.

Rongga Udara dalam Campuran (VIM)

Berdasarkan hasil penelitian, campuran disubstitusi 25% IBA memenuhi persyaratan nilai VIM pada rentang kadar aspal 8,1% sampai 9,0%. Pada campuran disubstitusi 50% IBA, nilai VIM yang memenuhi adalah pada rentang kadar aspal 8,7% sampai 9,0%. Untuk campuran disubstitusi 100% IBA, nilai VIM jauh melewati syarat nilai maksimum, sehingga tidak memenuhi spesifikasi.



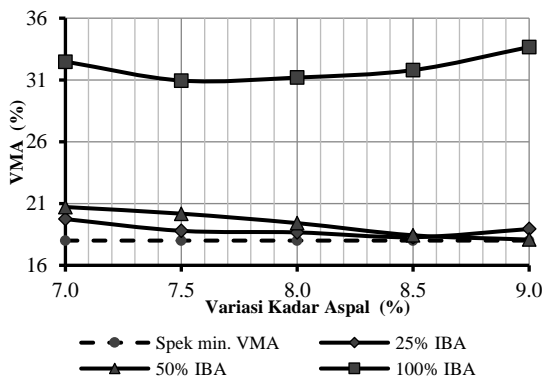
Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VIM



Gambar 7. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VFB

Rongga antar Butir Agregat (VMA)

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai VMA untuk kadar aspal 7,0%, 7,5%, 8,0%, 8,5%, dan 9,0% pada campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25%, 50%, dan 100% sudah memenuhi syarat spesifikasi.



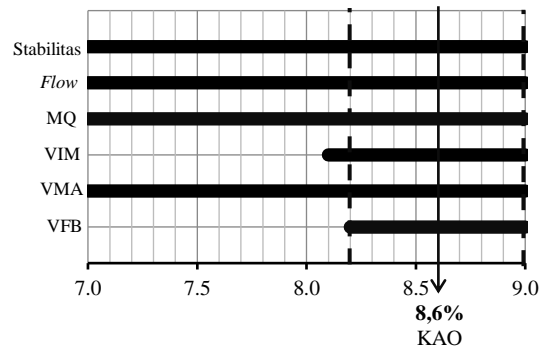
Gambar 6. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VMA

Rongga Terisi Aspal (VFB)

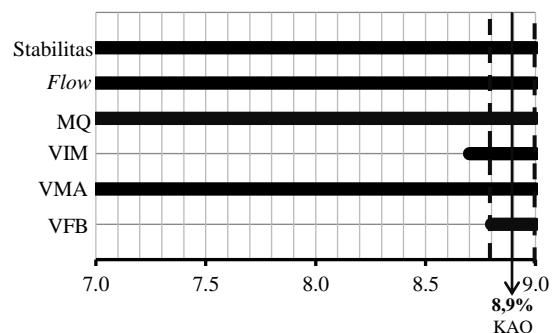
Nilai VFB campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25% IBA memenuhi spesifikasi adalah pada rentang kadar aspal kadar aspal 8,2% sampai 9,0% (Gambar 8). Pada substitusi 50% IBA, nilai VFB yang memenuhi adalah pada rentang 8,8% sampai 9,0%, (Gambar 9), sedangkan pada substitusi 100% IBA tidak memenuhi spesifikasi pada semua rentang kadar aspal.

Kadar Aspal Optimum

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) pada variasi substitusi 25%, 50% dan 100% IBA ditentkan dengan metode *bar-chart*. Pada campuran disubstitusi 25% dan 50% IBA diperoleh KAO 8,6% dan 8,9%, sedangkan pada substitusi 100% IBA tidak dapat ditentukan karena nilai VIM dan VFB tidak memenuhi spesifikasi.



Gambar 8. *Bar-chart* Karakteristik HRS-WC Disubstitusi 25% IBA



Gambar 9. *Bar-chart* Karakteristik HRS-WC Disubstitusi 50% IBA

Uji CAL pada KAO tiap Jenis Campuran

Berdasarkan pengujian *Cantabro* terhadap campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25% dan 50% IBA pada kadar aspal optimum diperoleh hasil rata-rata nilai CAL secara berturut-turut yaitu 2,01% dan 2,65%. Nilai ini sudah memenuhi rekomendasi nilai CAL untuk daerah tropis yaitu maksimal 16%.

Tabel 12. Hasil Pengujian *Cantabro*

Sampel	Kadar Aspal	CAL
25% IBA:		
Sampel 1	8,6 %	2,16 %
Sampel 2		1,86 %
Rata-rata		2,01 %
50% IBA:		
Sampel 1	8,9 %	2,52 %
Sampel 2		2,77 %
Rata-rata		2,65 %

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik material IBA berdasarkan pemeriksaan berat jenis diperoleh hasil rata-rata berat jenis 1,940. Penyerapan IBA sebesar 11,11%.
2. Karakteristik campuran HRS-WC dengan substitusi agregat halus memakai IBA dibandingkan dengan spesifikasi, yaitu sebagai berikut:
 - a. **Kepadatan**
Campuran dengan disubstitusi IBA 25% memiliki nilai kepadatan tertinggi yaitu 2,150 pada kadar aspal 8,5% nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan campuran disubstitusi 50% dan 100% IBA yang memiliki nilai kepadatan tertinggi secara berturut-turut yaitu 2,082 pada kadar aspal 9,0% dan 1,583 pada kadar aspal 8,5%.
 - b. **Stabilitas**
Secara keseluruhan campuran dengan substitusi agregat halus menggunakan 25%, 50%, dan 100% IBA sudah memenuhi Spesifikasi Pekerjaan Umum Kementerian PUPR tahun 2018 yaitu ≥ 600 kg.
 - c. **Flow**
Pada campuran disubstitusi 25% IBA nilai *flow* berada pada rentang 2,709–4,064 mm, campuran disubstitusi

50% IBA memiliki nilai *flow* yang berada pada rentang 3,387 mm–4,487 mm, dan pada campuran disubstitusi 100% IBA nilai *flow* berada pada rentang 3,556 mm – 5,080 mm.

d. **Marshall Quotient**

Nilai MQ pada campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25% dan 50% IBA pada kadar aspal 7,0%, 7,5%, 8,0%, 8,5%, dan 9,0% sudah memenuhi spesifikasi (≥ 250), namun pada substitusi 100% IBA, nilai MQ yang memenuhi hanya terjadi pada rentang kadar aspal 7,5% sampai 8,3%.

e. **VIM**

Pada campuran disubstitusi 25% IBA nilai VIM memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 8,1%–9,0%. Campuran disubstitusi 50% IBA, nilai VIM yang memenuhi adalah pada rentang kadar aspal 8,7%–9,0%. Untuk campuran disubstitusi 100% IBA, nilai VIM jauh melewati syarat nilai maksimum, sehingga tidak memenuhi spesifikasi.

f. **VMA**

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai VMA untuk kadar aspal 7,0%, 7,5%, 8,0%, 8,5%, dan 9,0% pada campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25%, 50%, dan 100% sudah memenuhi syarat spesifikasi.

g. **VFB**

Nilai VFB campuran HRS-WC dengan agregat halus disubstitusi 25% IBA memenuhi spesifikasi adalah pada rentang kadar aspal 8,2% sampai 9,0%. Pada substitusi 50% IBA, nilai VFB yang memenuhi adalah pada rentang 8,8% sampai 9,0%, sedangkan pada substitusi 100% IBA tidak memenuhi spesifikasi pada semua rentang kadar aspal.

Berdasarkan hasil pemeriksaan karakteristik campuran diperoleh KAO untuk campuran disubstitusi 25% dan 50% IBA secara berturut-turut yaitu 8,6% dan 8,9%, sedangkan pada substitusi 100% IBA tidak dapat ditentukan karena nilai VIM dan VFB tidak memenuhi spesifikasi. Pengujian *Cantabro* dilakukan pada KAO untuk campuran

disubstitusi 25% dan 50% IBA dan diperoleh hasil rata-rata nilai CAL secara berturut-turut yaitu 2,01% dan 2,65%.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhassan, H.M., Tanko, A.M. 2012. Characterization of Solid Waste Incinerator Bottom Ash and the Potential for Its Use. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(4): 516–522.
- Becquart, F., Bernard, F., Abriak, N.E., Zentar, R. 2009. Monotonic Aspects of the Mechanical Behaviour of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration and Its Potential Use for Road Construction. *Waste Management*, 29(4): 1320–1329.
- Gunandi, M.A.D., Thanaya, I.N.A., Negara, I.N.W. 2013. Analisis Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC) Dengan Menggunakan Plastik Bekas Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Agregat. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 17(2): 191–201.
- Kementrian PUPR. 2018. *Spesifikasi Umum 2018*. Jakarta: Direktorat Jendral Bina Marga.
- Khairuna, W., Suhendrayatna, Zaki, M. 2017. Pemanfaatan Abu Dasar Insinerator Sebagai Bahan Bangunan. *Jurnal Ilmu Kebencanaan*, 4(4): 126–134.
- Lam, C.H.K., Ip, A.W.M., Barford, J.P., Mckay, G. 2010. *Use of Incineration MSW Ash : A Review*. 2: 1943–1968.
- Lusyana, Mukhlis, Alli, S., Kharlindo, M.Y. 2021. Kinerja Durabilitas Campuran Aspal Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC) Dengan Substitusi Cangkang Sawit Sebagai Agregat Halus. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(1): 81–91.
- Lynn, C.J., Ghataora, G.S., OBE, R.K.D. 2017. Municipal Incinerated Bottom Ash (MIBA) Characteristics and Potential for Use in Road Pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2): 185–201.
- Mashuri, Astuti, F., Batti, J.F. 2014. Penuaan Dini Dan Durabilitas Perkerasan Lapis Tipis Beton Aspal Lapis Aus (HRS-WC) Yang Menggunakan Roadcel-50. *Jurnal Infrastruktur*, 4(2): 103–113.
- Vaitkus, A., Gražulytė, J., Vorobjovas, V., Šernas, O., Kleizienė, R. 2018. Potential of MSWI Bottom Ash to Be Used as Aggregate in Road Building Materials. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 13(1): 77–86.
- Yuliani, M. 2016. Insinerasi Untuk Pengolahan Sampah Kota. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 9(2): 89–96.