

Penggunaan Limbah Gypsum Terhadap Campuran SMA Kasar Dengan Agregat Sungai Sadang Pinrang

Kelvin Fernando ^{*1a}, Monika Datu Mirring Palinggi ^{*2}, Lintje T. Tangdialla ^{*3}

Submit:
20 Februari 2024

Review:
29 Februari 2024

Revised:
10 Oktober 2024

Published :
30 Januari 2025

^{*1} Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, kelvinfernando84@gmail.com

^{*2} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, monikadatimirring@gmail.com

^{*3} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, lintjettangdialla@gmail.com

^aCorresponding Author: kelvinfernando84@gmail.com

Abstrak

Lapisan perkerasan jalan merupakan komponen penting dari struktur jalan. Banyak di antaranya terjadi kerusakan sebelum masa pakainya, yang mencakup retak, distorsi, berlubang, dan pengelupasan. Oleh karena itu dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik campuran SMA kasar dengan menggunakan limbah gypsum dan pengaruh limbah gypsum pada campuran SMA Kasar. Hasil penelitian yang dilakukan bahwa Karakteristik agregat dari Sungai Sadang Kabupaten Pinrang, aspal penetrasi 60/70, berat jenis *filler* semen, dan limbah gypsum sebagai bahan tambah memenuhi persyaratan dalam campuran SMA Kasar berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Dan Adanya penambahan limbah gypsum mempengaruhi karakteristik campuran SMA kasar yaitu nilai VMA, dimana nilai VMA melebihi nilai minimum yang ditentukan yaitu sebesar 17 %.

Kata kunci : SMA kasar, limbah gypsum, agregat

Abstract

The road pavement layer is the main part of the road construction structure. Many experience damage before reaching their service life, this damage includes cracks, distortion, holes and peeling on the surface. Therefore, tests were conducted to identify the features of the coarse SMA mixture using gypsum waste and the effect of gypsum waste on the coarse SMA mixture. The results of the research carried out show that the characteristics of the aggregate from the Sadang River, Pinrang Regency, asphalt penetration of 60/70, specific gravity of cement filler, and gypsum waste as an added material meet the requirements for a Coarse SMA mixture based on the 2018 General Bina Marga Specifications. And the addition of gypsum waste affects the characteristics rough SMA mixture, namely the VMA value, where the VMA value exceeds the specified minimum value of 17%.

Keywords : Rough SMA, gypsum waste, aggregate

PENDAHULUAN

Lapisan perkerasan jalan dikatakan sebagai komponen penting dari struktur jalan. Banyak di antaranya mengalami kerusakan sebelum masa pakainya, yang mencakup retak, distorsi, berlubang, dan pengelupasan. Campuran SMA dengan kadar aspal yang dipakai ialah 7% dan merupakan nilai stabilitas rendah, dimaksudkan agar dapat mengatasi terjadinya kerusakan roda mengalami keausan sambil tetap bertahan lama. Salah satu kekurangan campuran SMA dalam penggunaannya adalah bahwa pada kondisi dengan suhu tinggi, campuran

beraspal mengalami kelelahan. Kelebihan dari campuran SMA adalah tahan terhadap beban lalu lintas yang tinggi dan mengurangi kebisingan akibat gesekan roda terhadap permukaan jalan.

Limbah gypsum yang digunakan yaitu dari panel atau papan gypsum adalah material yang banyak digunakan oleh masyarakat untuk proyek bangunan rumah tinggal. Limbah Gypsum merupakan limbah dari sisa-sisa pembuatan list Gypsum yang tidak bisa didaur ulang dan dimanfaatkan kembali, dimana semen dan limbah serbuk Gypsum memiliki kandungan kapur (CaO) yang cukup tinggi[1]. Gypsum adalah produk material komposit yang digunakan sebagai bahan bangunan dan umumnya digunakan sebagai partisi bangunan, langit-langit, dinding pemisah, dan aksesoris ruangan. Namun, gypsum juga memiliki kelemahan dalam hal kelenturan dan tidak tahan air. EVA (Etilen Vinil Asetat) adalah polimer yang bertransformasi dengan mortar tahan air yang ramah lingkungan[2]. Penggunaan gypsum daur ulang dapat secara signifikan mengurangi emisi karbon dioksida dari beton dan memberikan manfaat ekonomi[3]. Gypsum limbah telah tersimpan di atmosfer selama lebih dari sepuluh tahun dan dapat dianggap sebagai pengisi *inert*. Komponen kimia utamanya adalah kalsium sulfat dihidrat (47,90%), kalsium hidroksida (21,64%) dan kalsium karbonat (14,80%)[4]. Penelitian mengenai penggunaan limbah gypsum dalam campuran beton aspal masih sedikit, oleh karena itu dalam penelitian ini, limbah gypsum ditambahkan ke campuran SMA kasar, yang diharapkan dapat meningkatkan nilai pengujian Marshall.

Stone Matrix Asphalt (SMA), adalah beton aspal dengan campuran panas yang terdiri dari agregat dari agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi dan bahan pengikat (aspal)[5]. *Stone Matrix Asphalt* (SMA) merupakan salah satu campuran pada lapisan permukaan jalan yang dapat dijadikan sebagai pertimbangan solusi mengatasi permasalahan pada kerusakan jalan[6]. Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) Kasar adalah jenis campuran yang dikenal karena kekuatan dan ketahanannya yang tinggi terhadap beban lalu lintas dan cuaca ekstrem[7]. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan penggunaan limbah pada campuran SMA, seperti pemanfaatan limbah beton pada campuran SMA Kasar dengan kadar aspal optimum 6% menghasilkan karakteristik Marshall yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 mengenai campuran beton aspal[8]. Pemanfaatan limbah batu bara pada campuran HRS-Base menghasilkan karakteristik Marshall yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 mengenai campuran beton aspal[9]. Pemanfaatan limbah gypsum pada campuran HRS Base dengan kadar aspal optimum 6,05% menghasilkan karakteristik Marshall yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 mengenai campuran beton aspal[10]. Penambahan kadar limbah gypsum sebesar 1% pada *filler* dapat meningkatkan nilai stabilitas dan durabilitas campuran HRS-WC[11]. Limbah gypsum dapat berfungsi sebagai stabilisator untuk konstruksi dasar jalan dan agregat untuk pengisi dasar jalan[12]. Berdasarkan berbagai efek dari variasi kandungan gypsum produk sampingan industri dalam bahan konstruksi dan bangunan, gypsum produk sampingan industri dengan berbagai kandungan diklasifikasikan menjadi tiga tingkat untuk aktivator sulfat, bahan tambahan semen, dan komponen utama, masing-masing[13]. Limbah gypsum disarankan menjadi aditif dalam campuran *subbase*, yang harus dikombinasikan dengan jenis stabilisator lain seperti semen atau *fly ash* untuk menstabilkan tanah atau batu pecah[14]. Penambahan limbah gypsum dapat secara efektif meningkatkan modulus pemulihan kompresi, kekuatan tekan tak terkuring, dan kekuatan tarik lentur. Kandungan limbah gypsum yang tinggi dalam campuran juga dapat meningkatkan sifat penyusutan kering dan penyusutan suhu dari campuran perkerasan jalan tersebut[15].

METODOLOGI

A. Lokasi Pengambilan Agregat

Tempat pengambilan material dari Sungai Sadang Kecamatan Duampanua Kabupaten Pinrang.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Material

B. Pembuatan Benda Uji Untuk Pencampuran SMA Kasar

Jumlah benda uji sebanyak 15 sampel dengan berbagai variasi bahan tambahan yang dimasukkan untuk Limbah Gypsum dan sebagai berikut: kadar aspal 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, dan 7,00%.

Tabel 1. Jumlah Sampel

Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> kasar		
Kadar Aspal %	Kadar Limbah Gypsum %	Pengujian <i>Marshall Konvensional</i>
7,00	0	3
	1	3
	2	3
	3	3
	4	3
Total		15



Gambar 2. Sampel

C. Teknik Analisis Data

1. Karakteristik Campuran SMA Kasar

Pengujian Marshall konvensional bisa dipakai untuk mengetahui karakteristik pencampuran SMA kasar dengan menggunakan bahan tambah limbah gypsum. Hasil dari pengujian Marshall dapat digunakan untuk menentukan berat jenis campuran, stabilitas, *flow*, dan tingkat VIM dan VMA.

2. Pengaruh Limbah Gypsum Terhadap Karakteristik Campuran SMA Kasar

Limbah gypsum pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi kadar limbah gypsum terhadap karakteristik Marshall.



Gambar 3. Limbah Gypsum

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

Dari hasil pengujian karakteristik agregat, maka pengujian keausan agregat, berat jenis dan penyerapan, analisa saringan, agregat lolos saringan nomor 200, kadar lumpur, partikel pipih dan lonjong, kelekatan aspal terhadap agregat, dan filler telah memenuhi aturan Spesifikasi Bina Marga mengenai campuran beraspal.

Tabel 2. Karakteristik Agregat

No	Pengujian	Metode	Spesifikasi Umum Bina		Satuan	Hasil Penelitian	Keterangan
			Min	Max			
1	<u>Kerusakan Agregat</u>					22,6	
	Fraksi A	SNI 2417:2008				20,16	Memenuhi
	Fraksi B		-	40	%	16,36	
	Fraksi C					11,54	
	Fraksi D						
2	<u>Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar</u>	SNI 1969:2016	2,5	-		2,56	Memenuhi
	Bulk		2,5	- 3		2,58	
	SSD		2,5		%	2,62	
	Apparent		-			0,91	
	<u>Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus</u>		2,5	-		2,62	
	Bulk	SNI 1970:2016	2,5	-	%	2,65	Memenuhi
	SSD		2,5	- 3		2,72	
	Apparent		-			1,42	
	<u>Analisa Saringan</u>						

3	3/4"		90	100		97,40	
	1/2"		59	88		78,40	
	3/8"		25	60		58,40	
	No.4	SNI ASTM	20	28		26,70	
	No.8	C136:20	16	24		19,70	Memenuhi
	No.200	12	4	8	%	9	
	PAN		0	0		0.00	
4	Agregat Lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117:20 12	-	10	%	4,60	Memenuhi
5	Pemeriksaan Kadar Lumpur						Memenuhi
	Sand Equivalent	SNI 03-4428-1997	60	-	%	97,76	
	Kadar Lumpur		-	5		4,24	
6	Partikel Pipih						
	3/4"					4,09	
	1/2"	ASTM D	-	10	%	3,73	
	3/8"	4791-				4,76	
	1/4"	10					Memenuhi
	Partikel Lonjong	Perbandingan 1:5					
	3/4"					4,77	
	1/2"		-	10	%	4,45	
7	3/8"					3,35	
	1/4"						
	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	SNI 2439-2011	95	-	%	>98	Memenuhi
8	Pemeriksaan Berat Jenis Filler	SNI ASTM 136:1990	-	-	%	3,09	Memenuhi

Tabel 3. Karakteristik *Filler*

Jenis Pemeriksaan	Cara Pemeriksaan	Hasil Uji	Spesifikasi		Satuan	Ket
			Min	Maks		
Berat Jenis Filler	SNI 2531-2015	3,06	-	-	%	Memenuhi standar
Rata-Rata		3,06				

Dari hasil pengujian karakteristik aspal, maka pengujian penetrasi suhu 25 derajat celcius, daktilitas pada suhu 25 derajat celcius, titik lembek aspal, titik nyala, berat jenis aspal, berat yang hilang, dan penetrasi pada suhu 25 derajat celcius TFOT telah memenuhi aturan Spesifikasi Bina Marga mengenai campuran beraspal.

Tabel 4. Karakteristik Aspal

Jenis Pengujian	Metode	Hasil	Spesifikasi Bina Marga 2018	Satuan	Ket
Penetrasi pada suhu 25 °C	SNI 2456-2011	67	60-70	0,1mm	Memenuhi
Daktilitas Pada Suhu 25 °C	SNI 2432-2011	150	≥100	Cm	Memenuhi
Titik Lembek Aspal	SNI 243 4-2011	51,7	≥48	°C	Memenuhi
Titik Nyala (°C)	SNI 2433-2011	290	≥232	°C	Memenuhi
Berat Jenis Aspal	SNI 2441-2011	1,05	≥1.0		Memenuhi
Berat Yang Hilang (%)	SNI 06-2441-1991	0,53	≤0.8	%	Memenuhi
Penetrasi pada suhu 25 °C TFOT	SNI 2456-2011	83,6	≥54	% semula	Memenuhi

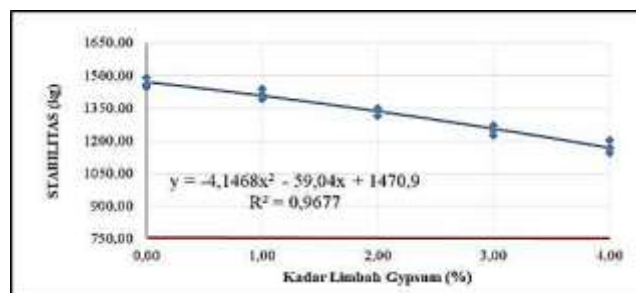
B. Karakteristik Campuran

1. Analisa Terhadap Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan suatu campuran sebagai penopang beban lalu lintas tanpa membentuk perubahan dan dinyatakan dalam kg.

Tabel 5. Nilai Stabilitas dari pengujian karakteristik Campuran SMA Kasar

Kadar Limbah Gypsum%	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Stabilitas	1448,38	1416,39	1350,19	1271,42	1202,52
	1492,27	1394,26	1339,03	1248,92	1168,49
	1459,35	1438,52	1316,71	1226,42	1145,80
Rata-Rata	1466,67	1416,39	1335,31	1248,92	1172,27
Persyaratan	Min 750 (kg)				



Gambar 4. Pengaruh variasi kadar limbah gypsum terhadap nilai stabilitas

Seluruh nilai stabilitas SMA Kasar memenuhi ketentuan Bina Marga dengan kadar aspal 7%, rata-rata 1466,67 kg hingga 1172,27 kg. Pencampuran SMA Kasar yang menggunakan jumlah bahan tambah yang lebih sedikit akan menyebabkan selimut aspal yang tipis di dasar agregat. Ini menyebabkan nilai stabilitas menurun seiring dengan berkurangnya *interlocking*, atau ikatan antar agregat. Sebaliknya, jika jumlah bahan tambahan terus meningkat maka lapisan aspal akan semakin tebal dan stabilitas pencampuran atau kekuatan ikatan agregat akan meningkat. Ketebalan selimut

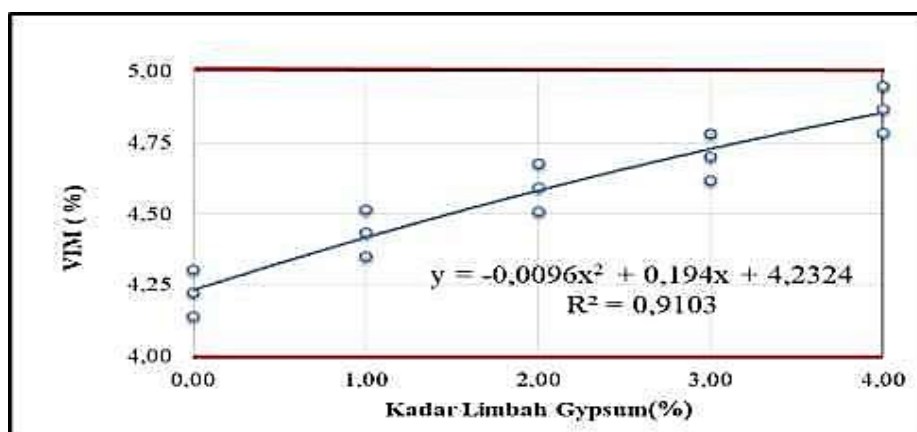
aspal yang tercipta karena penambahan aspal lebih banyak akan menurunkan stabilitas campuran atau pengikatan antar agregat.

2. Analisis Untuk VIM (Void In Mixture)

Jumlah pori pada beton aspal padat sesudah pemadatan dikenal sebagai istilah VIM. Selain mengurangi jumlah rongga, penggunaan banyak aspal juga memberikan perubahan terhadap bentuk plastis campuran, yang mempengaruhi kemampuan dan kinerja campuran.

Tabel 6. Angka VIM dari Hasil Pengujian Karakteristik Campuran SMA Kasar

VIM SMA KASAR					
Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
VIM	4,31	4,51	4,67	4,78	4,95
	4,22	4,43	4,59	4,70	4,87
	4,14	4,35	4,51	4,62	4,79
Rata-Rata	4,22	4,43	4,59	4,70	4,87
Syarat	4 - 5 (%)				



Gambar 5. Pengaruh variasi kadar limbah gypsum terhadap VIM

Untuk campuran SMA kasar, VIM memperoleh angka pada aspal tanpa bahan tambah atau 0% sebanyak 4,22% dan nilai variasi 1% hingga 4% sebesar 4,43 hingga 4,87%. Hal ini mengikuti aturan yang mana angka rata-rata VIM divariasi bahan tambah 1% hingga 4% meningkat. Grafik di atas menunjukkan bahwa aspal mengikat dan mengisi rongga dalam pencampuran beraspal. Akibatnya, angka VIM meningkat jika kadar bahan tambah yang digunakan tinggi dan sebaliknya jika kadar bahan tambah yang digunakan rendah.

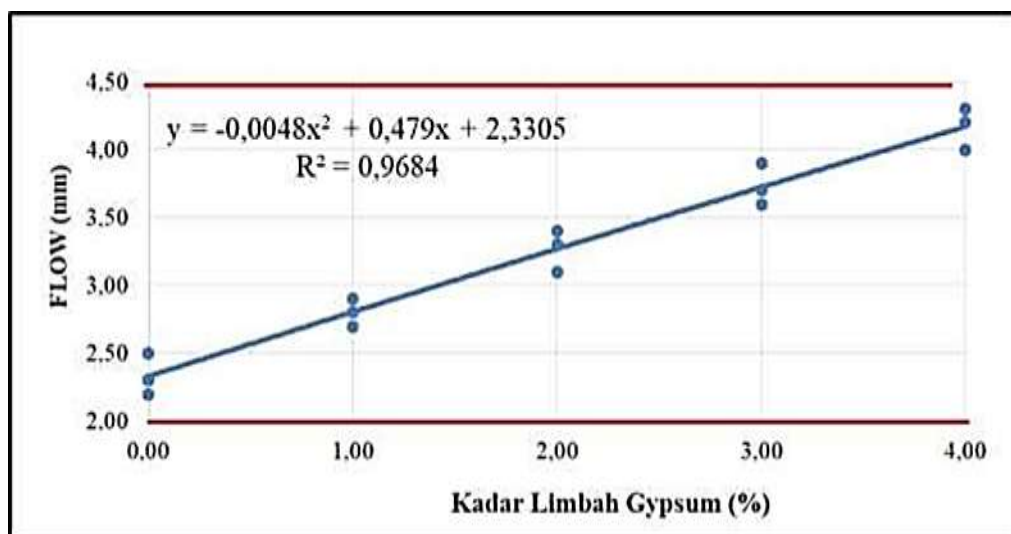
3. Analisis terhadap Flow

Dengan menggunakan proporsi kadar limbah gypsum 0 % diperoleh nilai rata-rata *flow* sebesar 2,33 mm, untuk kadar kadar limbah gypsum 1 % diperoleh nilai rata-rata sebesar 2,80 mm, kadar kadar limbah gypsum 2 % diperoleh nilai rata-rata sebesar 3,27 mm, kadar kadar limbah gypsum 3 % diperoleh nilai rata-rata sebesar 3,73 mm, dan kadar kadar limbah gypsum 4% diperoleh nilai rata-rata sebesar 4,17mm sehingga nilai *flow* untuk SMA Kasar mengikuti aturan Umum Bina Marga 2018. Semakin besar proporsi kadar limbah gypsum, maka semakin besar pula angka Flow. Peningkatan *flow* pada campuran seiring penambahan kadar limbah gypsum yang menyebabkan semakin banyak rongga pada campuran, hal ini disebabkan karena limbah gypsum tidak mampu

mengisi rongga pada butiran agregat sehingga mengurangi kinerja aspal sebagai perekat agregat yang menyebabkan campuran menjadi lebih elastis dan nilai *flow* meningkat.

Tabel 7. Nilai *Flow* Hasil Pemeriksaan Karakteristik Campuran SMA Kasar

Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
<i>Flow</i>	2,20	2,70	3,10	3,60	4,00
	2,30	2,80	3,30	3,70	4,20
	2,50	2,90	3,40	3,90	4,30
Rata-Rata	2,33	2,80	3,27	3,73	4,17
Syarat	2 - 4,5 (mm)				



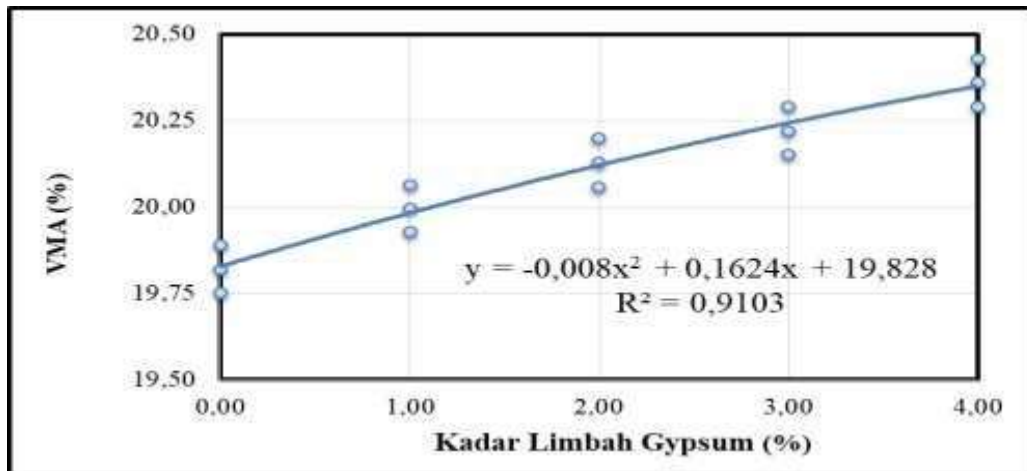
Gambar 6. Pengaruh kadar limbah gypsum terhadap nilai *flow*

4. Analisis Terhadap VMA

Nilai VMA (rongga pada agregat diisi aspal) dihasilkan dari pemakaian kadar aspal 7% dengan variasi mulai dari tanpa bahan tambah (0%) sampai 4% pada SMA kasar. Pada kadar variasi 1% hingga 4%, nilai VMA meningkat menjadi 20,00% hingga 20,36%, mencapai ketentuan Bina Marga. Presentasi VMA terus naik dari 0 hingga 4%, sesuai yang ditunjukkan pada grafik. Karena tingginya kadar aspal yang dipakai selama proses pencampuran dan pemadatan, nilai VMA meningkat. Ini karena aspal efektif, yang juga memiliki tanggung jawab dalam pengisian ruang yang ada di antara partikel agregat dan agregat itu sendiri, seperti yang ditunjukkan pada

Tabel 8. Nilai VMA Hasil Pengujian Karakteristik Berdasarkan Variasi Kadar Limbah Gypsum

Kadar Limbah Gypsum%	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
VMA	19,89	20,06	20,20	20,20	20,43
	19,82	20,00	20,13	20,13	20,36
	19,75	19,93	20,06	20,06	20,29
Rata-Rata	19,82	20,00	20,13	20,13	20,36
Ketentuan	Minimal 17 (%)				



Gambar 7. Pengaruh variasi kadar limbah gypsum terhadap nilai VMA

PEMBAHASAN

A. Stabilitas

Tabel 5 dan Gambar 4 menggambarkan jika angka stabilitas mengalami penurunan setiap kali kadar bahan tambah meningkat 1% hingga 4%. Kadar bahan tambah mengalami peningkatan lagi, angka stabilitas menciptakan penurunan. Didapatkan stabilitas terbesar ada dikadar limbah gypsum 0 % kg.

Tabel 9. Nilai Pengaruh kadar Limbah gypsum terhadap Stabilitas

Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
STABILITAS	1466,67	1416,39	1335,31	1248,92	1172,27
Persyaratan	Min 750 (kg)				

B. Void in Mix (VIM)

Gambar 6 dan Tabel 5 menyatakan jika dengan peningkatan 1 % pada kadar bahan tambah, VIM meningkat atau nilainya bertambah.

Tabel 10. Nilai Pengaruh kadar Limbah Gypsum Terhadap VIM

Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
VIM	4,23	4,42	4,58	4,73	4,85
Persyaratan	4 - 5 (%)				

Angka VIM memenuhi batas minimum yaitu 4 % pada kadar limbah gypsum 4,00 % sedang VIM tidak mengikuti batas tertinggi yang telah ditetapkan ialah 5 %.

C. Flow

Menurut Gambar 6 dan Tabel 7, nilai $R^2 = 0,9956$ menunjukkan bahwa ada penurunan pada kadar bahan tambah 0% hingga 4%. Diperoleh *flow* batas maksimum yaitu 4,00% dengan angka *flow* yakni 4,17mm.

Tabel 11. Nilai Pengaruh kadar Limbah Gypsum Terhadap Flow

Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
FLOW	2,33	2,80	3,27	3,72	4,17
Persyaratan	2 - 4,5 (mm)				

D. Void in Mineral Aggregate (VMA)

Gambar 7 dan Tabel 8 menyatakan jika peningkatan 1 % dalam kadar bahan tambah menunjukkan bahwa VMA mengalami peningkatan. Diperoleh nilai terendah VMA sebesar 19,83 % dan tidak sampai pada batas terendah yakni 17 % meskipun kadar limbah gypsum sudah 0,00 %.

Tabel 12. Nilai Pengaruh kadar Limbah Gypsum Terhadap VMA

Kadar Limbah Gypsum %	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
VMA	19,83	19,98	20,12	20,24	20,35

KESIMPULAN

Karakteristik agregat dari Sungai Sadang Kabupaten Pinrang, aspal penetrasi 60/70, berat jenis *filler* semen, dan limbah gypsum sebagai bahan tambah memenuhi persyaratan dicampuran SMA Kasar berdasarkan spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Pada pengujian *Marshall Konvensional* dengan pengaruh adanya penambahan Limbah Gypsum dimana dapat mempengaruhi semua angka karakteristik campuran SMA Kasar yaitu Stabilitas, *Flow*, VIM, VMA. Dimana nilai Stabilitas mengalami penurunan dari 1% sampai 4%, Sedangkan presentase *Flow*, VIM dan VMA terjadi peningkatan nilai.

REFERENSI

- [1] A. Hidayah and S. D. Hartantyo, "Pengaruh Penambahan Limbah Serbuk Gypsum Sebagai Bahan Pengganti Filler pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course," *j. mitra teknik sipil*, vol. 4, no. 3, p. 545, Aug. 2021, doi: 10.24912/jmts.v0i0.12554.
- [2] D. Ginting, "Karakterisasi Papan Gypsum Dengan Penambahan Polimer EVA (Ethylene Vinyl Acetate)," *Photon*, vol. 13, no. 1, May 2023, doi: 10.37859/jp.v13i1.4061.
- [3] A. Jafari and P. Sadeghian, "Applications of Recycled Gypsum from Waste Drywalls in the Construction Industry: A Review," in *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2022*, vol. 359, R. Gupta, M. Sun, S. Brzev, M. S. Alam, K. T. W. Ng, J. Li, A. El Damatty, and C. Lim, Eds., in Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 359. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 817–832. doi: 10.1007/978-3-031-34027-7_54.
- [4] W.-T. Lin, K. Korniejenco, D. Mierzwiński, M. Łach, A. Cheng, and K.-L. Lin, "Feasibility Study of Waste Gypsum as a Full Replacement for Fine Aggregates of Controlled Low-Strength Material," in *10th MATBUD’2023 Scientific-Technical Conference*, MDPI, Feb. 2023, p. 19. doi: 10.3390/materproc2023013019.
- [5] C. Timbonga, "Pemanfaatan Batu Gunung Limbong Kecamatan Rantepao Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 31–39, 201AD, doi: 10.52722/wna04k84.
- [6] A. Lande, "Pemanfaatan Batu Sungai Malela Desa Kasintuwu Kabupaten Luwu Timur Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Halus," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 450–460, 2024, doi: <https://doi.org/10.52722/nnecmg85>.
- [7] J. Pagau, "Pemanfaatan Agregat Sungai (Salu Bangkote) Kabupaten Tana Toraja Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 6, no. 2, 2024, doi: 10.52722/zrxvcvf38.
- [8] Grace, "Penggunaan Limbah Beton Sebagai Agregat Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Halus," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 499–506, 2021, doi: <https://doi.org/10.52722/m47hr316>.

- [9] R. Hawinuti, R. Gazalie, and Tomy Isanto, “Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara Sebagai Pengganti Pasir pada Campuran Beraspal HRS-BASE,” *gradasi*, vol. 8, no. 1, pp. 103–115, Jun. 2024, doi: 10.31961/gradasi.v8i1.1401.
- [10] D. Sujatmiko, R. Robby, and I. Elvina, “Analisis Penggunaan Limbah Gypsum Sebagai Agregat Halus Pada Campuran Perkerasan HOT ROLLED SHEET BASE (HRS-BASE): Analysis of the use of Gypsum Waste as A Fine Aggregate in Hot Rolled Sheet Base (HRS-Base) Pavement Mix,” *SS*, vol. 9, no. 1, pp. 67–78, Sep. 2022, doi: 10.29303/spektrum.v9i1.238.
- [11] R. T. Bethary, D. E. Intari, and S. Asyiah, “Karakteristik Campuran Lataston (HRS-WC) dengan Filler Gypsum pada Aspal Modifikasi Polimer,” *JRST*, vol. 5, no. 2, p. 91, Aug. 2022, doi: 10.30595/jrst.v5i2.10456.
- [12] J. Men, Y. Li, P. Cheng, and Z. Zhang, “Recycling phosphogypsum in road construction materials and associated environmental considerations: A review,” *Heliyon*, vol. 8, no. 11, p. e11518, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11518.
- [13] Z.-Y. Jiang, X.-P. Sun, Y.-Q. Luo, X.-L. Fu, A. Xu, and Y.-Z. Bi, “Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 432, p. 136609, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609.
- [14] Y. Liu, D. Zhang, L. You, H. Luo, and W. Xu, “Recycling phosphogypsum in subbase of pavement: Treatment, testing, and application,” *Construction and Building Materials*, vol. 342, p. 127948, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127948.
- [15] G. Qian, Y. Zhong, X. Li, H. Peng, J. Su, and Z. Huang, “Experimental Study on the Road Performance of High Content of Phosphogypsum in the Lime–Fly Ash Mixture,” *Front. Mater.*, vol. 9, p. 935113, Jul. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.935113.