

KARAKTERISTIK SUBSTITUSI *LIMESTONE* SEBAGAI PENGANTI SEBAGIAN FILLER PADA CAMPURAN STONE MATRIX ASPHALT (SMA) TIPIS TERHADAP NILAI MARSHALL

Ikko Bagus Ismanto^{1*}

¹ Program Studi Teknik Sipil, Sains Dan Teknik, Universitas Bojonegoro, Bojonegoro

Jalan Lettu Suyitno No 2 Kalirejo Bojonegoro 62119

E-mail: ikkobagoesismanto@gmail.com^{1*}

(Artikel dikirim: 23 September 2025, Direvisi: 7 November 2025, Diterima: 26 Desember 2025)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v13i3.4900>

ABSTRAK: Pertumbuhan lalu lintas yang terus-menerus meningkatkan beban jalan, menuntut inovasi dalam teknologi perkerasan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas jalan dengan memanfaatkan batu kapur (*limestone*) sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran laston Stone Matrix Asphalt (SMA) tipis. Penelitian eksperimental dan kuantitatif ini berfokus pada analisis parameter Marshall, termasuk stabilitas, flow, dan kepadatan, dengan variasi persentase *limestone* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Metode penelitian melibatkan uji laboratorium terhadap agregat, aspal, dan campuran keduanya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, dengan nilai abrasi sebesar 33,74% yang berada di bawah ambang batas 40%. Berdasarkan uji Marshall, nilai stabilitas memenuhi spesifikasi pada semua variasi, tetapi nilai flow pada variasi 10% dan 15% tidak memenuhi standar. Hasil analisis VIM menunjukkan bahwa variasi 5% dan 10% memenuhi spesifikasi. Dari data-data tersebut, didapatkan kadar penambahan optimum sebesar 6,5%. Penelitian ini menunjukkan potensi pemanfaatan limbah batu kapur untuk menghasilkan campuran aspal yang kuat dan berkelanjutan.

KATA KUNCI : *laston SMA, limestone, Marshall, perkerasan, stabilitas.*

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan lalu lintas yang berkelanjutan ini secara langsung meningkatkan beban dan frekuensi penggunaan jalan, sehingga menuntut inovasi dalam teknologi perkerasan jalan. Dalam konteks globalisasi dan tuntutan akan infrastruktur yang optimal di Indonesia, upaya peningkatan kualitas jalan menjadi sangat krusial (Rahmawati & Ma, 2016). Jalan yang berkualitas tidak hanya harus kokoh, tetapi juga harus mampu memberikan rasa aman dan kenyamanan bagi penggunanya, baik dari segi struktur maupun tekstur permukaan. Permukaan jalan yang ideal diharapkan rata, tidak bergelombang, tidak melendut, dan bebas dari lubang (Ismanto & Novianto, n.d.). Perkerasan jalan pada dasarnya adalah campuran dari agregat dan bahan pengikat yang dirancang khusus untuk menahan beban lalu lintas.

Dokumen ini mengidentifikasi tiga jenis perkerasan jalan: perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (Putra, 2016). Dalam merencanakan konstruksi perkerasan jalan yang bermutu tinggi, pengujian laboratorium terhadap bahan-bahan penyusunnya menjadi langkah yang sangat krusial. Pengujian tersebut memastikan bahwa agregat, aspal, dan campuran keduanya memenuhi persyaratan teknis sehingga

mampu menahan beban lalu lintas dan faktor lingkungan. Dalam konteks tersebut, pemanfaatan limbah batu kapur (*limestone*) sebagai pengganti sebagian filler pada campuran laston Stone Matrix Asphalt (SMA) tipis menjadi penting untuk dikaji, baik dari sisi kinerja struktural maupun aspek keberlanjutan material.

Penelitian ini secara spesifik berfokus pada penggunaan *limestone* (batu kapur) sebagai bahan pengganti (*substitusi*) filler dalam campuran laston SMA tipis. Penggunaan limbah batu kapur yang sudah tidak terpakai menjadi titik sentral penelitian ini, sebagai upaya untuk memanfaatkan material yang sering dianggap sebagai limbah. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan kualitas perkerasan, tetapi juga pada aspek keberlanjutan dan pemanfaatan kembali material. Penelitian ini merupakan studi kasus dari analisis parameter Marshall dengan menggunakan campuran laston (SMA – Tipis) dengan menggunakan variasi *limestone* sebagai bahan pengganti sebagian filler dengan persentase 0%, 5%, 10% dan 15%.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan *limestone* sebagai filler pada campuran aspal, namun umumnya berfokus pada campuran beraspal konvensional atau

KARAKTERISTIK SUBSTITUSI *LIMESTONE* SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN FILLER UNTUK CAMPURAN (SMA) TIPIS TERHADAP NILAI MARSHALL

(Ikko Bagus Ismato)

menggunakan material limestone komersial. Dalam penelitian ini, yang dikaji secara spesifik adalah pemanfaatan Limestone daerah Rengel Kecamatan Tuban sebagai pengganti sebagian filler pada campuran laston Stone Matrix Asphalt (SMA) tipis yang direncanakan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II. Kebaruan penelitian terletak pada kombinasi penggunaan SMA tipis dengan sumber limestone berupa limbah, serta evaluasi menyeluruh terhadap parameter Marshall (stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFA) untuk menentukan kadar penambahan optimum yang layak diterapkan pada kondisi perkerasan di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental-kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bojonegoro. Perencanaan campuran dan pengujian laboratorium mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II untuk pekerjaan konstruksi jalan serta beberapa standar pengujian yang relevan (ASTM dan SNI). Metode ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi limestone sebagai pengganti sebagian filler pada campuran laston Stone Matrix Asphalt (SMA) tipis terhadap parameter Marshall.

Bahan yang digunakan terdiri dari agregat kasar quarry Pamotan dan halus yang diperoleh dari Lumajang, aspal penetrasi 60/70 sebagai bahan pengikat, serta filler semen dan batu kapur (limestone) dari desa Rengel Kabupaten Tuban. Variabel utama penelitian adalah persentase substitusi limestone terhadap total filler, yaitu 0%, 5%, 10% dan 15%. Setiap variasi campuran dibuat dengan kadar aspal optimum yang ditentukan melalui serangkaian uji Marshall pendahuluan. Untuk setiap variasi persentase limestone disiapkan benda uji Marshall berbentuk silinder berdiameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm, dengan jumlah minimal 5 benda uji per variasi untuk memastikan replikasi data secara memadai.

Agregat kasar dan halus terlebih dahulu dipersiapkan dengan cara diayak sesuai gradasi rencana dan dikondisikan hingga memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II. Agregat kemudian dipanaskan pada suhu sekitar 160–170 °C, sedangkan aspal dipanaskan pada kisaran 150–160 °C hingga mencapai viskositas yang sesuai untuk pencampuran. Filler semen dan limestone ditimbang sesuai proporsi masing-masing variasi (0%, 5%, 10% dan 15% dari total filler) lalu dicampurkan dengan agregat panas.

Setelah itu, aspal panas dituangkan ke dalam campuran agregat–filler dan diaduk hingga tercapai homogenitas yang baik. Campuran panas kemudian dimasukkan ke dalam cetakan Marshall dalam dua lapis dan dipadatkan menggunakan hammer Marshall dengan 75 kali tumbukan per sisi untuk mensimulasikan kondisi lalu lintas berat.

Setelah proses pemadatan selesai, benda uji dikeluarkan dari cetakan, didinginkan hingga suhu ruang, dan disimpan selama waktu tertentu sebelum dilakukan pengujian Marshall. Prosedur ini diterapkan secara konsisten untuk setiap variasi persentase limestone sehingga perlakuan antar sampel dapat diperbandingkan secara adil. Sebelum pembuatan benda uji Marshall, dilakukan pengujian karakteristik agregat yang meliputi analisis saringan, berat jenis dan penyerapan, serta uji abrasi Los Angeles untuk memastikan agregat memenuhi persyaratan teknis. Pengujian terhadap aspal meliputi uji penetrasi dan pengujian dasar lainnya untuk menilai kesesuaian aspal terhadap spesifikasi. Setelah benda uji Marshall siap, dilakukan pengujian Marshall untuk setiap variasi campuran guna memperoleh nilai stabilitas, flow dan density pada kondisi beban aksial.

Data hasil uji Marshall digunakan untuk menghitung parameter volumetrik campuran, yaitu Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA) dan Void Filled with Asphalt (VFA). Nilai-nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan batasan yang disyaratkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II untuk lalu lintas berat. Berdasarkan kombinasi hasil stabilitas, flow dan parameter volumetrik, ditentukan variasi campuran yang memenuhi spesifikasi serta kadar penambahan aspal optimum. Pada penelitian ini diperoleh kadar penambahan optimum sebesar 6,5%, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja campuran SMA tipis dengan substitusi limbah limestone. Secara garis besar penelitian ini dapat di lihat dalam diagram alur pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Diagram alir penelitian
(Sumber: Hasil Penelitian)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian laboratorium terhadap agregat, aspal, dan campuran laston Stone Matrix Asphalt (SMA) tipis dengan variasi persentase limestone sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian meliputi karakteristik dasar agregat dan aspal, serta pengujian Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, density, dan parameter volumetrik seperti Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Asphalt (VFA). Hasil-hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II untuk menilai kelayakan kinerja campuran.

Pemeriksaan ini dibagi menjadi tiga bagian utama: pengujian agregat, aspal, dan campuran keduanya. Untuk agregat, serangkaian eksperimen dilakukan untuk menentukan karakteristiknya, seperti berat jenis dan kekuatan. Selain itu, pengujian gradasi agregat juga dilakukan. Tujuannya adalah untuk menentukan persentase masing-masing fraksi agregat yang optimal, sehingga menghasilkan campuran perkerasan jalan yang sesuai dengan standar mutu dan kelas jalan yang ditetapkan. Dengan demikian, kualitas bahan yang digunakan dapat menjamin daya tahan dan kinerja perkerasan jalan dalam jangka panjang.

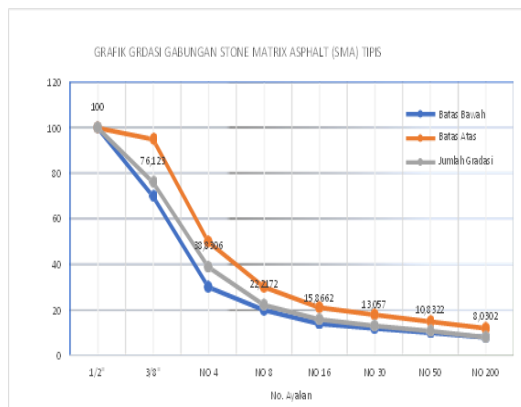
Pada pemeriksaan aspal, dilakukan beberapa tes antara lain tes penetrasi dan lain lain. Pemeriksaan aspal memiliki tujuan utama untuk mengukur dan mengontrol sifat-sifat serta kekuatan material tersebut. Dengan melakukan serangkaian pengujian, kualitas aspal yang digunakan dapat dipastikan telah sesuai dengan standar yang dibutuhkan. Ini sangat krusial karena aspal merupakan komponen utama dalam perkerasan jalan yang menahan beban lalu lintas. Salah satu metode yang digunakan untuk menguji campuran aspal dan agregat adalah Uji Marshall.

Pengujian ini dirancang untuk mengevaluasi kekuatan campuran saat diberi beban secara aksial atau tertekan. Melalui uji ini, persentase aspal yang paling ideal dalam campuran dapat ditentukan untuk menghasilkan daya dukung yang optimal pada perkerasan jalan. Hasil uji Marshall membantu memastikan campuran tersebut cukup kuat untuk menahan beban kendaraan tanpa mengalami deformasi berlebihan. Sebelum mencampur aspal, dilakukan analisis saringan agregat sebagai

KARAKTERISTIK SUBSTITUSI *LIMESTONE* SEBAGAI PENGANTI SEBAGIAN FILLER UNTUK CAMPURAN (SMA) TIPIS TERHADAP NILAI MARSHALL (Ikko Bagus Ismato)

langkah awal. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengukur distribusi ukuran butiran agregat, seperti kerikil, batu pecah, dan pasir. Informasi ini sangat penting untuk menentukan komposisi campuran agregat yang akan memenuhi spesifikasi teknis.

Dengan mengetahui ukuran butiran yang tepat, kita bisa membuat campuran yang padat dan stabil, yang pada akhirnya akan meningkatkan kualitas dan daya tahan perkerasan jalan. Hasil dari analisis saringan ini menjadi panduan dalam merancang campuran yang seimbang dan efisien.



Gambar 2 Analisis Saringan
(Sumber: Hasil Penelitian)

Dari hasil analisis diketahui pembagian butiran agregat dapat memenuhi dengan gradasi yang baik dan sesuai dengan spesifikasi Bina Marga tahun 2018. Suatu campuran dengan gradasi butiran yang ideal cenderung sangat stabil, cukup kedap air, dan memiliki massa jenis yang tinggi. Untuk mengevaluasi sifat-sifat ini lebih lanjut, dilakukan pengujian berat jenis dan daya serap terhadap agregat kasar. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar disajikan pada **Tabel 1**. Nilai berat jenis bulk sebesar 2,30 dan penyerapan sebesar 1,2% menunjukkan bahwa agregat kasar memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018 untuk digunakan sebagai bahan perkerasan. Hal serupa terlihat pada agregat halus **Tabel 2** dengan berat jenis 2,72 dan penyerapan 0,6%, yang mengindikasikan kualitas agregat halus yang baik.

Tabel 1. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat Kering Oven	6000	Gram

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat kering Permukaan Jenuh (SSD)	6072	Gram
Berat Dalam Air	3460	Gram
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,30	
<i>Saturated Surface Dry</i>	2,33	
<i>Apparent Spesific Gravity</i>	2,36	
Penyerapan	1,2	%

(Sumber : Hasil Penelitian)

Pengujian agregat halus juga meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 2**. Dengan berat benda uji 1500 Gram

Tabel 2. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat Kering permukaan jenuh	1500	Gram
Berat Piknometer + air suling	1997	Gram
Berat Piknometer + air suling + Benda Uji SSD	2948	Gram
Berat Kering Oven	2491	
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,72	
<i>Saturated Surface Dry</i>	2,74	
<i>Apparent Spesific Gravity</i>	2,77	
Penyerapan	0,6	%

(Sumber : Hasil Penelitian)

Proses pengujian dilanjutkan dengan memeriksa agregat kasar menggunakan mesin Los Angeles. Tujuannya adalah untuk mengukur seberapa tahan agregat tersebut terhadap abrasi atau keausan. Nilai keausan Los Angeles sebesar 33,74% berada di bawah batas maksimum 40%, sehingga agregat memiliki ketahanan aus yang memadai terhadap pembebanan lalu lintas. Perhitungan analisis data dapat dilihat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Keausan Los Angeles

Lolos Saringan	Sebelum	Berat Sesudah
76,2 (3")		
63,5 (2 ½")		
50,8 (2")		
36,1 (1 ½")		
25,4 (1")		
19,1 (¾")		
12,7 (½")	2500	
9,25 (¾")	2500	
6,35 (¼")		
4,75 (4")		
total	5000	3313

(Sumber : Hasil Penelitian)

Banyaknya material yang aus dapat dihitung dengan Abrasi = $\frac{a-b}{a} \times 100\%$ (1).

a = 5000 gram b = 333313 gram

a-b = 2080 gram

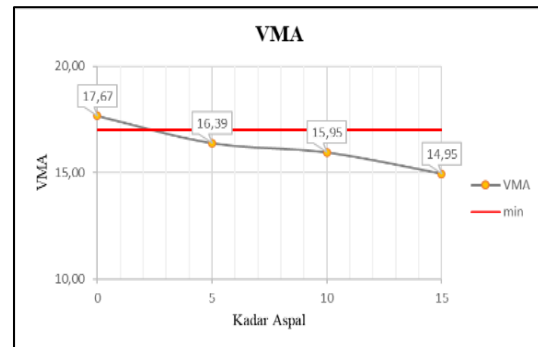
$$\text{keausan} = \frac{(a-b)}{a} \times 100 = 33,74\%$$

(Sumber : Hasil Penelitian)

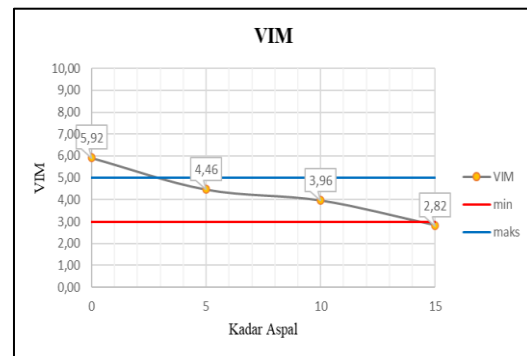
Langkah selanjutnya adalah pencampuran aspal beton dengan menggunakan 5 benda uji dengan masing-masing variasi kadar aspal optimum dengan substitusi limbah limestone sebagai filler yaitu 0%, 5%, 10% dan 15% dengan menggunakan marshall test untuk mengetahui kadar penambahan optimum yang dipakai. Untuk gradasi campuran menggunakan spesifikasi kombinasi gradasi Bina Marga tahun 2018.

Pengujian marshall untuk menentukan *stability* campuran aspal dengan agregat terhadap *flow* dengan spesifikasi marshall test untuk jenis lalu lintas berat yaitu 50 kali (Lb). **Gambar 3** dan **Gambar 4** menunjukkan hubungan kadar aspal

dan persentase limestone terhadap VMA dan VIM. Peningkatan kadar aspal cenderung menaikkan VMA dan menurunkan VIM, dengan variasi 5% dan 10% limestone yang masih berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga.



Gambar 3 Void in the Mineral Aggregate
(Sumber : Hasil Penelitian)



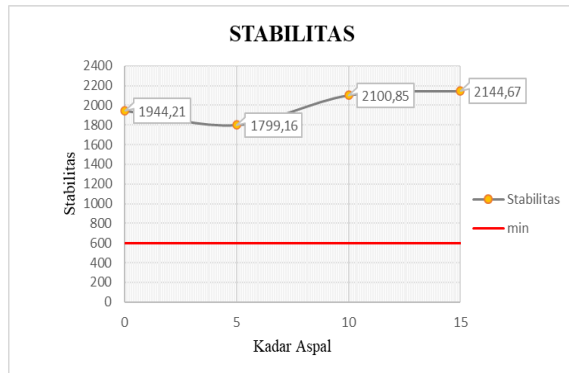
Gambar 4 Void in material
(Sumber : Hasil Penelitian)

Meskipun demikian, nilai VMA pada seluruh variasi belum sepenuhnya mencapai batas yang diharapkan, sehingga aspek kerapatan struktur campuran masih perlu dioptimalkan. Secara umum, penambahan filler limestone akan mengurangi rongga dalam campuran dan memperkecil VIM, sehingga campuran menjadi lebih rapat dan kaku.

Pada kadar tertentu, kondisi ini meningkatkan stabilitas karena kontak antar partikel agregat dan mastic aspal-filler menjadi lebih baik sehingga gaya gesek dan interlocking meningkat. Namun apabila kadar limestone terlalu tinggi, campuran menjadi terlalu kaku dan getas, rongga efektif bagi aspal berkurang, dan kemampuan campuran untuk mendistribusikan tegangan menurun, sehingga stabilitas dapat kembali turun atau tidak lagi bertambah secara signifikan.

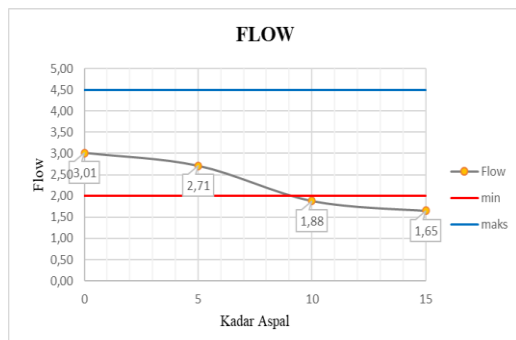
KARAKTERISTIK SUBSTITUSI *LIMESTONE* SEBAGAI PENGANTI SEBAGIAN FILLER UNTUK CAMPURAN (SMA) TIPIS TERHADAP NILAI MARSHALL (Ikko Bagus Ismato)

Langkah selanjutnya menganalisis nilai stabilitas dan nilai flow, dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 4 Stabilitas
(Sumber : Hasil Penelitian)

Gambar 5 memperlihatkan bahwa seluruh variasi persentase *limestone* memberikan nilai stabilitas di atas batas minimum yang disyaratkan, dengan stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar 15% *limestone*. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *limestone* hingga 15% tidak menurunkan kapasitas dukung campuran secara signifikan.

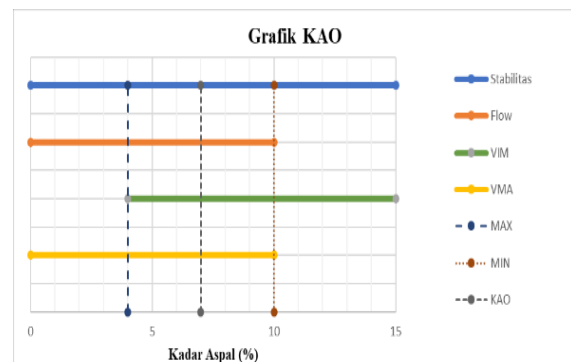


Sebaliknya, nilai flow pada **Gambar 6** menunjukkan bahwa nilai flow pada kadar *limestone* 10% dan 15% yang tidak memenuhi spesifikasi mengindikasikan bahwa deformasi plastis campuran pada saat pembebanan sudah berada di luar rentang yang diizinkan. Pada kadar ini, kombinasi antara kadar aspal, kadar filler, dan rongga campuran menyebabkan lapisan mastic menjadi terlalu tebal dan kurang kaku, sehingga saat diberi beban, campuran mengalami kelelahan yang lebih besar. Hal ini sejalan dengan temuan beberapa penelitian bahwa peningkatan kadar filler tertentu dapat meningkatkan stabilitas, tetapi pada saat yang sama meningkatkan nilai flow bila mastic menjadi terlalu dominan.

Secara mikrostruktural, filler *limestone* berperan dalam membentuk mastic aspal–filler yang mempengaruhi sifat adhesi (ikatan aspal–agregat) dan kohesi (kekuatan dalam mastic itu sendiri). Filler berbasis kalsium karbonat seperti *limestone* umumnya meningkatkan adhesi karena interaksi polar antara permukaan mineral dan komponen polar dalam aspal, sehingga mengurangi risiko stripping dan meningkatkan ketahanan terhadap beban. Namun jika volumenya berlebihan, mastic menjadi sangat kaku dan rapuh, sehingga kohesi total campuran dapat menurun dan campuran menjadi sensitif terhadap retak dan deformasi.

Berdasarkan kombinasi parameter stabilitas, flow, VIM, dan VMA, diperoleh kadar penambahan aspal optimum sebesar 6,5% seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. Penentuan kadar penambahan aspal optimum sebesar 6,5% dilakukan dengan menggunakan pendekatan parameter Marshall klasik, yaitu dengan mengamati kurva hubungan antara kadar aspal terhadap stabilitas, flow, VIM, dan VMA. Nilai 6,5% dipilih sebagai titik potong kompromi di mana stabilitas berada dekat nilai maksimum, sementara flow dan VIM masih berada dalam rentang yang disyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II untuk lalu lintas berat.

Secara praktis, kadar ini diperoleh melalui interpolasi dari grafik hasil pengujian, dengan mempertimbangkan bahwa kadar aspal yang terlalu rendah akan meningkatkan VIM dan menurunkan stabilitas, sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi cenderung menurunkan VIM secara berlebihan dan meningkatkan nilai flow di luar batas yang diizinkan.



Gambar 6 Kadar Penambahan Optimum
(Sumber : Hasil Penelitian)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, agregat kasar dan halus yang digunakan memenuhi standar teknis Bina Marga, dengan

nilai keausan Los Angeles sebesar 33,74% yang berada di bawah batas maksimum 40%. Nilai berat jenis dan daya serap agregat juga menunjukkan kualitas yang stabil dan baik untuk aplikasi perkerasan jalan. Hasil uji Marshall menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar limestone (0%, 5%, 10%, dan 15%) memiliki nilai stabilitas yang memenuhi spesifikasi, dengan nilai tertinggi pada kadar 15%. Namun demikian, nilai flow pada kadar 10% dan 15% tidak memenuhi batas yang disyaratkan.

Nilai Void in Mix (VIM) pada kadar 5% dan 10% berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga, sedangkan Void in Mineral Aggregate (VMA) pada semua variasi belum sepenuhnya mencapai nilai yang diharapkan. Berdasarkan kombinasi hasil stabilitas, flow, VIM, dan VMA, diperoleh kadar penambahan aspal optimum sebesar 6,5%. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah batu kapur sebagai bahan substitusi filler dapat menjadi alternatif berkelanjutan yang berpotensi meningkatkan kekuatan dan durabilitas campuran aspal.

Dengan demikian, untuk penerapan di lapangan, penggunaan kadar penambahan aspal sekitar 6,5% dengan substitusi limestone pada rentang yang memenuhi persyaratan parameter Marshall dan spesifikasi Bina Marga dapat dipertimbangkan sebagai rekomendasi desain campuran laston SMA tipis yang mendukung pemanfaatan limbah batu kapur secara berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Bojonegoro, khususnya Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik, atas dukungan fasilitas dan kesempatan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bojonegoro atas bantuan dan kerja sama dalam pelaksanaan seluruh pengujian material dan campuran aspal.

Tidak lupa, penulis berterima kasih kepada rekan-rekan sejawat, dosen pembimbing, serta pihak-pihak lain yang telah memberikan saran, dukungan, dan motivasi selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang perkerasan jalan yang berkelanjutan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan. *Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018, Revisi 2*, 1–1036.
- Ismanto, I. B., & Novianto, H. (n.d.). Karakteristik Substitusi Recycle Limbah Beton Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Untuk Campuran Aspal Concrete Terhadap Nilai Marshall Pendahuluan Perkerasan jalan adalah suatu campuran antara agregat dan bahan pengikat yang digunakan untuk menampung beban. 794–799.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2012). An overview of crumb rubber modified asphalt. *International Journal of Physical Sciences*, 7(2), 166–170. <https://doi.org/10.5897/IJPSX11.007>
- Putra, F. Y. E. (2016). Pemanfaatan Limbah Polyethylene Terephthalate (Pet) Dengan Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) Pada Pembuatan Laston Wc. *Jurnal Online UNESA*, 2(1), 1–23.
- Rahmawati, A. N., & Ma, A. (2016). *Engineering , Environment , and Technology Vol xx No xx 20xx Research Article Utilization Of Hdpe Plastic Waste For Asphalt Making Additives With A Combination Of Glass Waste Filler*. xx(xx), 1–12. <https://doi.org/10.24273/jgeet.2016.1.2.001>
- Saputra, K. (2022). The Effect of Using Polyethylene Terephthalate (PET) Polymer on the Marshall Testing Characteristics of Asphalt Mixture (AC-WC). *Manganite/ Journal of Chemistry and, I(1)*. <https://jurnal.institutsunandoe.ac.id/index.php/manganite/article/view/55%0Ahttps://jurnal.institutsunandoe.ac.id/index.php/manganite/article/download/55/145>
- Yin, L., Yang, X., Shen, A., Wu, H., Lyu, Z., & Li, B. (2021). Mechanical properties and reaction mechanism of microwave-activated crumb rubber-modified asphalt before and after thermal aging. *Construction and Building Materials*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120773>
- Leon, L. P., Smith, J., & Frank, A. (2024). *Enhancing intermediate-temperature fracture resistance of stone matrix asphalt*

KARAKTERISTIK SUBSTITUSI *LIMESTONE* SEBAGAI PENGANTI SEBAGIAN FILLER UNTUK CAMPURAN (SMA) TIPIS TERHADAP NILAI MARSHALL
 (Ikko Bagus Ismato)

- containing untreated recycled materials.*
- Xu, S., et al. (2024). *A novel environmentally-friendly filler for asphalt mastic*. Journal of Cleaner Production / Renewable Materials (article on filler alternatives).
- (Peneliti) *Laboratory studies on Stone Matrix Asphalt mix prepared using lime and cement as filler material and cellulose Arbocel fibre*. (2023). Conference paper / Journal article (laboratory study).