

Kinerja Marshall Warm Mix Asphalt sebagai Konstruksi Jalan Ramah Lingkungan

Hery Awan Susanto^{1, *)}, Didi Yuda Wiranata²⁾ dan Dani Nugroho Saputro¹⁾

¹ Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

² Teknik Sipil, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

*) *Corresponding author*: hery.susanto@unsoed.ac.id

Abstract

Warm Mix Asphalt is a type of asphalt mixture that is environmentally friendly, because it is produced at moderate temperatures so it requires energy and produces low air pollution. WMA is a type of asphalt mixture developed from Hot Mix Asphalt (HMA) with the addition of additives, such as: sasobit, zycotherm, and zeolite. As a type of environmentally friendly construction, it is necessary to know the performance of WMA to provide maximum benefits. This study aims to determine the Marshall performance of WMA with added zeolite compared to HMA. WMA was made by adding zeolite variations of 1%, 1.25% and 1.5% to the weight of the HMA aggregate, so that optimal WMA performance results could be obtained. Tests were carried out using the Marshall method in the laboratory. The test results show that WMA with zeolite added produces higher density, stability, and Marshall quotient (MQ), while flow is lower than HMA. Increasing the percentage of zeolite content in the WMA mixture was able to increase density, stability, MQ, and decrease flow.

Abstrak

*Warm Mix Asphalt merupakan suatu jenis campuran aspal yang ramah lingkungan, karena diproduksi pada suhu sedang sehingga membutuhkan energi dan menghasilkan polusi udara yang rendah. WMA merupakan jenis campuran beraspal yang dikembangkan dari Hot Mix Asphalt (HMA) dengan penambahan bahan aditif, seperti: sasobit, zycotherm, dan zeolit. Sebagai jenis konstruksi yang ramah lingkungan, maka perlu diketahui kinerja WMA, sehingga memberikan manfaat penggunaan yang maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja Marshall WMA dengan bahan tambah zeolit dibandingkan dengan HMA. WMA dibuat dengan menambahkan variasi zeolit 1%, 1,25% dan 1,5% terhadap berat agregat HMA, sehingga bisa diperoleh hasil kinerja WMA yang optimal. Pengujian dilakukan dengan metode Marshall di laboratorium. Hasil pengujian menunjukkan bahwa WMA dengan bahan tambah zeolit menghasilkan *density*, stabilitas, dan *Marshall quotient* (MQ) yang lebih tinggi, sedangkan *flow* lebih rendah dibandingkan HMA. Peningkatan kandungan persentase kadar zeolit dalam campuran WMA mampu meningkatkan *density*, stabilitas, MQ, dan menurunkan *flow*.*

Kata kunci: *Warm Mix Asphalt, Hot Mix Asphalt, Zeolit, Marshall.*

PENDAHULUAN

Jalan adalah prasarana transportasi darat yang dibangun untuk mendukung kelancaran pergerakan lalu lintas. Pada umumnya jalan dibangun menggunakan jenis konstruksi *hot mix asphalt* (HMA) yang membutuhkan energi dan menghasilkan emisi CO₂ yang cukup tinggi [1]. Hal tersebut akan berdampak terhadap pemanasan global dan penurunan kualitas lingkungan. Salah satu upaya dalam rangka mengurangi dampak negatif penggunaan HMA adalah dengan mengaplikasikan *warm mix asphalt* (WMA). WMA adalah campuran beraspal dengan temperatur pencampuran 30°C lebih rendah dari HMA dengan tambahan bahan aditif. WMA direncanakan memiliki kualitas yang sama dengan HMA dan ramah lingkungan [2].

Salah satu bahan aditif yang digunakan dalam WMA adalah zeolit. Zeolit merupakan bahan aditif yang memiliki kemampuan untuk menurunkan temperatur pencampuran dan pemadatan HMA [3-5]. Zeolit juga mampu mempertahankan sifat viskositas aspal pada suhu rendah, sehingga aspal tetap dapat berfungsi mengisi pori-pori agregat dengan baik. Ada dua jenis zeolite, yaitu zeolit alam dan sintesis. Penggunaan zeolit alam sebagai bahan tambah untuk menghasilkan WMA dipilih karena lebih ekonomis jika dibandingkan dengan zeolit sintetis [6-9].

WMA memiliki sifat daya rekat terhadap agregat dan ketahanan air yang tinggi [2] sehingga WMA diharapkan memiliki ketahanan terhadap kerusakan jalan dibandingkan dengan HMA. Namun demikian masih perlu dilakukan penelitian terkait dengan kemampuan kinerja WMA dengan menggunakan bahan tambah zeolit alam. Persentase penggunaan zeolit yang ideal dalam WMA juga perlu diteliti lebih jauh sehingga menghasilkan formulasi *mix design* yang tepat. Saat ini penelitian tentang penggunaan persentase zeolite alam yang tepat untuk menghasilkan formulasi *mix design* WMA belum dilakukan dengan baik. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian yang berkaitan penggunaan zeolit alam dalam WMA untuk menghasilkan formulasi *mix design* WMA dengan kinerja yang memenuhi standard Bina Marga.

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi tentang kinerja WMA dengan variasi persentase zeolit pada WMA. Dalam penelitian ini dapat pula disimpulkan tentang perbandingan kinerja antara HMA dan WMA. Penelitian ini diharapkan akan memberikan dorongan dalam peningkatan penerapan WMA di lapangan, sehingga dapat mengurangi penggunaan energi dan emisi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di laboratorium dengan tahapan meliputi: pengujian material, *mix design* campuran, dan pengujian Marshall. Selanjutnya analisis dilakukan terhadap karakteristik Marshall WMA dengan bahan tambah zeolit alam. Untuk penentuan variasi kadar aspal yang digunakan, dilakukan perhitungan menentukan kadar aspal rencana, sebagai berikut:

$$P_b = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18 (\%FF) + K \quad (1)$$

$$P_b = 0,035(39) + 0,045(55) + 0,18 (6,5) + 0,75$$

$$P_b = 5,74\%$$

Benda uji yang dibuat untuk menentukan KAO ini dari HMA dengan suhu pencampuran sebesar 155°C dan suhu pemadatan 145°C [10]. Hasil dari perhitungan kadar aspal rencana dibulatkan mendekati 0,5% terdekat, sehingga didapatkan kadar aspal rencana $P_b = 5,5\%$ dan rentang kadar aspal $\pm 1\%$ yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%. Variasi jumlah benda uji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 dan

Tabel 2 :

Tabel 1. Jumlah benda uji untuk mengetahui nilai KAO

Fraksi (%)	Jumlah benda uji
4,5	3
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
Jumlah	15

Tabel 2. Jumlah benda uji dalam penelitian

Kadar Zeolit Alam	Banyak Benda Uji
	Uji Marshall
0%	3
1%	3
1,25%	3
1,5%	3
Jumlah	12

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Agregat

Hasil dari pengujian agregat dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Kasar

Jenis Pengujian		Hasil	Syarat
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i>	100 Putaran	3%	Maks. 8%
	500 Putaran	17%	Maks. 40%
Berat jenis <i>bulk</i> (gr/cc)		2,83	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)		2,86	>2,5
Berat jenis <i>apparent</i> (gr/cc)		2,93	>2,5
Penyerapan Air (%)		1,49%	<3%
Kelekatan Agregat terhadap Aspal (%)		100%	> 95%

Tabel 4. Hasil Pengujian Agregat Halus

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis <i>bulk</i> (gr/cc)	2,62	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,65	>2,5
Berat jenis <i>apparent</i> (gr/cc)	2,70	>2,5
Penyerapan Air (%)	1,13	<3%
Agregat Lolos Ayakan No. 200 (%)	8,91	<10%

Tabel 5. Hasil Pengujian Filler Abu Batu

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
-----------------	-------	--------

Berat jenis (gr/cc)	2,39	2,25 - 2,7
Filler Lolos Ayakan No. 200	82%	> 75%

Tabel menunjukkan hasil pengujian agregat kasar dimana abrasi agregat 100 putaran sebesar 3%, sedangkan untuk 500 putaran didapat hasil sebesar 17% yang telah memenuhi syarat spesifikasi [11]. Untuk pengujian berat jenis *bulk*, SSD, dan *apparent* diperoleh nilai berturut-turut sebesar 2,83 gr/cc, 2,86 gr/cc, dan 2,93 gr/cc [12, 13]. Hasil dari masing-masing berat jenis memenuhi syarat lebih besar dari 2,5 gr/cc. Nilai untuk pengujian penyerapan air didapat 1,49% dan kelekatan agregat terhadap aspal 100% sehingga memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat kasar dapat digunakan dalam campuran WMA.

Tabel menunjukkan hasil pengujian agregat halus dimana berat jenis *bulk*, SSD, dan *apparent* dengan nilai berturut-turut sebesar 2,62 gr/cc, 2,65 gr/cc, dan 2,70 gr/cc. Hasil dari masing-masing berat jenis memenuhi syarat lebih besar dari 2,5 gr/cc. Nilai untuk pengujian penyerapan air didapat 1,13% dan lolos ayakan No. 200 sebesar 8,91 % sehingga memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat halus dapat digunakan dalam campuran WMA.

Tabel menunjukkan hasil pengujian filler terdiri dari pengujian berat jenis dan filler lolos ayakan No. 200. Hasil berat jenis 2,395 gr/cc dengan syarat 2,25 – 2,7 gr/cc. Dan untuk pengujian filler lolos ayakan no.200 didapat hasil sebesar 82% dengan syarat lebih besar dari 75%. Sehingga filler dapat digunakan dalam campuran WMA.

Sifat – Sifat Fisik Zeolit

Zeolit alam yang digunakan diperoleh dari CV. Ady Water Bandung. Sebelum digunakan perlu dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui sifat-sifat fisik sehingga bisa ditentukan penggunaan zeolite tersebut sebagai bahan tambah dalam WMA. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian gradasi dan kadar air. Tabel 6 menunjukkan hasil pengujian gradasi zeolit yang digunakan dalam campuran WMA, dengan hasil untuk lolos ayakan No. 200 sebesar 100% dan memenuhi SNI ASTM C117:2012. Dari Tabel 6 juga terlihat bahwa hasil pengujian kadar air sebesar 20%, memenuhi syarat yaitu 18 – 22% sesuai SNI 1970:2016.

Tabel 6. Pengujian Zeolit

No. Saringan	Gradasi (%Lolos)	Syarat
No. 30	100%	
No. 50	100%	100%
No. 100	100%	
No. 200	100%	
Kadar Air (%)	20	18 - 22

Pengujian Aspal

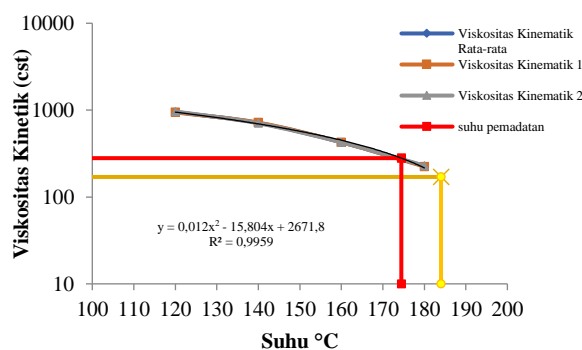
Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal dengan penetrasi 60/70. Beberapa pengujian sifat-sifat yang dilakukan yaitu penetrasi, berat jenis, titik leleh, daktilitas, titik nyala dan bakar, viskositas kinematik. Hasil pemeriksaan aspal pen 60/70 ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Aspal Pen 60/70

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	65,4	60-70
Titik Lembek (°C)	55	≥ 48
Daktilitas pada 25°C, (cm)	125	≥ 100
Titik Nyala (°C)	257	≥ 232

Titik Bakar (°C)	269	
Berat Jenis	1,02	≥ 1
Viskositas Kinematis (cSt)	579,8	≥ 300

Dari pengujian dapat dilihat untuk pengujian penetrasi dihasilkan nilai sebesar 65,4 mm dengan syarat 60–70 mm, maka aspal dapat disimpulkan memenuhi spesifikasi aspal pen 60/70. Kemudian pada pengujian titik lembek, nilai yang didapatkan dari hasil pemeriksaan titik lembek aspal sebesar 55°C, nilai ini telah memenuhi Spesifikasi Bina Marga yaitu sebesar ≥ 48°C. Selanjutnya pada pengujian daktilitas, untuk mengetahui elastisitas aspal, hasil yang diperoleh sebesar 125 cm dan memenuhi syarat sesuai spesifikasi sebesar ≥ 100 cm. Terdapat pengujian titik nyala dan bakar, dengan hasil sebesar 257°C yang merupakan suhu pada saat aspal menghasilkan percikan pertama. Hasil pengujian titik nyala ini memenuhi spesifikasi Bina Marga yaitu sebesar ≥ 232°C. Kemudian terdapat pengujian berat jenis dengan hasil sebesar 1,02 gr/cc dengan syarat sebesar ≥ 1 gr/cc, maka untuk berat jenis aspal memenuhi spesifikasi. Suhu pencampuran dan suhu pemadatan didapatkan dari pengujian viskositas. Hasil pengujian viskositas menghasilkan suhu pencampuran (pada viskositas aspal 170 cSt) sebesar 184°C dan suhu pemadatan (pada viskositas aspal 280 cSt) sebesar 174 °C. Penentuan suhu pencampuran dan pemadatan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengujian Viskositas

Dikarenakan suhu pemadatan dan pencampuran yang diperoleh dari pengujian viskositas jauh dari syarat suhu pencampuran dan pemadatan yaitu 155°C untuk suhu pencampuran dan 145°C untuk suhu pemadatan, maka diambil suhu pencampuran dan pemadatan sesuai dengan spesifikasi Bina Marga.

Pengujian Marshall untuk Menentukan Nilai KAO

Setelah pengujian propertis agregat dan aspal, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian Marshall [14, 15]. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) yang nantinya akan digunakan untuk pembuatan benda uji dengan bahan tambah zeolit. Dari hasil pengujian Marshall didapatkan KAO sebesar 5,5%, karena pada kadar aspal 5,5% semua parameter Marshall memenuhi spesifikasi, seperti terlihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil pengujian Marshall dalam menentukan nilai KAO

Parameter Marshall	Syarat	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Stability (Kg)	>800	2288,2	2600.	2894.	2865	65.
Flow (mm)	> 3	3.8	3.7	3.6	3.8	3.9
MQ (Kg/mm)	> 250	597.75	703.3	811.7	748.7	709.

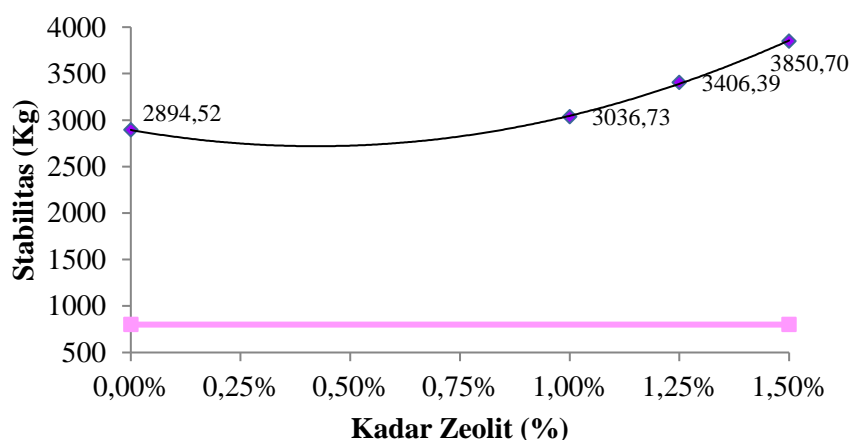
VIM (%)	3 s/d 5	10.12	8.55	4.78	5.70	5.73
VMA (%)	> 15	20.32	19.99	17.77	19.63	20.70
VFA (%)	> 65	50.18	57.22	73.11	70.95	72.32
Density (gr/cc)	> 1	2.31	2.33	2.41	2.37	2.35
Kadar Aspal Optimum				5,5%		

Karakteristik Marshall WMA

Pada tahap ini, pengujian Marshall dilakukan dengan menggunakan *warm mix asphalt* (WMA). WMA ini dibuat dengan menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan 30°C di bawah suhu pencampuran dan pemadatan HMA, yaitu sebesar 125°C untuk suhu pencampuran dan 115°C untuk suhu pemadatan. Variasi kadar zeolit yang digunakan sebesar 1%, 1,25% dan 1,5%. Zeolit ini dicampurkan ke dalam agregat panas bersamaan dengan dimasukkannya aspal yang sudah dipanaskan.

Stabilitas

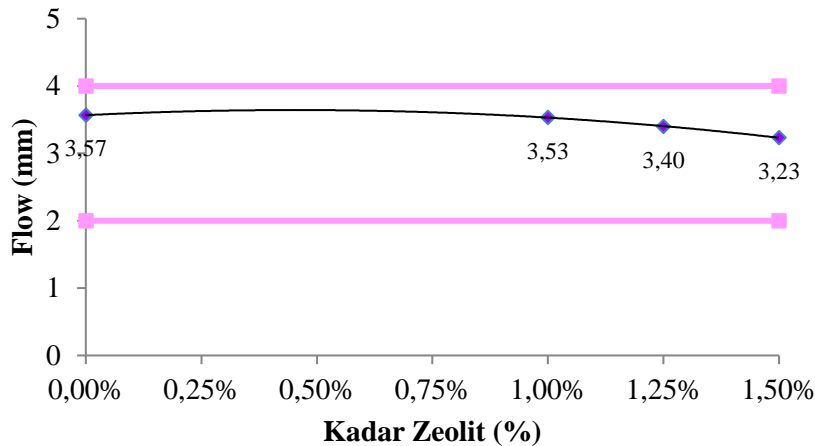
Stabilitas semakin meningkat seiring dengan penambahan kadar zeolit. Nilai stabilitas tertinggi terdapat pada campuran WMA dengan penambahan kadar zeolit 1,5% yaitu 3850,70 kg, sedangkan stabilitas terendah terdapat pada kadar zeolit 1% yaitu 3036,73 kg. Hal ini disebabkan penambahan kadar zeolit membuat agregat dalam campuran saling mengunci satu sama lain dikarenakan fungsi zeolit mampu membuat campuran dalam aspal saling mengikat, sehingga semakin bertambahnya kadar zeolit dalam campuran aspal maka akan semakin kaku dan menyebabkan nilai stabilitas semakin tinggi. Menurut spesifikasi Bina Marga, untuk nilai stabilitas WMA minimum 800 kg. Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa stabilitas untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Terlihat pula bahwa stabilitas WMA lebih tinggi dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).



Gambar 2. Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan stabilitas

Flow/Kelelahan

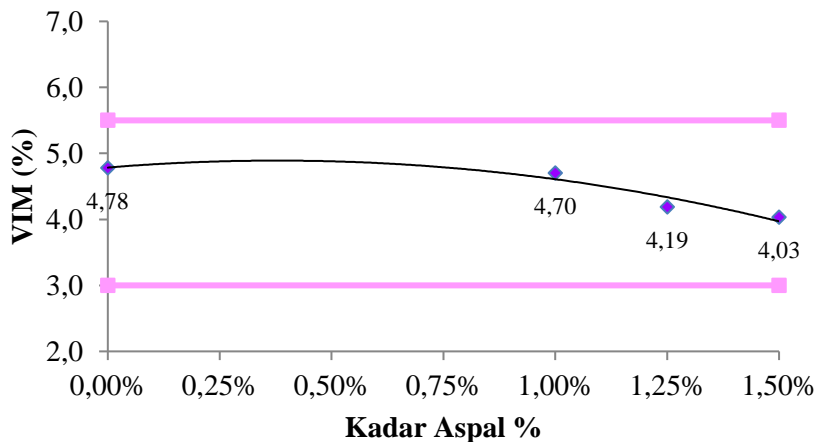
Flow semakin menurun seiring dengan penambahan kadar zeolit. Nilai terbesar untuk kelelahan terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar 3,5 mm sedangkan untuk nilai flow terendah yaitu pada campuran WMA dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 3,2 mm. Penambahan zeolit dalam campuran aspal menyebabkan campuran menjadi lebih kaku. Campuran dengan kadar zeolit kecil akan bersifat plastis dan menyebabkan nilai kelelahan lebih besar dibandingkan dengan campuran dengan kadar zeolit yang lebih besar. Nilai flow WMA yaitu 2-4 mm. Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa flow untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Nilai flow WMA lebih kecil dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).



Gambar 3. Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan flow

VIM (Void in the Mix)

Nilai terbesar untuk VIM terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar 4,70% sedangkan nilai VIM terendah yaitu pada campuran dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 4,03%. VIM semakin menurun dengan adanya penambahan kadar zeolit, hal ini disebabkan karena penambahan zeolit pada campuran aspal menyebabkan campuran lebih melekat antara aspal dan agregat, maka rongga dalam campuran akan terisi oleh agregat dan aspal sehingga air dan udara tidak mudah masuk ke dalam campuran. Nilai VIM untuk WMA menurut spesifikasi berkisar 3 – 5,5 %. Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa VIM untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Dapat diketahui pula bahwa VIM WMA lebih rendah dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).

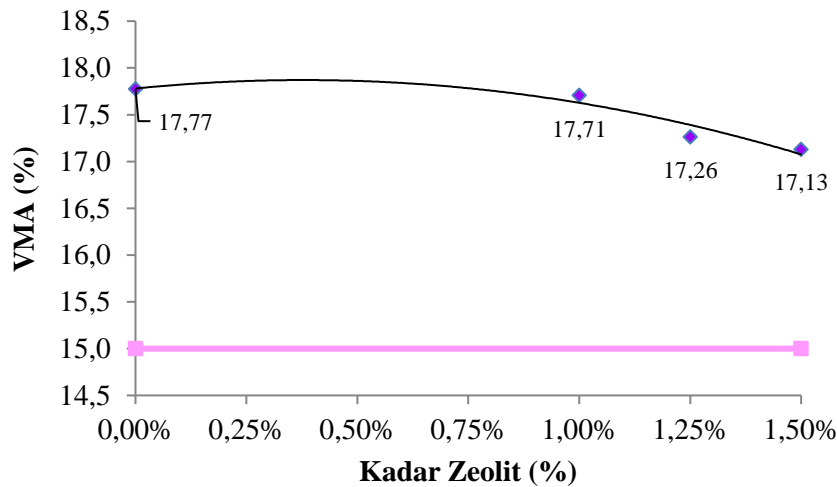


Gambar 4. Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan VIM

VMA (Void in Mineral Aggregate)

Nilai terbesar untuk VMA terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar 17,71% sedangkan untuk nilai VMA terendah yaitu pada campuran dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 17,13%. Nilai yang diperoleh memperlihatkan bahwa penurunan nilai VMA tidak terlalu signifikan, Dari hasil pengujian terlihat bahwa nilai VMA semakin menurun akibat penambahan kadar zeolit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar zeolit dalam campuran aspal menyebabkan rongga campuran antar agregat dan aspal semakin terisi, sehingga pori semakin kecil dan rongga antar butiran semakin berkurang. Nilai spesifikasi VMA untuk WMA minimum 15%. Dari Gambar 5 dapat dilihat

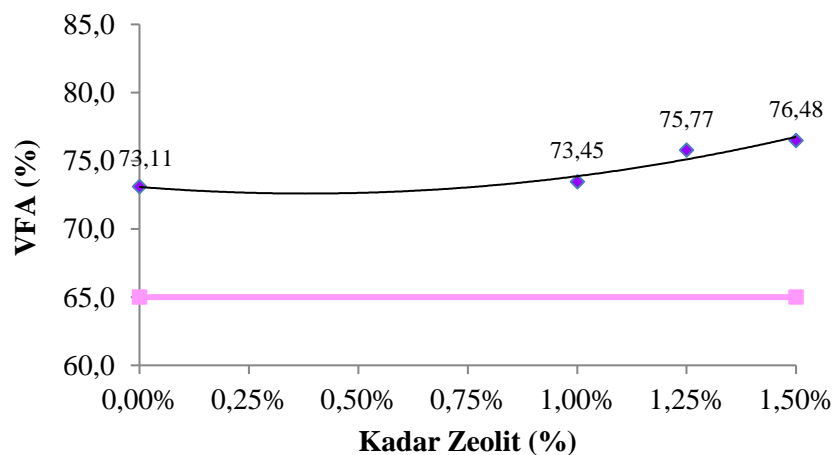
bahwa VMA untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Terlihat pula bahwa VMA WMA lebih rendah dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).



Gambar 5. Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan VMA

VFA (Void Fill with Asphalt)

Nilai terbesar untuk VFA terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 76,48%. Sedangkan untuk nilai VFA terendah yaitu pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar 73,45%. VFA semakin meningkat ketika adanya penambahan kadar zeolit. Bertambahnya nilai VFA pada campuran aspal bisa dilihat dari mengecilnya rongga dalam campuran (VIM), demikian pula sebaliknya. Dari hasil penelitian pengaruh kadar zeolit dalam campuran aspal ini mengakibatkan rongga dalam campuran semakin mengecil, karena rongga antar agregat masih cukup besar menyebabkan aspal mudah masuk ke rongga campuran sehingga campuran menjadi lebih rapat dan nilai VFA semakin besar. Nilai VFA memiliki spesifikasi minimum 65% untuk WMA. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa VFA untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Terlihat pula bahwa VFA WMA lebih tinggi dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).

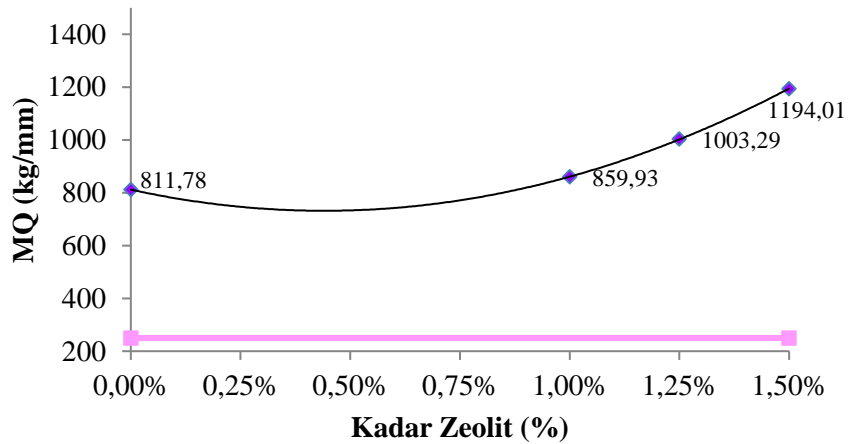


Gambar 6. Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan VFA

MQ (Marshall Quotient)

Nilai terbesar untuk MQ terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 1194,01 kg/mm. Sedangkan untuk nilai MQ terendah yaitu pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar

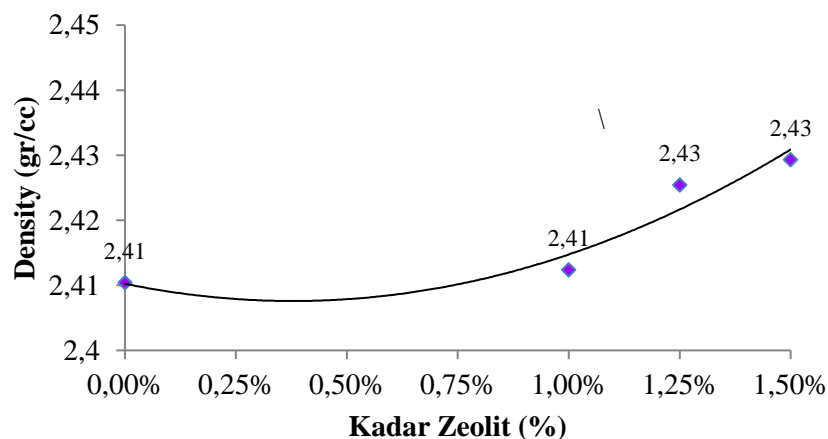
859,93 kg/mm. MQ semakin meningkat ketika adanya penambahan kadar zeolit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar zeolit dalam campuran aspal mengakibatkan nilai MQ semakin bertambah. Kenaikan nilai MQ dikarenakan pertambahan kadar zeolit membuat kohesi antara agregat dan aspal meningkat dan membuat campuran aspal tersebut semakin kaku. Nilai MQ memiliki spesifikasi minimum 250 kg/mm untuk WMA. Dari Gambar 77 dapat dilihat bahwa MQ untuk seluruh variasi kadar zeolit memenuhi spesifikasi Bina Marga. Terlihat pula bahwa MQ WMA lebih tinggi dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).



Gambar 7 Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan MQ

Density

Nilai terbesar untuk density terdapat pada campuran dengan kadar zeolit 1,5% sebesar 2,429 gr/cc. Sedangkan untuk nilai density terendah yaitu pada campuran dengan kadar zeolit 1% yaitu sebesar 2,412 gr/cc. Density semakin meningkat ketika adanya penambahan kadar zeolit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar zeolit dalam campuran aspal mengakibatkan nilai density semakin bertambah. Kenaikan nilai density dikarenakan pertambahan kadar zeolit membuat tingkat kepadatan dalam campuran semakin tinggi yang membuat porositas menjadi rendah serta rongga antar butir agregat semakin kecil. Dari Gambar 8 menunjukkan density untuk seluruh variasi kadar zeolit dalam WMA. Terlihat pula bahwa density WMA lebih tinggi dibandingkan dengan HMA (0% zeolit).



Gambar 8 Grafik hubungan kadar zeolit dalam aspal dengan density

Dari hasil pengujian dapat diketahui jika semua hasil pengujian karakteristik Marshall WMA memenuhi syarat yang terdapat di Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Karakteristik Marshall WMA lebih baik dibandingkan dengan HMA. Dengan demikian penambahan aditif zeolit ke dalam HMA akan

mampu menghasilkan WMA yang memiliki spesifikasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan HMA. Hal ini akan menambah kontribusi positif yang sudah dimiliki oleh WMA sebagai konstruksi jalan yang ramah lingkungan, yaitu penggunaan energi yang lebih rendah akibat temperatur pencampuran dan pemadatan yang turun sehingga berdampak pula pada penurunan polusi udara selama proses pencampuran dan pemadatan WMA.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan zeolit pada *Warm Mix Asphalt* dapat mempengaruhi sifat-sifat *Marshall* campuran, yaitu stabilitas, VFA, MQ dan *density* semakin meningkat akibat penambahan kadar zeolit, sedangkan untuk nilai *flow*, VIM, VMA, semakin menurun akibat penambahan kadar zeolit. Parameter *Marshall* pada campuran WMA dengan penambahan kadar zeolit 1%, 1,25% dan 1,5% memenuhi spesifikasi Bina Marga.
2. Karakteristik kinerja Marshall WMA lebih baik dibandingkan dengan HMA. Hal ini terlihat dari semua parameter Marshall WMA mengalami peningkatan positif dibandingkan HMA. Penggunaan zeolit alam ke dalam HMA mampu meningkatkan kinerja campuran WMA.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada rekan-rekan di Universitas Jenderal Soedirman dan Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah membantu dan memfasilitasi penelitian kami. Serta kami ucapkan terimakasih kepada panitia Seminar Nasional TREnD 2 yang telah memberikan kesempatan untuk kami memaparkan penelitian kami.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sjahdanulirwan, "Kelebihan Serta Kekurangan Perkerasan Beraspal dan Beton," *Puslitbang Jalan dan Jembatan*, 25(1), 1-11, 2008.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Spesifikasi Umum 2018*, Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/sE/Db/2018, September, 2018.
- [3] F. Affandi, "Pengaruh Metode Aktivasi Zeolit Alam Sebagai Bahan Penurun Temperatur Campuran Beraspal Hangat," *Jurnal Jalan-Jembatan*, 28(1), 2018.
- [4] H. R. Eddy, "Potensi dan Pemanfaatan Zeolit di Provinsi Jawa Barat dan Banten," *Kelompok Kerja Mineral Provinsi Jawa Barat*, 2006.
- [5] A. T. Handayani, Setiaji, B. H., & Wardani, S. P. R., *Ketahanan Deformasi Campuran Beraspal Hangat Aspal Modifikasi Dengan Bahan Aditif Zeolit Alam*, 18th FSTPT International Symposium, Unila, Bandar Lampung, 2015.
- [6] P. Nurani, *Pengaruh Penggunaan Zeolit Alam Terhadap Karakteristik Campuran Warm Mix Asphalt*, Proceeding of The 18th FSTPT Internasional Symposium , 27-30, 2015.
- [7] L. Sentosa, Subagio, B. S., Rahman, H., & Yamin, R. A., "Aktivasi Zeolit Alam Asal Bayah Dengan Asam Dan Basa Sebagai Aditif Campuran Beraspal Hangat (Warm Mix Asphalt (WMA))," *J. Tek. Sipil*, 25, 203, 2018.
- [8] A. F. Siregar, "Pengaruh Penggunaan Aditif Zeolit pada Warm Mix Asphalt terhadap Mutu Campuran Beraspal di Laboratorium," *Jurnal Teknik Sipil USU*, 5(1), 2016.
- [9] S. B. Cooper III, L. N. Mohammad, & M. A. Elseifi., "Laboratory Performance Characteristics of Sulfur-Modified Warm-Mix Asphalt," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), 1338-1345, 2011.
- [10] Dirjen Bina Marga, *Dalam Spesifikasi Divisi 6 Seksi 6.3 Campuran Beraspal Panas*, Kementerian Pekerjaan Umum, 2016.

- [11] Syamsul, A., Kasan, M., & Pradani, N., "Pengaruh Nilai Abrasi Agregat terhadap Karakteristik Beton Aspal," *Smartek*, 5(1), 2007.
- [12] Laoli, M. E., Kaseke, O. H., Manoppo, M. R., & Jansen, F., "Kajian Penyebab Perbedaan Nilai Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal Panas Yang Dihitung Berdasarkan Metode Marshall Dengan Yang Dicari Langsung Berdasarkan AASHTO T209," *Jurnal Sipil Statik*, 1(2), 2013.
- [13] Rondonuwu, F., Kaseke, O. H., Rumajar, A. L., & Manoppo, M. R., "Pengaruh Sifat Fisik Agregat Terhadap Rongga Dalam Campuran Beraspal Panas," *Jurnal Sipil Statik*, 1(3), 2013.
- [14] RSNI M-01-2003, *Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat Marshall*, Badan Standarisasi Nasional, 2003.
- [15] SNI 06-2489, *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall 06-2489-1991*, 1991.