



# EFISIENSI PEMADATAN WARM MIX ASPHALT (WMA) BERBASIS ZEOLIT SINTETIK (ADVERA): STUDI KOMPARATIF DENGAN HOT MIX ASPHALT (HMA) PADA VARIASI JUMLAH TUMBUKAN

Mutia Ramadhany<sup>1\*</sup>, Aulia Choiri Windari<sup>2\*</sup>, Arief Subagyo<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Jurusan Teknik Sipil, Universitas Global Jakarta

E-mail penulis, korespondensi: [mutiaaramadhany11@gmail.com](mailto:mutiaaramadhany11@gmail.com)

Nomor HP penulis, korespondensi: 089517136311

## Abstrak

*Warm Mix Asphalt* (WMA) merupakan teknologi perkerasan jalan yang dikembangkan untuk menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dibandingkan *Hot Mix Asphalt* (HMA). Penambahan Zeolit Sintetik (Advera) sebesar 0,2% diharapkan dapat meningkatkan kemudahan pemadatan (*workability*) sehingga karakteristik Marshall tetap memenuhi persyaratan pada energi pemadatan yang lebih rendah. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik Marshall campuran HMA dan WMA, mengetahui perbedaan karakteristik kedua campuran, serta mengevaluasi efektivitas penggunaan Advera 0,2%. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan metode Marshall pada campuran AC-WC dengan kadar aspal 6,0%. Variasi energi pemadatan yang digunakan yaitu 35, 50, dan 75 tumbukan dengan tiga benda uji pada setiap variasi. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, *flow*, *density*, *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Asphalt* (VFA), dan *Marshall Quotient* (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas rata-rata campuran HMA sebesar 1017,84 kg, 874,37 kg, dan 740,95 kg, sedangkan campuran WMA sebesar 1840,02 kg, 1178,44 kg, dan 1086,85 kg pada variasi 75, 50, dan 35 tumbukan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, nilai stabilitas minimum AC-WC adalah 800 kg. Pada parameter VIM, persyaratan yang ditetapkan adalah 3-5%. Nilai VIM WMA berada pada kisaran 3,76-4,58% sehingga memenuhi spesifikasi, sedangkan HMA berada pada kisaran 5,07-5,60% sehingga sebagian belum memenuhi persyaratan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan Advera 0,2% mampu meningkatkan *workability* campuran sehingga energi pemadatan dapat dikurangi hingga 35 tumbukan tanpa menurunkan karakteristik Marshall.

**Kata kunci:** *Warm Mix Asphalt*, *Hot Mix Asphalt*, Advera, karakteristik Marshall, energi pemadatan.

## Article history

Received: Juli 2026

Reviewed: Juli 2026

Published: Juli 2026

Plagiarism checker no 80

Copyright : author

Publish by : Kolesi



This work is licensed under a [creative commons attribution-noncommercial 4.0 international license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Abstract**

*Warm Mix Asphalt (WMA) is an asphalt pavement technology developed to reduce mixing and compaction temperatures compared to Hot Mix Asphalt (HMA), thereby reducing energy consumption and environmental impact. The addition of 0.2% Synthetic Zeolite (Advera) is expected to improve the workability of WMA mixtures, enabling satisfactory Marshall characteristics under lower compaction energy. This study aims to analyze the Marshall characteristics of HMA and WMA mixtures, compare their performance, and evaluate the effectiveness of using 0.2% Advera at different compaction energy levels. This research employed an experimental method using the Marshall test on Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures with an optimum asphalt content of 6.0%. The WMA mixture was modified by adding 0.2% Advera by asphalt weight. Compaction energies of 35, 50, and 75 blows were applied with three specimens for each variation. The evaluated parameters included Marshall stability, flow, density, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), and Marshall Quotient (MQ). The results showed that the WMA mixture exhibited better Marshall characteristics than the HMA mixture. The average Marshall stability of HMA was 1017.84 kg, 874.37 kg, and 740.95 kg, while WMA achieved 1840.02 kg, 1178.44 kg, and 1086.85 kg at 75, 50, and 35 blows, respectively. According to the 2018 Bina Marga Specifications, the minimum Marshall stability requirement for AC-WC is 800 kg. For the VIM parameter, the specification requires a value of 3-5%. WMA produced VIM values ranging from 3.76% to 4.58%, meeting the specification, while HMA produced values between 5.07% and 5.60%, indicating that some mixtures exceeded the allowable limit. These findings demonstrate that the addition of 0.2% Advera effectively improves the workability of WMA, allowing the compaction energy to be reduced to 35 blows while maintaining satisfactory Marshall characteristics.*

**Keywords:** Warm Mix Asphalt, Hot Mix Asphalt, Synthetic Zeolite (Advera), Marshall Characteristics, Compaction Energy.

**1. PENDAHULUAN**

Pembangunan infrastruktur transportasi menjadi salah satu prioritas utama dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, pemerataan wilayah, serta peningkatan konektivitas antardaerah. Kualitas infrastruktur jalan yang baik tidak hanya berpengaruh terhadap kelancaran mobilitas masyarakat, tetapi juga menentukan efisiensi distribusi barang dan jasa. Seiring meningkatnya kebutuhan pembangunan jalan, penerapan teknologi konstruksi yang mampu menghasilkan perkerasan berkinerja tinggi sekaligus mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan menjadi perhatian penting. Dalam bidang perkerasan lentur, *Hot Mix Asphalt* (HMA) masih menjadi teknologi yang paling banyak digunakan karena memiliki kekuatan struktural dan



daya tahan yang baik. Namun, proses produksinya memerlukan suhu pencampuran dan pemadatan yang tinggi sehingga konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan juga relatif besar.

Perkembangan teknologi perkerasan mendorong lahirnya *Warm Mix Asphalt* (WMA) sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan melalui penurunan suhu pencampuran dan pemadatan sekitar 20-30°C dibandingkan HMA. Salah satu teknologi WMA menggunakan aditif *Synthetic Zeolite* (Advera) yang mampu menghasilkan efek *foaming* sehingga viskositas aspal menurun dan *workability* campuran meningkat pada suhu yang lebih rendah. Penurunan suhu produksi berpotensi memengaruhi proses pemadatan campuran sehingga pencapaian kepadatan optimum masih menjadi perhatian. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018, campuran WMA tetap harus memenuhi seluruh persyaratan karakteristik Marshall sebagaimana campuran HMA [1]. Di sisi lain, pemerintah Indonesia melalui Surat Edaran Direktorat Jenderal Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018 telah mendorong penerapan teknologi WMA sebagai bagian dari upaya mewujudkan konstruksi jalan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Berbagai penelitian telah mengkaji kinerja campuran WMA dengan menggunakan aditif zeolit sintetik. Penelitian menunjukkan bahwa *Synthetic Zeolite* mampu melepaskan air kristal secara bertahap sehingga menghasilkan efek pembusaan (*foaming*) yang meningkatkan kemudahan pengerjaan campuran pada suhu rendah [2]. Penelitian lainnya melaporkan bahwa penggunaan Advera pada dosis tertentu dapat mempertahankan karakteristik Marshall meskipun suhu produksi diturunkan [3]. Selain itu, beberapa penelitian juga menyebutkan bahwa teknologi WMA berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon selama proses produksi campuran aspal. Walaupun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengaruh suhu pencampuran atau variasi kadar aditif, sedangkan kajian mengenai hubungan antara energi pemadatan dan pencapaian karakteristik Marshall masih terbatas.

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian mengenai efektivitas penggunaan *Synthetic Zeolite* (Advera) 0,2% terhadap karakteristik Marshall pada variasi energi pemadatan yang berbeda. Penelitian terdahulu umumnya belum membandingkan secara langsung kinerja *Hot Mix Asphalt* (HMA) dan *Warm Mix Asphalt* (WMA) menggunakan variasi jumlah tumbukan Marshall 35, 50, dan 75 kali sesuai ASTM D6926 sebagai representasi tingkat energi pemadatan. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa analisis komparatif karakteristik Marshall kedua jenis campuran tersebut untuk mengetahui kemampuan WMA-Advera dalam mencapai kepadatan sesuai persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 pada kondisi energi pemadatan yang berbeda [1].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik Marshall campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) dan *Warm Mix Asphalt* (WMA), mengetahui perbedaan karakteristik Marshall pada berbagai tingkat energi pemadatan, serta mengevaluasi efektivitas penggunaan aditif *Synthetic Zeolite* (Advera) sebesar 0,2% dalam meningkatkan kinerja campuran pada suhu yang lebih rendah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa data empiris mengenai penerapan teknologi WMA di Indonesia serta menjadi referensi bagi akademisi, praktisi, dan pemangku kepentingan dalam mengembangkan teknologi perkerasan jalan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan tetap memenuhi standar mutu yang berlaku.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Aspal dan *Warm Mix Asphalt* (WMA)

Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga tahun 2022 aspal merupakan material hidrokarbon kompleks yang bersifat viskoelastis, berwarna gelap, serta berfungsi sebagai bahan pengikat dalam konstruksi perkerasan lentur [4]. Sebagai binder, aspal berperan dalam merekatkan agregat sehingga membentuk struktur perkerasan yang kuat sekaligus memberikan sifat kedap air terhadap lapisan jalan [5]. Kinerja campuran beraspal sangat dipengaruhi oleh karakteristik aspal,



khususnya viskositas, karena parameter tersebut menentukan kemampuan aspal melapisi agregat selama proses pencampuran dan pemadatan [6]. Di Indonesia, aspal penetrasi 60/70 merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena memiliki keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas pada kondisi iklim tropis [7]. Perkembangan teknologi konstruksi jalan mendorong munculnya *Warm Mix Asphalt* (WMA) sebagai inovasi yang memungkinkan proses pencampuran dan pemadatan dilakukan pada suhu lebih rendah dibandingkan *Hot Mix Asphalt* (HMA). WMA umumnya diproduksi pada suhu sekitar 120-135°C, sedangkan HMA membutuhkan suhu sekitar 150-165°C [8]. Penurunan suhu tersebut mampu mengurangi konsumsi energi, emisi gas buang, serta meningkatkan keselamatan kerja tanpa mengurangi mutu campuran apabila memenuhi persyaratan teknis yang berlaku.

## 2.2 Aditif *Synthetic Zeolite* (Advera)

Salah satu teknologi WMA yang banyak dikembangkan adalah penggunaan *Synthetic Zeolite* (Advera) sebagai bahan tambah. Advera merupakan zeolit sintetik berbentuk serbuk yang termasuk kelompok *hydrated aluminosilicate* dan bekerja melalui mekanisme pelepasan air kristal pada saat bercampur dengan aspal panas [9]. Pelepasan uap air tersebut menghasilkan efek *foaming* yang menurunkan viskositas aspal secara sementara sehingga meningkatkan *workability* campuran pada suhu yang lebih rendah [10]. Penggunaan Advera memiliki beberapa keunggulan, yaitu mampu menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan hingga sekitar 120°C, tidak mengubah grade aspal, memiliki fleksibilitas dosis, serta mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon selama proses produksi campuran. Efek pembusaan yang dihasilkan juga mempermudah proses pemadatan sehingga agregat dapat membentuk *interlocking* yang lebih baik meskipun menggunakan energi pemadatan yang lebih rendah [11].

## 2.3 Karakteristik Marshall dan Energi Pemadatan

Metode Marshall merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja campuran beraspal melalui pengukuran karakteristik volumetrik dan mekanik campuran. Menurut ASTM D6926 dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, energi pemadatan dapat disesuaikan dengan klasifikasi lalu lintas melalui variasi jumlah tumbukan, yaitu 35 tumbukan untuk lalu lintas ringan, 50 tumbukan untuk lalu lintas sedang, dan 75 tumbukan untuk lalu lintas berat [12]. Parameter utama yang digunakan dalam pengujian Marshall meliputi *density*, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ). *Density* menunjukkan tingkat kepadatan campuran setelah proses pemadatan, sedangkan stabilitas menggambarkan kemampuan campuran menahan beban maksimum sebelum mengalami deformasi. *Flow* menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi ketika beban maksimum diberikan, sementara *Marshall Quotient* merupakan perbandingan antara stabilitas dan *flow* yang menggambarkan tingkat kekakuan campuran. Keempat parameter tersebut menjadi indikator utama dalam menilai kualitas campuran HMA maupun WMA sesuai persyaratan Bina Marga 2018 [13].

## 2.4 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa penggunaan teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA) mampu meningkatkan efisiensi konstruksi tanpa menurunkan kualitas campuran. Penelitian Hasan et al. menunjukkan bahwa penggunaan zeolit maupun Sasobit menghasilkan performa mekanik yang lebih baik dibandingkan campuran konvensional [14]. Di Indonesia, Susanto et al. menemukan bahwa penambahan zeolit sebesar 1-1,5% mampu meningkatkan stabilitas, *Marshall Quotient*, dan *density* campuran WMA dibandingkan HMA [9]. Penelitian Indriyati et al. menunjukkan bahwa penggunaan nano zeolit mampu meningkatkan stabilitas Marshall, densitas, dan nilai VFA serta menurunkan VIM dan VMA [16]. Daniel et al. membuktikan bahwa WMA mampu menurunkan emisi CO<sub>2</sub>, VOC, dan partikulat secara signifikan dibandingkan HMA melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* [17]. Penelitian mengenai energi pemadatan juga telah dilakukan oleh Andreas et al. yang menunjukkan bahwa jumlah tumbukan memengaruhi



karakteristik volumetrik campuran [18]. Abdal et al. menjelaskan bahwa variasi energi pemadatan berpengaruh terhadap kekuatan tarik, kekakuan, serta durabilitas campuran WMA [19]. Penelitian ini terdapat kebaruan berupa analisis komparatif karakteristik Marshall kedua jenis campuran tersebut untuk mengetahui efektivitas penggunaan Advera dalam mencapai kepadatan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dengan energi pemadatan yang lebih rendah.

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan komparatif untuk membandingkan karakteristik Marshall campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) dan *Warm Mix Asphalt* (WMA) menggunakan aditif *Synthetic Zeolite* (Advera) sebesar 0,2% terhadap berat aspal. Pengujian dilakukan pada variasi energi pemadatan 35, 50, dan 75 tumbukan sesuai ASTM D6926, yang mewakili klasifikasi lalu lintas rendah, sedang, dan berat. Seluruh rangkaian penelitian dilaksanakan di Laboratorium Sipil Burangkeng (LSB). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis campuran (HMA dan WMA) serta jumlah tumbukan Marshall, sedangkan variabel terikat berupa karakteristik Marshall yang meliputi *density*, stabilitas, *flow*, *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Asphalt* (VFA), dan *Marshall Quotient* (MQ).

#### 3.2 Material Penelitian

Material yang digunakan terdiri atas agregat kasar, agregat halus, aspal penetrasi 60/70 produksi PT Pertamina, dan aditif *Synthetic Zeolite* (Advera) sebesar 0,2% dari berat aspal. Campuran yang digunakan merupakan campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan gradasi agregat mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

Tabel 1. Material penelitian

| Material      | Spesifikasi                                             |
|---------------|---------------------------------------------------------|
| Aspal         | Aspal Penetrasi 60/70                                   |
| Agregat kasar | Gradasi AC-WC Bina Marga 2018                           |
| Agregat halus | Gradasi AC-WC Bina Marga 2018                           |
| Aditif        | <i>Synthetic Zeolite</i> (Advera) 0,2% dari berat aspal |

#### 3.3 Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan dua jenis campuran, yaitu *Hot Mix Asphalt* (HMA) sebagai campuran kontrol dan *Warm Mix Asphalt* (WMA) yang ditambahkan aditif Advera sebesar 0,2%. Campuran HMA diproduksi pada suhu 160°C, sedangkan campuran WMA diproduksi pada suhu 130°C. Masing-masing campuran dipadatkan menggunakan variasi energi 35, 50, dan 75 tumbukan, dengan tiga benda uji pada setiap perlakuan sehingga total benda uji sebanyak 18 sampel.

Tabel 2. Rancangan benda uji

| Jenis Campuran | Suhu (°C) | Advera | Jumlah Tumbukan | Jumlah Sampel |
|----------------|-----------|--------|-----------------|---------------|
| HMA            | 160       | -      | 35              | 3             |
| HMA            | 160       | -      | 50              | 3             |
| HMA            | 160       | -      | 75              | 3             |
| WMA            | 130       | 0,2%   | 35              | 3             |
| WMA            | 130       | 0,2%   | 50              | 3             |
| WMA            | 130       | 0,2%   | 75              | 3             |
| <b>Total</b>   |           |        |                 | <b>18</b>     |



### 3.4 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan pengujian karakteristik material penyusun meliputi agregat dan aspal sesuai standar SNI dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Selanjutnya dilakukan penyusunan *Job Mix Formula* (JMF) sebagai dasar penentuan komposisi campuran. Campuran HMA diproduksi menggunakan suhu pencampuran 160°C, sedangkan campuran WMA diproduksi pada suhu 130°C dengan penambahan aditif *Synthetic Zeolite* (Advera) sebesar 0,2% dari berat aspal. Benda uji kemudian dipadatkan menggunakan alat Marshall dengan variasi 35, 50, dan 75 tumbukan pada masing-masing sisi benda uji sesuai ASTM D6926. Selanjutnya seluruh benda uji direndam dalam water bath pada suhu 60°C selama 30-40 menit sebelum dilakukan pengujian Marshall berdasarkan ASTM D6927. Parameter yang diperoleh meliputi stabilitas, *flow*, *density*, VIM, VMA, VFA, dan *Marshall Quotient* (MQ).

### 3.5 Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian Marshall dianalisis secara deskriptif komparatif dengan membandingkan karakteristik campuran HMA dan WMA pada setiap variasi jumlah tumbukan. Hasil pengujian kemudian dievaluasi terhadap persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk mengetahui efektivitas penggunaan *Synthetic Zeolite* (Advera) 0,2% dalam meningkatkan *workability* campuran serta efisiensi energi pemadatan pada campuran *Warm Mix Asphalt*.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Karakteristik Agregat

#### 4.1.1 Analisis Saringan Agregat Halus

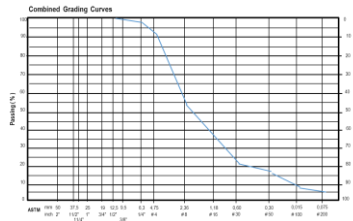
Hasil analisis saringan menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki distribusi ukuran butiran yang sesuai dengan gradasi yang dipersyaratkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Nilai modulus kehalusan (*Fineness Modulus*) sebesar 3,70 menunjukkan bahwa agregat memiliki gradasi yang baik sehingga mampu membentuk struktur campuran yang stabil dan mengurangi rongga udara dalam campuran beraspal.

Tabel 4.1. Hasil Analisis Saringan Agregat Halus

| Saringan<br>ASTM |      | Berat<br>Tertahan | Akumulati<br>f<br>Tertahan | Akumulati<br>f<br>Tertahan | Lewat  |
|------------------|------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------|
| Inch             | mm   | gr                | gr                         | %                          | %      |
| 2"               | 50.0 |                   |                            |                            |        |
| 1 1/2"           | 37.5 |                   |                            |                            |        |
| 1"               | 25.0 |                   |                            |                            |        |
| 3/4"             | 19.0 |                   |                            |                            |        |
| 1/2"             | 12.5 | 0,0               | 0,0                        | 0,0                        | 100,00 |
| 3/8"             | 9.5  | 5,2               | 5,2                        | 0,3                        | 99,65  |
| 1/4"             | 6.3  | 19,2              | 24,4                       | 1,6                        | 98,37  |
| # 4              | 4.75 | 98,6              | 123,0                      | 8,2                        | 91,80  |
| # 8              | 2.36 | 566,2             | 689,2                      | 45,9                       | 54,05  |
| # 16             | 1.18 | 261,0             | 950,2                      | 63,3                       | 36,65  |
| # 30             | 0.60 | 229,8             | 1180,0                     | 78,7                       | 21,33  |
| # 50             | 0.30 | 67,4              | 1247,4                     | 83,2                       | 16,84  |
| # 100            | 0.15 | 114,8             | 1362,2                     | 90,8                       | 9,19   |



|       |       |      |        |       |      |
|-------|-------|------|--------|-------|------|
| # 200 | 0.075 | 43,8 | 1406,0 | 93,7  | 6,27 |
| PAN   | -     | 94,0 | 1500,0 | 100,0 | 0,00 |



Gambar 1. Grafik Analisa Saringan

Pembentukan kurva gradasi yang berada di dalam batas spesifikasi menunjukkan bahwa agregat layak digunakan sebagai material penyusun campuran AC-WC. Gradasi yang baik akan meningkatkan *interlocking* antar agregat sehingga stabilitas campuran menjadi lebih tinggi [22].

#### 4.1.2 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian menunjukkan nilai berat jenis bulk sebesar 2,544 gr/cm<sup>3</sup>, sedangkan penyerapan air sebesar 2,669%. Nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum 3% menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 sehingga agregat memenuhi persyaratan untuk campuran beraspal.

Tabel 4.2. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

| Description                           | Simbol                         | Unit  | Hasil |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| Weight of SSD condition               | -                              | gr    | 500   |
| Weight of dry sample in air           | A                              | gr    | 487   |
| Weight of pycnometer + water          | B                              | gr    | 646,4 |
| Weight of pycnometer + sample + water | C                              | gr    | 955   |
| Bulk Specific Gravity                 | $A / (B + 500 - C)$            | gr/cc | 2,544 |
| Bulk Specific Gravity (SSD Basis)     | $500 / (B + 500 - C)$          | gr/cc | 2,612 |
| Apparent Specific Gravity             | $A / (B + A - C)$              | gr/cc | 2,730 |
| Absorption                            | $((500 - A) / A) \times 100\%$ | %     | 2,669 |

Nilai penyerapan yang rendah menunjukkan bahwa agregat tidak banyak menyerap aspal sehingga penggunaan aspal menjadi lebih efisien serta meningkatkan daya ikat antara agregat dan binder [22].

#### 4.1.3 Kadar Lumpur Agregat Halus

Hasil pengujian kadar lumpur menunjukkan nilai rata-rata sebesar 3,79%, lebih kecil dibandingkan batas maksimum 5% sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

| Tes Persiapan        |                                    |      |       |       |           |
|----------------------|------------------------------------|------|-------|-------|-----------|
| No                   | Keterangan                         | Unit | Test  |       | Rata-rata |
|                      |                                    |      | I     | II    |           |
| 1                    | Menuangkan Air                     | min  | 15.15 | 15.03 | 15.09     |
| 2                    | Mengguncang material + 10 min      | min  | 15.25 | 15.13 | 15.19     |
| 3                    | Menempatkan setelah membilas bahan | min  | 15.35 | 15.23 | 15.29     |
| 4                    | Membaca ... + 30 min               | min  | 16.05 | 16.53 | 16.29     |
| Pengukuran dan Hasil |                                    |      |       |       |           |
| No                   | Keterangan                         | Unit | Test  |       | Rata-rata |
|                      |                                    |      | I     | II    |           |
| 1                    | Ketinggian kadar lumpur ( $h_1$ )  | cm   | 6,5   | 1     | 6,5       |



|   |                                             |    |     |      |       |
|---|---------------------------------------------|----|-----|------|-------|
| 2 | Ketinggian kadar lumpur + pasir ( $h_2$ )   | cm | 100 | 91   | 106,5 |
|   | Kandungan lumpur ( $h_1/h_2$ ) $\times 100$ | %  | 6,5 | 1,09 | 3,79  |

Kandungan lumpur yang rendah menunjukkan bahwa agregat memiliki tingkat kebersihan yang baik sehingga proses pelapisan aspal terhadap permukaan agregat dapat berlangsung secara optimal. Kondisi tersebut mampu meningkatkan ikatan antara agregat dan aspal serta mengurangi potensi terjadinya *stripping* akibat pengaruh air [23].

#### 4.1.4 Berat Isi Agregat Halus

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh berat isi agregat halus sebesar  $1,39 \text{ gr/cm}^3$  dengan kadar rongga udara sebesar 45,2%.

Tabel 4.4. Berat Isi Agregat Halus

| Keterangan            | Simbol/Rumus | Unit  | Test     |
|-----------------------|--------------|-------|----------|
| Berat tabung          | A            | gr    | 6.144,4  |
| Berat tabung + sampel | B            | gr    | 13.020,0 |
| Berat sampel          | $C = B - A$  | gr    | 6.876    |
| Volume tabung         | D            | cc    | 4.941    |
| Berat isi             | $C/D$        | gr/cc | 1,39     |
| Kadar rongga udara    | -            | %     | 45,2     |
| Berat jenis           | -            | gr/cc | 2,54     |
| Berat isi             | -            | gr/cc | 1,00     |

Nilai berat isi tersebut menunjukkan bahwa agregat memiliki susunan butiran yang cukup baik sehingga mampu memberikan ruang bagi aspal untuk mengisi rongga antar agregat tanpa mengurangi stabilitas campuran [24].

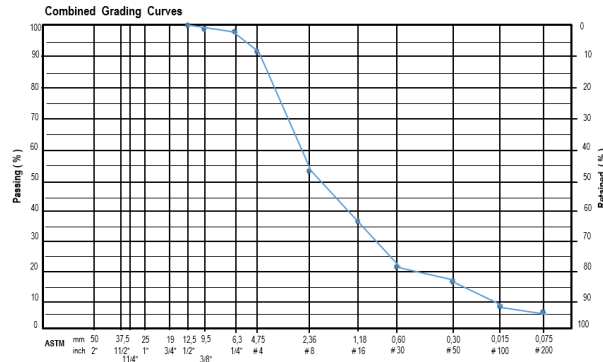
## 4.2 Karakteristik Agregat Kasar

### 4.2.1 Analisis Saringan Agregat Kasar

Hasil analisis saringan menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki nilai modulus kehalusan sebesar 5,72, yang masih memenuhi persyaratan gradasi agregat kasar untuk campuran AC-WC.

Tabel 4.5. Hasil Analisis Saringan Agregat Kasar

| Saringan<br>ASTM<br>Inch | Ukuran<br>mm | Berat<br>Tertahan<br>gr | Akumulatif<br>Tertahan<br>gr | Akumulatif<br>Tertahan<br>% | Persen<br>Lewat<br>% |
|--------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 2"                       | 50,0         | -                       | -                            | -                           | -                    |
| 1½"                      | 37,5         | -                       | -                            | -                           | -                    |
| 1"                       | 25,0         | -                       | -                            | -                           | -                    |
| ¾"                       | 19,0         | -                       | -                            | -                           | -                    |
| ½"                       | 12,5         | 0,0                     | 0,0                          | 0,0                         | 100,00               |
| 3/8"                     | 9,5          | 537,0                   | 537,0                        | 21,5                        | 78,53                |
| ¼"                       | 6,3          | 1.418,8                 | 1.955,8                      | 78,2                        | 21,80                |
| No. 4                    | 4,75         | 100,6                   | 2.056,4                      | 82,2                        | 17,78                |
| No. 8                    | 2,36         | 395,2                   | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| No. 16                   | 1,18         | 0,0                     | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| No. 30                   | 0,60         | 0,0                     | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| No. 50                   | 0,30         | 0,0                     | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| No. 100                  | 0,15         | 0,0                     | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| No. 200                  | 0,075        | 0,0                     | 2.451,6                      | 98,0                        | 1,98                 |
| PAN                      | -            | 49,4                    | 2.501,0                      | 100,0                       | 0,00                 |



Gambar2. Kurva Gradasi Agregat Kasar

Kurva gradasi memperlihatkan bahwa agregat didominasi ukuran butiran 9,5-6,3 mm sehingga mampu membentuk kerangka agregat yang kuat (stone-on-stone contact). Struktur tersebut berperan penting dalam meningkatkan stabilitas lapisan perkerasan [25].

#### 4.2.2 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Hasil pengujian menunjukkan berat jenis bulk sebesar 2,460 gr/cm<sup>3</sup> dengan nilai penyerapan air sebesar 2,543%.

Tabel 4.6. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

| Uraian                                   | Simbol/Rumus                     | Satuan | Hasil |
|------------------------------------------|----------------------------------|--------|-------|
| Berat sampel kering di udara             | A                                | gr     | 689   |
| Berat sampel SSD (Saturated Surface Dry) | B                                | gr     | 705,9 |
| Berat sampel jenuh dalam air             | C                                | gr     | 429   |
| Berat jenis bulk                         | $A$                              | gr/cc  | 2,460 |
| Berat jenis bulk SSD                     | $\frac{B - C}{B}$                | gr/cc  | 2,530 |
| Berat jenis semu                         | $\frac{B - C}{A}$                | gr/cc  | 2,650 |
| Penyerapan                               | $\frac{A - C}{B - A} \times 100$ | %      | 2,543 |

Nilai penyerapan air berada di bawah batas maksimum 3%, sehingga agregat memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Penyerapan yang rendah menunjukkan bahwa agregat mampu mempertahankan lapisan aspal pada permukaan batuan sehingga meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air [26].

#### 4.2.3 Berat Isi Agregat Kasar

Hasil pengujian menunjukkan berat isi agregat kasar sebesar 1,27 gr/cm<sup>3</sup> dengan kadar rongga udara sebesar 47,3%.

Tabel 4.7. Berat Isi Agregat Kasar

| Keterangan            | Simbol/Rumus      | Unit  | Test     |
|-----------------------|-------------------|-------|----------|
| Berat tabung          | A                 | gr    | 6.144,4  |
| Berat tabung + sampel | B                 | gr    | 12.430,0 |
| Berat sampel          | $C = B - A$       | gr    | 6.285,6  |
| Volume tabung         | D                 | cc    | 4.941,0  |
| Berat isi             | $E = \frac{C}{D}$ | gr/cc | 1,27     |
| Kadar rongga udara    | -                 | %     | 47,3     |



|             |   |       |      |
|-------------|---|-------|------|
| Berat jenis | - | gr/cc | 2,41 |
| Berat isi   | - | gr/cc | 1,00 |

Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat memiliki ruang antar butir yang cukup untuk diisi oleh aspal sehingga mampu menghasilkan campuran yang padat dan stabil setelah proses pemadatan. Rongga yang proporsional juga mendukung peningkatan durabilitas campuran beraspal [24].

#### 4.3 Karakteristik Agregat Kasar

Perancangan campuran (mix design) dilakukan untuk menentukan proporsi agregat, aspal, dan bahan tambah yang mampu menghasilkan campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Penelitian ini menggunakan campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) sebagai kontrol dan *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan penambahan zeolit sintetis (Advera) sebesar 0,2% dari berat aspal. Kadar aspal yang digunakan ditetapkan sebesar 6% dari berat agregat.

Tabel 4.8. Komposisi Mix Design Campuran AC-WC

| MIX 3       |                 | Total wt of materials : |          | 5.000 | gram |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------|-------|------|
|             |                 | % by aggr.              | % by mix |       |      |
| 1 Asphalt   | Pertamina 60/70 | 6,0                     | 5,66     | 283   | gram |
| 2 Split     | Sudamanik 10/20 |                         |          | -     | gram |
| 3 Screening | Sudamanik 5/10  | 53                      | 50,00    | 2.500 | gram |
| 4 Dust      | Sudamanik 0/5   | 47                      | 44,34    | 2.217 | gram |
| 5 Sand      |                 |                         |          | -     | gram |
| 6 Filler    | Portland Cement |                         |          | -     | gram |
| Total       |                 | 106,0                   | 100,0    | 5.000 | gram |

Komposisi campuran menunjukkan bahwa agregat kasar dan agregat halus disusun untuk menghasilkan gradasi yang memenuhi spesifikasi AC-WC. Proporsi agregat yang seimbang berperan dalam membentuk struktur kerangka (*stone-on-stone contact*) sehingga mampu meningkatkan stabilitas campuran, sedangkan kadar aspal yang digunakan diharapkan memberikan daya ikat yang optimal antar agregat [27]. Kebutuhan material untuk setiap benda uji dihitung berdasarkan berat agregat sebesar 5.000 gram, dengan penambahan aspal 300 gram dan aditif Advera 6 gram.

Tabel 4.9. Kebutuhan Material Mix Design per Benda Uji

| No.         | Komponen Campuran | Tipe            | % by Mix | Rumus Perhitungan     | Berat (Gram) |
|-------------|-------------------|-----------------|----------|-----------------------|--------------|
| 1           | Kadar Aspal       | Aspal Pen 60/70 | 6,0%     | $6,0\% \times 5.000$  | 300,0 gr     |
| 2           | Admixture         | Zeolit (Advera) | 0,2%     | $0,2\% \times 300,0$  | 6 gr         |
| 3           | Agregat Halus     | Abu Batu        | 47,0%    | $47,0\% \times 5.000$ | 2.350 gr     |
| 4           | Agregat Sedang    | Screening 5/10  | 53,0%    | $53,0\% \times 5.000$ | 2.650 gr     |
| Total Berat |                   |                 | 106,0%   | $106\% \times 5.300$  | 5.300 gram   |

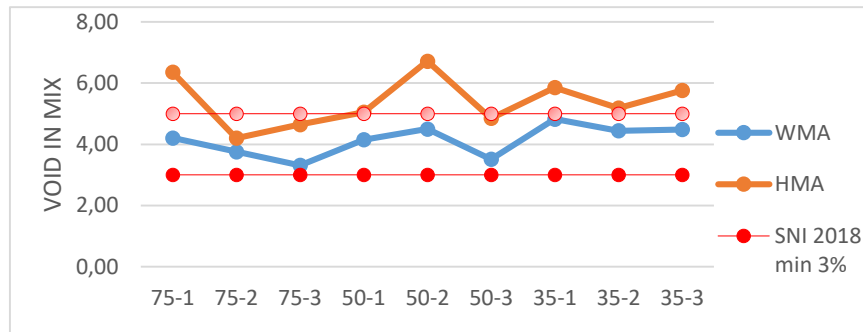
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komposisi campuran terdiri atas 53% agregat kasar (2.650 gram), 47% agregat halus (2.350 gram), 300 gram aspal Pen 60/70, dan 6 gram Advera sehingga total berat campuran sebesar 5.306 gram. Penambahan Advera sebesar 0,2% bertujuan menurunkan viskositas aspal sehingga proses pencampuran dan pemadatan dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah tanpa menurunkan kualitas campuran. Penggunaan teknologi *Warm Mix Asphalt* diharapkan meningkatkan efisiensi energi sekaligus mempertahankan karakteristik Marshall sesuai persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 [28].



#### 4.4 Hasil Pengujian Marshall

##### 4.4.1 Analisis *Density*

Pengujian *density* dilakukan untuk mengetahui tingkat kepadatan campuran beraspal setelah proses pemadatan. Nilai *density* digunakan sebagai indikator kualitas susunan agregat karena semakin tinggi nilai *density* maka semakin rapat struktur campuran yang dihasilkan.

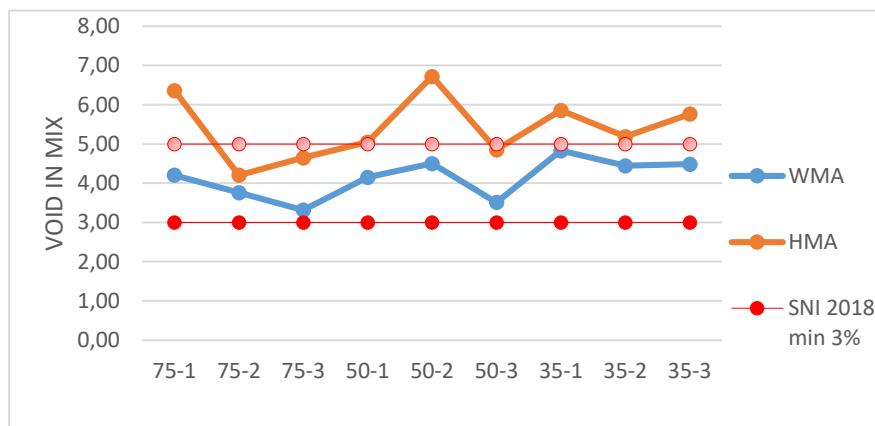


Gambar 3. Rekapitulasi Nilai *Density*

Berdasarkan Gambar 3, nilai *density* campuran WMA lebih tinggi dibandingkan HMA pada seluruh variasi tumbukan. Nilai *density* tertinggi diperoleh pada WMA 75 tumbukan sebesar 2,277 gr/cm<sup>3</sup>, sedangkan HMA 75 tumbukan sebesar 2,217 gr/cm<sup>3</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan Advera 0,2% meningkatkan *workability* campuran sehingga kepadatan tetap tinggi meskipun energi pemadatan dikurangi.

##### 4.4.2 Analisis *Void in Mix* (VIM)

Pengujian *Void in Mix* (VIM) bertujuan untuk mengetahui persentase rongga udara yang masih tersisa di dalam campuran beraspal setelah proses pemadatan. Nilai VIM menjadi salah satu parameter penting karena berpengaruh terhadap durabilitas dan ketahanan campuran terhadap masuknya air maupun udara.



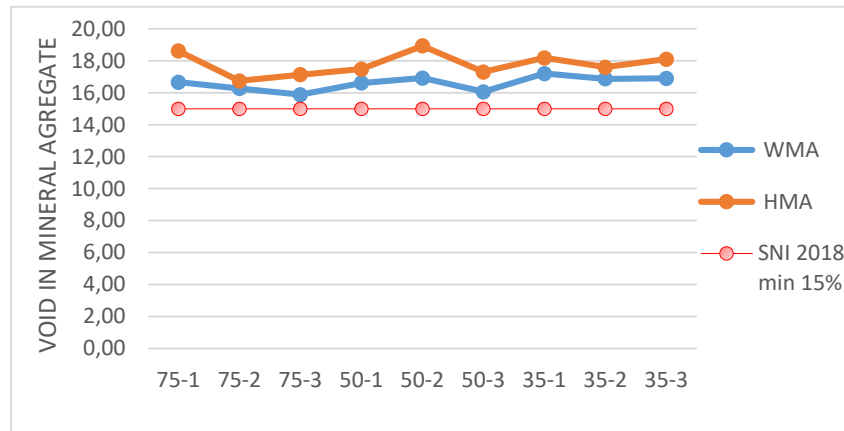
Gambar 4. Rekapitulasi Nilai VIM

Berdasarkan Gambar 4, campuran WMA menghasilkan nilai VIM yang lebih rendah dibandingkan HMA serta memenuhi spesifikasi Bina Marga (3-5%). Nilai VIM terbaik diperoleh pada WMA 75 tumbukan sebesar 3,76%, sedangkan HMA 75 tumbukan masih berada pada 5,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan Advera mampu menghasilkan rongga udara yang lebih terkendali walaupun jumlah tumbukan dikurangi.



#### 4.4.3 Analisis *Void in Mineral Aggregate* (VMA)

Pengujian *Void in Mineral Aggregate* (VMA) dilakukan untuk mengetahui persentase volume rongga antar butiran agregat yang terdiri atas rongga udara dan rongga yang terisi aspal. Nilai VMA menunjukkan kemampuan struktur agregat dalam menampung aspal sehingga berpengaruh terhadap durabilitas dan kinerja campuran beraspal.

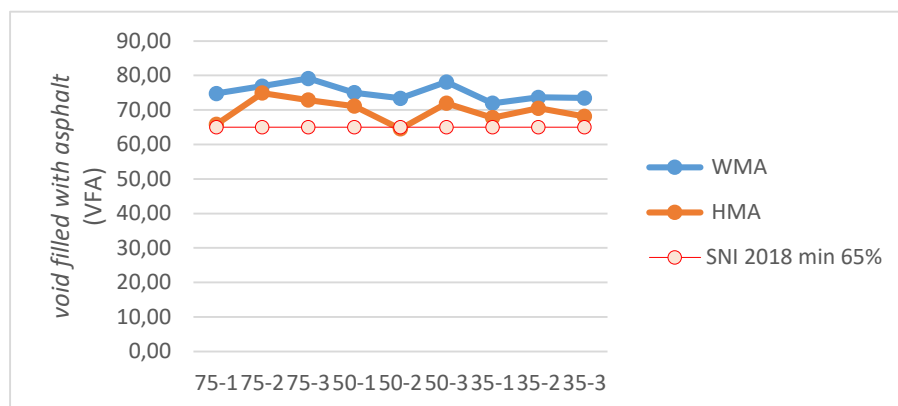


Gambar 5. Rekapitulasi Nilai VMA

Berdasarkan Gambar 5, seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan minimum VMA sebesar 15% sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Campuran WMA menghasilkan nilai VMA yang lebih rendah dibandingkan HMA, dengan nilai terendah sebesar 16,27% pada WMA 75 tumbukan, sedangkan HMA 75 tumbukan sebesar 17,49%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan Advera mampu menghasilkan susunan agregat yang lebih rapat sehingga campuran tetap memiliki kualitas yang baik meskipun energi pemadatan dikurangi.

#### 4.4.4 Analisis *Void Filled with Asphalt* (VFA)

Pengujian *Void Filled with Asphalt* (VFA) dilakukan untuk mengetahui persentase rongga antar agregat yang terisi oleh aspal. Nilai VFA menggambarkan efektivitas aspal dalam mengisi rongga agregat sehingga berpengaruh terhadap kedap air dan durabilitas campuran.



Gambar 6. Rekapitulasi Nilai VFA

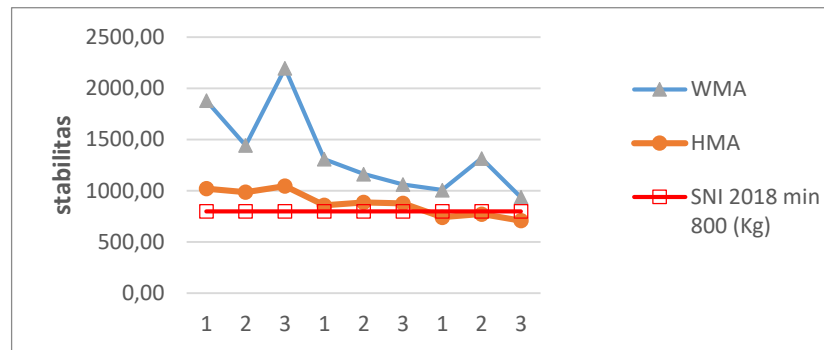
Berdasarkan Gambar 6, seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan minimum VFA sebesar 65%. Nilai VFA campuran WMA lebih tinggi dibandingkan HMA, dengan nilai tertinggi sebesar 76,93% pada WMA 75 tumbukan, sedangkan HMA 75 tumbukan sebesar 71,20%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan Advera meningkatkan kemampuan aspal mengisi rongga antar



agregat sehingga campuran menjadi lebih rapat dan berpotensi memiliki durabilitas yang lebih baik.

#### 4.4.5 Analisis Stabilitas Marshall

Pengujian Stabilitas Marshall dilakukan untuk mengetahui kemampuan campuran beraspal dalam menahan beban sebelum mengalami deformasi. Semakin tinggi nilai stabilitas, semakin baik kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas.

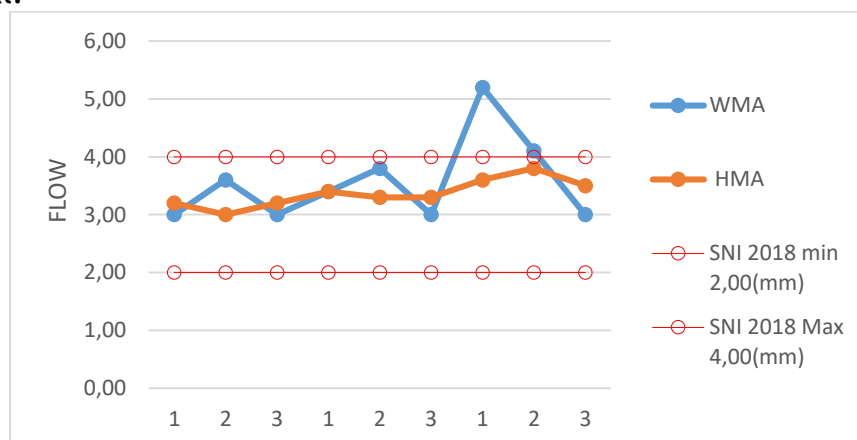


Gambar 7. Rekapitulasi Nilai Stabilitas Marshall

Berdasarkan Gambar 7, nilai stabilitas campuran WMA lebih tinggi dibandingkan HMA pada seluruh variasi tumbukan. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada WMA 75 tumbukan sebesar 1840,02 kg, sedangkan HMA 75 tumbukan sebesar 1017,84 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan Advera mampu meningkatkan kekuatan campuran sehingga pengurangan energi pemadatan tetap menghasilkan stabilitas yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

#### 4.4.6 Analisis Flow

Pengujian *Flow* dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi campuran ketika menerima beban maksimum pada pengujian Marshall. Nilai *flow* menunjukkan tingkat fleksibilitas campuran sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan campuran beraspal.



Gambar 8. Rekapitulasi Nilai Flow

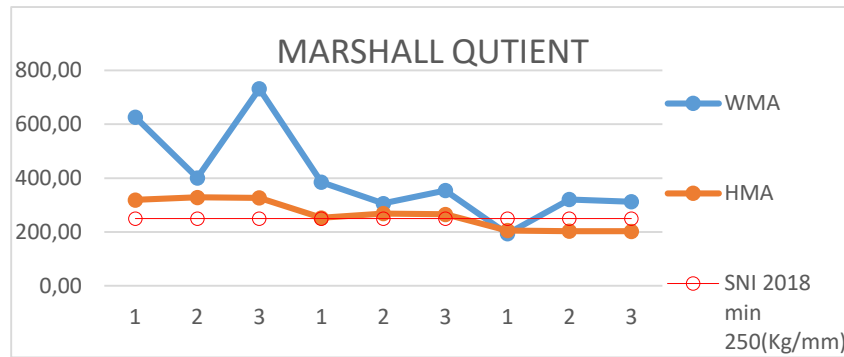
Berdasarkan Gambar 8, hampir seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan *flow* sebesar 2-4 mm. Nilai *flow* WMA 50 tumbukan sebesar 3,40 mm masih berada dalam rentang spesifikasi dan menunjukkan fleksibilitas yang baik, sedangkan WMA 35 tumbukan memiliki nilai 4,10 mm yang sedikit melebihi batas maksimum. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan Advera tetap



mampu menghasilkan keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran, terutama pada variasi 50 tumbukan.

#### 4.4.7 Analisis *Marshall Quotient* (MQ)

Pengujian *Marshall Quotient* (MQ) dilakukan untuk mengetahui tingkat kekakuan campuran beraspal melalui perbandingan antara nilai stabilitas dan *flow*. Nilai MQ yang tinggi menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen akibat beban lalu lintas.



Gambar 9. Rekapitulasi Nilai *Marshall Quotient* (MQ)

Berdasarkan Gambar 9, nilai *Marshall Quotient* (MQ) campuran WMA lebih tinggi dibandingkan HMA. Nilai MQ tertinggi diperoleh pada WMA 75 tumbukan sebesar 586,61 kg/mm, sedangkan HMA 75 tumbukan sebesar 324,93 kg/mm. Selain itu, WMA 50 tumbukan menghasilkan nilai MQ sebesar 348,47 kg/mm yang juga lebih tinggi dibandingkan HMA 75 tumbukan, sehingga menunjukkan bahwa penambahan Advera mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan campuran terhadap deformasi meskipun energi pemadatan dikurangi.

#### 4.5 Rekapitulasi Akhir Karakteristik Marshall

Rekapitulasi hasil pengujian Marshall digunakan untuk membandingkan karakteristik campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) dan *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan penambahan Advera 0,2% pada variasi energi pemadatan 35, 50, dan 75 tumbukan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan Advera dalam mempertahankan kinerja campuran sekaligus mengurangi kebutuhan energi pemadatan.

Tabel 4.10. Rekapitulasi Karakteristik Marshall Campuran HMA dan WMA.

| Parameter                     | Spesifikasi | HMA 75  | WMA 50  | WMA 35  |
|-------------------------------|-------------|---------|---------|---------|
| Density (gr/cm <sup>3</sup> ) | -           | 2,217   | 2,270   | 2,257   |
| VMA (%)                       | ≥15         | 17,49   | 16,53   | 16,99   |
| VIM (%)                       | 3,5-5       | 5,07    | 4,05    | 4,58    |
| VFA (%)                       | ≥65         | 71,20   | 75,51   | 73,02   |
| Stabilitas (kg)               | ≥800        | 1017,84 | 1178,44 | 1086,85 |
| Flow (mm)                     | 2-4         | 3,13    | 3,40    | 4,10    |
| MQ (kg/mm)                    | ≥250        | 324,93  | 348,47  | 275,70  |

Berdasarkan Tabel 9, campuran WMA dengan penambahan Advera 0,2% menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan HMA pada sebagian besar parameter Marshall. Variasi WMA 50 tumbukan menghasilkan nilai *density*, stabilitas, VFA, dan MQ yang lebih tinggi serta nilai VIM yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga mampu memberikan performa yang sebanding bahkan lebih baik dibandingkan HMA 75 tumbukan. WMA 35 tumbukan masih menunjukkan karakteristik yang cukup baik, namun nilai *flow* sedikit melebihi batas spesifikasi sehingga belum direkomendasikan sebagai pengganti penuh HMA 75 tumbukan.



## 5. KESIMPULAN

Karakteristik Marshall campuran HMA dan WMA menunjukkan adanya pengaruh energi pemadatan terhadap kinerja campuran. Pada campuran HMA, penurunan energi pemadatan dari 75 menjadi 35 tumbukan menyebabkan nilai stabilitas turun dari 1017,84 kg menjadi 740,95 kg, sedangkan nilai Marshall Quotient (MQ) turun menjadi 203,93 kg/mm. Nilai tersebut tidak memenuhi persyaratan Stabilitas Marshall minimum 800 kg dan menunjukkan bahwa HMA membutuhkan energi pemadatan yang lebih tinggi. Sebaliknya, campuran WMA dengan Advera 0,2% pada 35 tumbukan masih memenuhi persyaratan dengan nilai stabilitas 1086,85 kg dan MQ 275,70 kg/mm.

Terdapat perbedaan karakteristik Marshall antara campuran HMA dan WMA Advera 0,2%. Campuran WMA menghasilkan kinerja yang lebih baik pada energi pemadatan rendah. Pada variasi 35 tumbukan, WMA memiliki nilai VIM sebesar 4,58% yang memenuhi spesifikasi 3-5%, stabilitas 1086,85 kg (syarat  $\geq 800$  kg), dan MQ 275,70 kg/mm (syarat  $\geq 250$  kg/mm). Sedangkan HMA 35 tumbukan menghasilkan VIM 5,60% (di atas batas maksimum), stabilitas 740,95 kg (di bawah syarat minimum), dan MQ 203,93 kg/mm (di bawah syarat minimum).

Penggunaan Advera 0,2% efektif meningkatkan kemudahan pemadatan (*workability*) campuran WMA sehingga energi pemadatan dapat dikurangi. Pengurangan hingga 50 tumbukan merupakan kondisi paling optimal karena menghasilkan nilai VIM 4,05% (syarat 3-5%), stabilitas 1178,44 kg (syarat  $\geq 800$  kg), dan MQ 348,47 kg/mm (syarat  $\geq 250$  kg/mm). Pada 35 tumbukan, campuran WMA masih memenuhi sebagian besar parameter Marshall, namun nilai flow sebesar 4,10 mm sedikit melebihi batas spesifikasi 2-4 mm, sehingga lebih sesuai untuk kondisi lalu lintas sedang hingga rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bina Marga, "Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 1)," 2018, *Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*.
- [2] M. Bilema, C. W. Yuen, M. Alharthai, S. R. O. Aletba, and N. I. M. Yusoff, "Influence of Warm Mix Asphalt Additives on the Physical Characteristics of Crumb Rubber Asphalt Binders," *Appl. Sci.*, vol. 13, pp. 1-15, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app131810337>.
- [3] N. Liu, L. Liu, M. Li, and L. Sun, "A Comprehensive Review of Warm-Mix Asphalt Mixtures: Mix Design, Construction Temperatures Determination, Performance and Life-Cycle Assessment," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 25, no. 7, pp. 1-47, 2024, doi: 10.1080/14680629.2023.2268194.
- [4] Direktorat Jenderal Bina Marga, "SKh-1.6.30 Campuran Beraspal Hangat Asbuton Murni,"



- 2022, *Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta*.
- [5] D. Nawir and A. Z. Mansur, *Rekayasa Perkerasan Jalan: Prinsip, Praktik, dan Inovasi*. Gowa: CV Ruang Tentor, 2025.
  - [6] E. Wonda, Irianto, and D. S. S. Mabui, "Pengaruh Suhu Pencampuran Terhadap Nilai Volumetrik Campuran Aspal AC-WC," *Pros. Semin. Nas. Tek. Sipil Univ. Yapis Papua*, vol. 4, no. 1, pp. 19-26, 2025.
  - [7] Syaripin, N. S. Kaffa, T. Pranadiarso, A. F. Ardiansyah, G. A. Alawy, and R. A. Septiandri, "Perbandingan Kinerja Campuran Beraspal dari Aspal Pen 60/70 dan Aspal PG di Indonesia," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 8, no. 4, pp. 1165-1176, 2025, doi: <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i4.35160>.
  - [8] A. Susilowati, E. Wiyono, and Pratikto, "Studi Karakteristik Campuran Aspal Beton Hangat Laston AC-WC dengan Penambahan Rediset LQ-1106," *SNIV Semin. Nas. Inov. Vokasi*, vol. 2, no. 1, pp. 213-222, 2023.
  - [9] H. A. Susanto, D. Y. Wiranata, and D. N. Saputro, "Kinerja Marshall Warm Mix Asphalt sebagai Konstruksi Jalan Ramah Lingkungan," *Semin. Nas. TRENd Technol. Renew. Energy Dev.*, pp. 104-114, 2022.
  - [10] M. Wasilewska *et al.*, "The Effect of a Zeolite Addition to Modified Bitumen on the Properties of Stone Matrix Asphalt Lärmarmer Mixtures Produced as Warm Mix Asphalt," *Materials (Basel)*, vol. 17, pp. 1-20, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17235848>.
  - [11] W. Araska, "Tinjauan Sistematis Warm Mix Asphalt di Tropis Basah: Analisis Trade-off Stabilitas dan Ketahanan Air," *J. Sustain. Civ. Eng.*, vol. 07, no. 02, pp. 143-151, 2025, doi: <https://doi.org/10.47080/6sp18a09>.
  - [12] F. S. A. Maulana and M. Muhlis, "Efisiensi Dan Efektivitas Penggunaan Aspal Pada Perkerasan Jalan Raya (Efficiency and Effectiveness of Asphalt Use in Highway Paving)," *Daktilitas J. Tek. Sipil Univ. Tulungagung Vol.*, vol. 04, no. 02, pp. 93-101, 2024.
  - [13] ASTM International, "ASTM D6926-20: Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus.," 2020, *ASTM International*.
  - [14] W. M. Hasan, R. A. Yousif, S. Hesami, S. A. Tayh, A. F. Jasim, and H. H. Ibrahim, "Evaluation of Mechanical Properties of Warm-Mix Asphalt Mixtures Prepared with Sasobit and Zeolite Additives," *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 56, no. 6, pp. 716-726, 2024, doi: [10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.6.4](https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.6.4).
  - [15] A. A. E.-G. M. El-Sayed, H. K. Mohamed, M. E.-S. A. El-Latif, and A. E. A. Mostafa, "Performance Evaluation of Half Warm Asphalt Mixture Prepared with Natural and Nano Synthetic Zeolite , Chemical Additives and Polymers," *JES. J. Eng. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 111-126, 2025, doi: [10.21608/JESAUN.2025.349056.1403](https://doi.org/10.21608/JESAUN.2025.349056.1403).
  - [16] E. W. Indriyati, B. S. Subagio, H. Rahman, and S. S. Wibowo, "Pengaruh Penggunaan Aspal Modifikasi Nano Zeolit terhadap Karakteristik Marshall Campuran Beraspal Panas HRS-WC," *J. Tek. Sipil*, vol. 31, no. 1, pp. 45-52, 2024, doi: [10.5614/jts.2024.31.1.5](https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.1.5).
  - [17] C. G. Daniel, K. A. Canny, F. M. Firdaus, and D. B. Iskandar, "Studi Komparasi Dampak Lingkungan Produksi Campuran Aspal Hangat Modifikasi Polimer EVA dengan Campuran Aspal Panas Skala Laboratorium Menggunakan Life Cycle Assessment (LCA)," *Teknik*, vol. 44, no. 1, pp. 23-38, 2023, doi: [10.14710/teknik.v44i1.52052](https://doi.org/10.14710/teknik.v44i1.52052).
  - [18] Andreas, Sainuddin, N. Zamad, D. Patah, Sutriani, and A. I. Amalia, "Pengaruh Variasi Jumlah Tumbukan pada Perkerasan HRS-WC dengan Metode Marshall Test," *Bandar J. Civ. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 49-55, 2024.
  - [19] J. A. Abdal, R. Al-Zebaree, and A.-H. Ali, "Effects of Compaction Efforts on Tensile Strength Characteristics and Durability of Warm-Asphalt Mixture Containing Natural and Synthetic Zeolite," *J. Univ. Duhok*, vol. 25, no. 1, pp. 152-163, 2022, doi: <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i4.35160>.



- <https://doi.org/10.26682/sjuod.2022.25.1.17>.
- [20] D. A. Latief, "Performa Campuran Aspal Hangat Menggunakan Aditif Zeolit Alam," in *Tugas Akhir*, Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2024.
  - [21] R. M. Pasapan, L. B. Suparma, and S. Siswosukarto, "Pengaruh Penggunaan Zeolite Alam sebagai Pengganti Mineral Filler pada Campuran Lapis Fondasi Agregat Kelas A," *J. HPJI (Himpunan Pengemb. Jalan Indones.)*, vol. 10, no. 2, pp. 85-96, 2024.
  - [22] M. A. B. Nadi *et al.*, *Perkerasan Jalan*. Padang: CV. Luminary Press Indonesia, 2024.
  - [23] Z. M. Jasim, M. M. Hilal, S. S. Hasan, and M. Y. Fattah, "Warm Mix Asphalt (WMA) Techniques: Advantages and Disadvantages - A Review," *Pros. 5th Int. Conf. Build. Constr. Environ. Eng. (AIP Conf. Proceedings)*, pp. 1-22, 2024, doi: 10.1063/5.0243769.
  - [24] F. Barraj, J. Khatib, A. Castro, and A. Elkordi, "Effect of Chemical Warm Mix Additive on the Properties and Mechanical Performance of Recycled Asphalt Mixtures," *Buildings*, vol. 12, pp. 1-21, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12070874>.
  - [25] J. Pang, Y. Chen, L. Jing, H. Song, and Z. Liu, "Performance Evaluation of Warm-Mix Asphalt Binders with an Emphasis on Rutting and Intermediate-Temperature Cracking Resistance," *Materials (Basel)*, vol. 18, pp. 1-16, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18071571>.
  - [26] J. Yi *et al.*, "Research on Design and Performance of Self-Compacting Cement Emulsified Bitumen Mixture (CEBM)," *Materials (Basel)*, vol. 15, pp. 171-191, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/>.
  - [27] Hakzah, Andriansyah, Mustakim, and Jasman, "The Aggregate Gradation in Road Reconstruction," *Astonjadro*, vol. 13, no. 3, pp. 930-940, 2024, doi: Hakzah Hakzah, Andriansyah Andriansyah, Mustakim Mustakim, Jasman Jasman The Aggregate Gradation in Road Reconstruction The Aggregate Gradation in Road Reconstruction Hakzah Hakzah, Andriansyah Andriansyah, Mustakim Mustakim, Jasman Jasman Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Parepare, Parepare, INDONESIA E-mail: andriansyahandri282@gmail.com | Submitted: January 31, 2024 | Revised: February 17, 2024 | Accepted: May 24, 2024 | | Published: September 22, 2024 |.
  - [28] M. H. Pirbasti, "Evaluation of the Effects of Various Types of Inert and Active Fillers on Asphalt Mixture Performance," in *Thesis (Master of Science)*, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2025.