

ANALISIS PENGARUH SIFAT VOLUMETRIK PADA CAMPURAN ASPAL AC-WC

Eti Sulandari¹⁾, Yoke Lestyowati¹⁾, Felderika²⁾, Sutarno³⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Hadari Nawawi, Pontianak, Kalimantan Barat

²⁾Jurusan Teknik Sipil, Unikom, Jl Dipatiukur, Bandung, Jawa Barat (40132)

³⁾ASTTI, Jl. Komyos Sudarso No. 36, Pontianak, Kalimantan Barat (78113)

E-mail: etisulandari@civil.untan.ac.id¹⁾, yokelestyowati@civil.untan.ac.id¹⁾, falderika07@gmail.com²⁾, sutarno3355@gmail.com³⁾

ABSTRAK

Jalan sebagai prasarana infrastruktur mempunyai peranan dalam meningkatkan aksesibilitas yang menghubungkan antara kota. Kerusakan dini akibat beban lalu lintas yang berlebih, pengaruh lingkungan (temperatur), kualitas material dan desain campuran aspal merupakan kendala untuk perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur. Sifat volumetrik (VIM, VMA dan VFA) sebagai salah satu variabel yang mempengaruhi kekuatan campuran aspal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kadar aspal terhadap sifat volumetrik dengan metode Marshall test. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar aspal pada HMA AC-WC mempengaruhi sifat volumetrik. Seiring bertambahnya kadar aspal nilai VIM menurun karena terjadi ikatan yang kuat antar butiran agregat, Nilai VIM yang terpenuhi menurut spesifikasi BM 2018 revisi 2 adalah kadar aspal 6,28% dan 6,5%. Sebaliknya nilai VFA meningkat, dimana nilai VFA yang terpenuhi pada kadar aspal 5,7% , 6% dan 6,5%. Nilai VFA yang tinggi terjadi bleeding dan terkecil menjadi kurang kepad pada campuran aspal. Bertambahnya kadar aspal menurunkan nilai VMA. Nilai VMA yang terpenuhi adalah 4,5% - 6,5%. VMA besar berpengaruh pada stabilitas jika kecil berpengaruh pada durabilitas. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa kadar aspal mempengaruhi sifat volumetrik dan stabilisasi campuran aspal. Dengan mengembangkan aspek tersebut, diharapkan kualitas dan daya tahan jalan dapat meningkat, serta memperpanjang umur pakai infrastruktur jalan.

Kata kunci: AC-WC, Uji Marshall, VIM, VMA, FVA

1. Pendahuluan

Dunia konstruksi jalan mengenal tiga jenis perkerasan yaitu perkerasan lentur, perkerasan kaku dan perkerasan komposit. Perkerasan lentur merupakan jenis perkerasan yang menggunakan bahan pengikat aspal dan agregat sebagai material dominan pada campuran aspal. Perkerasan kaku sebagai jenis perkerasan yang menggunakan bahan pengikat semen dan agregat sebagai material yang paling besar pada campuran beton. Sedangkan perkerasan komposit merupakan jenis perkerasan gabungan yang menggunakan perkerasan kaku dan di atasnya perkerasan lentur atau sebaliknya. Masing-masing jenis perkerasan mempunyai kelebihan dan kekurangan.

Jalan-jalan di Indonesia banyak menggunakan perkerasan lentur karena dari segi pelayanan memberikan kenyamanan berkendara [1], permukaan yang halus dan aman [2], walaupun sering terjadi kerusakan dini [3] karena

keterlambatan penanganan maupun beban lalu-lintas yang berlebihan yang bergerak secara terus menerus sehingga mengalami kerusakan seperti deformasi [4].

Kerusakan pada jalan raya umumnya disebabkan oleh beban lalu lintas yang berlebihan, lingkungan (temperatur dan curah hujan yang tinggi), desain campuran aspal [5],[6] dan kualitas material yang kurang tepat. Pentingnya memperhatikan kekuatan perkerasan jalan khususnya pada lapisan permukaan yang bersentuhan langsung dengan beban lalu lintas.

Permasalahan yang sering timbul pada perkerasan lentur adalah kerusakan dini yang sering terjadi dimana usia perkerasan jalan tidak sesuai dengan masa layanan sehingga di tahun-tahun tertentu perkerasan jalan butuh peningkatan jalan. Desain campuran aspal harus didesain sedemikian rupa sehingga campuran aspal memiliki kekuatan campuran aspal yang mampu melayani beban lalu

lintas yang bekerja di atasnya.

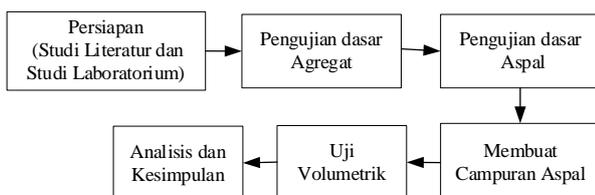
Penelitian sebelumnya telah meneliti untuk mendapatkan kualitas campuran aspal dengan memperhatikan material pembentuk campuran aspal yaitu agregat dan aspal. Campuran aspal dapat menggunakan aspal modifikasi seperti menggunakan modifikasi aspal polymer [7],[8],[9], bioaspal [10], [11], [12], aspal-karet [13], [14],[15], [16],[17],[18], aspal modifikasi limbah plastik [19], [20].

Selain aspal modifikasi, desain campuran aspal juga mempunyai peranan yang besar terhadap kekuatan campuran aspal. Porsi agregat pada campuran mempunyai peranan terbentuknya rongga-rongga pada campuran aspal sehingga hal tersebut berpengaruh pada stabilitas campuran aspal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh sifat volumetrik diantaranya adalah *Void in Mineral Aggregate* (VIM), *Void in Mix Asphalt* (VMA) dan *Void Filled with Asphalt* (VFA) pada campuran aspal panas AC-WC dengan menggunakan gradasi menerus. Suatu keuntungan dari gradasi menerus adalah yang memiliki variasi ukuran agregat sehingga terjadi interlocking yang baik pada campuran aspal. Diharapkan Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk merancang campuran aspal yang lebih baik, sehingga meningkatkan kualitas dan daya tahan jalan, serta memahami pengaruh kadar aspal terhadap sifat volumetriknya. Penelitian ini tidak mempertimbangkan pengaruh kondisi lingkungan eksternal yang dapat mempengaruhi kinerja campuran aspal setelah diterapkan di lapangan.

2. Material dan Metode Penelitian

Material yang digunakan pada campuran aspal adalah agregat yang berasal dari Batujajar, Jawa Barat dan aspal Shell Pen 60/70 sebagai bahan pengikat. Penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Fakultas Teknik Institut Teknologi Bandung. Prosedur penelitian tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian di Laboratorium

Pengujian dasar agregat yang dilakukan adalah berat jenis, abrasi dan absorpsi. Sedangkan pengujian dasar aspal yang dilakukan adalah berat jenis, penetrasi, daktilitas, titik lembek, titik nyala dan viskositas. Untuk metode pengujian campuran aspal dengan menggunakan metode Marshall test yang bertujuan untuk melihat perubahan sifat volumetrik pada campuran aspal dan mengacu pada standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2 [21].

3. Hasil Penelitian

Pengujian dasar agregat dan aspal dilakukan bertujuan untuk mengetahui kualitas material agregat dan aspal sudah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2.

3.1. Hasil Pengujian Agregat

Pengujian agregat bertujuan untuk mengetahui kualitas agregat terhadap beberapa pengujian agregat, baik untuk agregat kasar, agregat halus dan filler. Berat jenis agregat rata-rata diatas 2,5 yang melebihi dari batas minimum menurut spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2. Hasil pengujian agregat tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat

No.	uraian	Hasil	Spesifikasi
1	Agregat Kasar		
	SG Bulk	2,548	Min. 2,5
	SG Apparent	2,750	
	Penyerapan (%)	2,904	Maks 3%
2	Agregat Halus		
	SG Bulk	2,631	Min. 2,5
	SG Apparent	2,709	
	Penyerapan (%)	1,036	Maks. 3%
3	SG Filler	2,548	Min. 2,5
4	Abrasi (%)	19,891	Maks. 40%
5	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan MgSO4 (%)	4,94	Maks. 10%

Sumber: Sulandari, E. dkk 2022

Pada Tabel 1, hasil pengujian yang merupakan data sekunder [22] menunjukkan bahwa secara keseluruhan agregat yang digunakan dalam campuran aspal layak digunakan untuk campuran aspal AC-WC. Agregat kasar, agregat halus dan filler memiliki berat jenis lebih besar dari 2,5. Absorpsi atau penyerapan agregat cenderung besar sehingga berpengaruh pada penyerapan kadar aspal.

3.2. Hasil Pengujian aspal

Pengujian aspal bertujuan untuk mengetahui

kualitas aspal yang digunakan, Hasil pengujian aspal tersaji pada Tabel 2.

Pengujian aspal merupakan data sekunder [22], hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal Shell Pen 60/70 layak digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran aspal. Berdasarkan hasil pengujian viskositas, diperoleh suhu pencampuran aspal 156°C dan suhu pemadatan 145°C, kedua suhu tersebut digunakan sebagai suhu pencampuran dan suhu pemadatan ketika membuat campuran aspal. Sifat aspal yang elastis sangat berpengaruh terhadap karakteristik campuran aspal.

Tabel 2. Hasil Pengujian Aspal

No.	Uraian	Hasil	Spesifikasi
1	Berat Jenis	1,033	Min. 1
2	Penetrasi, 25°C, 100 gr, 5 detik	64,2	60 -70
3	Titik Nyala dgn Clevelen Open Cup, °C	344	Min. 232
4	Titik Lembek (Softening Point), °C	52	Min. 48
5	Viskositas Kinematis 135°C	337,3	Min. 300

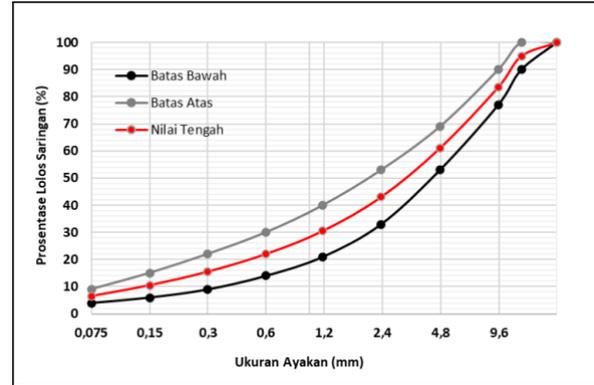
Sumber: Sulandari, E. dkk 2022

3.3. Hasil pengujian volumetrik pada campuran aspal panas AC-WC (VIM, VMA dan VFA).

Rongga pada campuran mempunyai pengaruh yang besar pada campuran aspal baik ditinjau secara struktural maupun fungsional. Jika ditinjau struktural maka mempengaruhi kekuatan campuran aspal, sedangkan jika ditinjau secara fungsional maka berpengaruh terhadap tekstur permukaan campuran aspal.

Menurut Bina Marga ada 3 jenis volumetrik yang dapat ditinjau pada campuran aspal yaitu VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate) dan VFA (Void Filled With Asphalt). Bina Marga membuat batasan untuk nilai volumetrik tergantung pada jenis campuran aspal yang digunakan. Untuk jenis campuran aspal AC-WC, nilai batasan VIM: 3-5 %, VMA: > 15% dan VFA: > 65%.

Gradasi menerus digunakan pada HMA AC-WC dengan, seperti yang tersaji pada Gambar 2.

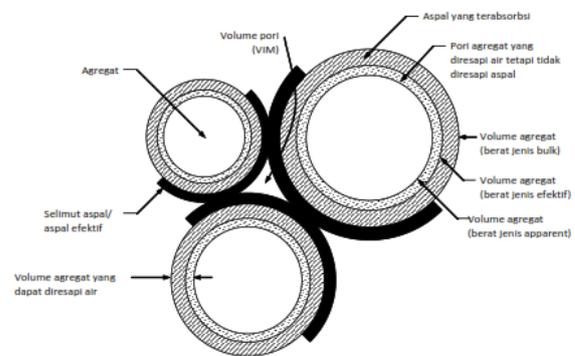


Gambar 2. Gradasi Menerus untuk AC-WC

Komposisi agregat yang digunakan adalah agregat kasar 39%, agregat halus 54,5% dan filler 6,5% dengan variasi kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, 6% dan 6,5%. Pengujian volumetrik mengacu pada spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2, yaitu VIM, VMA dan VFA. Hasil pengujian volumetrik sebagai berikut:

A. VIM (Void in Mix)

VIM sebagai salah satu sifat volumetrik yang diuji pada setiap kadar aspal. VIM merupakan volume rongga diantara butiran agregat dalam campuran beraspal [23]. Posisi VIM dapat tersaji pada Gambar 4.



Gambar 4. VIM pada Campuran Aspal (Sumber: Sukirman, S. 2016)

VIM dibutuhkan sebagai tempat bergesernya butiran agregat akibat pemadatan yang terjadi yang disebabkan oleh beban lalu lintas yang bergerak secara kontinyu. Nilai VIM dapat dihitung dengan menggunakan rumus [23]:

$$VIM = \left(100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \% \quad (\text{pers. 1})$$

Dimana:

VIM = volume rongga dalam beton aspal padat, % dari volume bulk beton aspal padat

- G_{mm} = berat jenis maksimum dari beton aspal yang belum dipadatkan
- G_{mb} = berat jenis bulk dari beton aspal padat

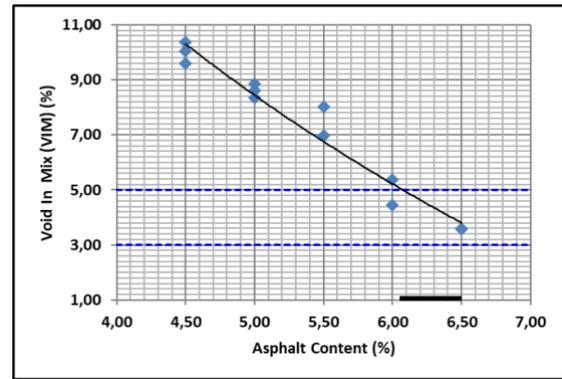
Hasil pengujian dan analisis nilai VIM tersaji pada Gambar 5. Nilai VIM yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 pada penelitian ini adalah 6,28% dan 6,5%, dimana syarat minimum untuk nilai VIM adalah 3% - 5%.

Nilai VIM berpengaruh pada durabilitas lapisan perkerasan, dimana tingginya nilai VIM maka rongga dalam campuran aspal semakin besar sehingga campuran aspal bersifat porous. Campuran aspal yang kurang rapat mengakibatkan air dan udara mudah masuk kedalam rongga-rongga. Hal tersebut tidak bisa terhindar dari teroksidasinya aspal pada campuran aspal sehingga daya ikat aspal terhadap butiran agregat berkurang. Akibatnya perkerasan aspal mengalami kerusakan yaitu pelepasan butiran dan pengelupasan permukaan pada lapis perkerasan. Nilai VIM yang melebihi dari ketentuan akan mengakibatkan berkurangnya keawetan lapis perkerasan, karena rongga terlalu besar akan mudah terjadi oksidasi.

Nilai VIM yang rendah dapat mengakibatkan bleeding (keluarnya aspal pada permukaan campuran aspal), dimana ketika suhu tinggi, dan pada saat itu lapis perkerasan menerima beban lalu lintas maka aspal akan terdesak keluar permukaan karena tidak cukup rongga bagi aspal untuk melakukan penetrasi dalam lapisan perkerasan.

Seiring bertambahnya kadar aspal maka nilai VIM menurun. Semakin kecil nilai VIM maka campuran aspal kedap air karena memiliki rongga udara yang sedikit.

Selain itu, nilai VIM juga dipengaruhi oleh gradasi agregat, jumlah tumbukan dan suhu pemadatan. Nilai VIM dapat digunakan untuk melihat tingkat ketahanan atau durabilitas pada campuran aspal. Banyaknya kadar aspal mengakibatkan rongga udara pada campuran AC-WC semakin sedikit tetapi memiliki daya ikat antar agregat semakin kuat serta campuran aspal menjadi padat.



Gambar 5. VIM pada AC-WC

B. VMA (Void in Mineral Aggregate)

VMA adalah sebagai salah satu sifat volumetrik selain VIM pada campuran aspal. VMA meningkat jika selimut aspal lebih tebal, atau agregat yang digunakan bergradasi terbuka (agregat cenderung seragam). Sehingga kurva bersifat naik atau mendatar seiring penambahan kadar aspal.

VMA dapat dihitung dengan menggunakan rumus [23]:

$$VMA = \left(100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_{a1}} \right) \% \quad (\text{pers. 2})$$

Dimana:

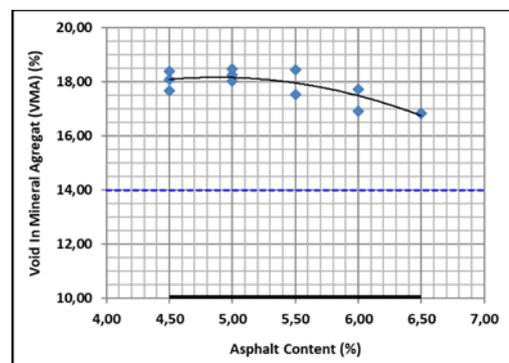
VMA = volume rongga antar butir agregat di dalam beton aspal pada, % dari volume bulk beton aspal padat

G_{mb} = berat jenis bulk dari beton aspal padat

P_{a1} = kadar aspal, % terhadap berat agregat

G_{sb} = berat jenis bulk dari agregat pembentuk beton aspal padat

Hasil pengujian VMA tersaji pada Gambar 6. Nilai VMA pada penelitian ini yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 adalah 4,5% hingga 6,5%, dimana syarat minimum untuk nilai VMA adalah 15%.



Gambar 6. VMA pada AC-WC

VMA merupakan rongga udara antar butir agregat aspal padat, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif yang dinyatakan dalam persen terhadap total volume. Jumlah rongga udara di pengaruhi oleh kinerja campuran aspal, nilai VMA kecil mengalami durabilitas dan sebaliknya jika VMA besar maka mempengaruhi stabilitas sehingga campuran aspal menjadi tidak ekonomis untuk diproduksi. Temperatur pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal merupakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai VMA.

Seperti disebutkan diatas bahwa gradasi agregat mempengaruhi nilai VMA, maka sifat fisik agregat yang hampir 90-95% jumlah agregat dalam campuran aspal berpotensi besar mempengaruhi nilai VMA. Sifat fisik yang dimaksud seperti ukuran butiran, kebersihan, kekerasan, bentuk partikel agregat, tekstur permukaan agregat, penyerapan air dan kelekatan aspal pada agregat.

Agregat yang bergradasi rapat pada HMA AC-WC, menunjukkan bahwa nilai VMA kecil maka aspal yang menyelimuti agregat terbatas dan tipis. Pada penelitian ini dengan bertambahnya kadar aspal nilai VMA menurun hal tersebut dikarenakan agregat yang digunakan memiliki pori yang besar sehingga jumlah penyerapan pada agregat besar pula sehingga aspal yang menyelimuti agregat menjadi berkurang sehingga nilai VMA menurun.

C. VFA (Void Filled With Asphalt)

VFA adalah volume rongga antara agregat yang terisi oleh aspal, disebut juga volume film atau selimut aspal. Perhitungan VFA dapat menggunakan rumus [23]:

$$VFA = \left(\frac{100(VMA - VIM)}{VMA} \right) \% \text{ dari VMA} \quad (\text{pers. 2})$$

Dimana:

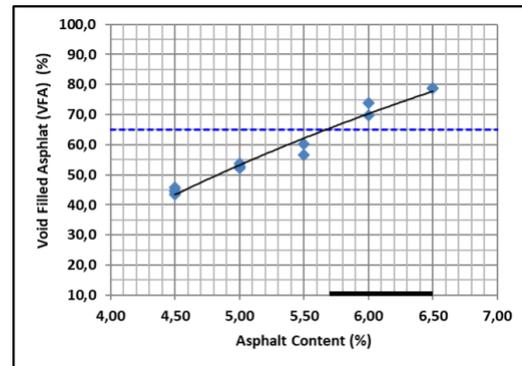
VFA = volume rongga antar butir agregat yang terisi aspal
= % dari VMA

VMA = volume rongga antar butir agregat di dalam beton aspal pada, % dari volume bulk beton aspal padat

VIM = volume rongga dalam beton aspal padat, % dari volume bulk beton aspal padat

Nilai VFA pada penelitian ini yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 adalah 5,7% , 6% dan 6,5%, dimana syarat minimum untuk nilai VFA adalah 65%. Adapun hasil analisis dan

pengujian VFA tersaji pada Gambar 7.



Gambar 7. VFA pada AC-WC

VFA sebagai persentase rongga yang terisi oleh aspal pada campuran aspal setelah mengalami proses pemadatan, dimana jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal merupakan faktor yang mempengaruhi sifat volumetrik. Nilai VFA berpengaruh pada sifat kedap campuran aspal terhadap air dan udara serta sifat campuran elastisitas campuran. Dengan kata lain VFA sebagai salah sifat volumetrik yang mempengaruhi stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas pada campuran aspal.

Semakin tinggi nilai VFA maka semakin banyak rongga dalam campuran yang terisi aspal sehingga kedekatan campuran aspal terhadap air dan udara juga semakin tinggi. Nilai VFA yang tinggi mengakibatkan terjadi bleeding pada campuran aspal, sedangkan nilai VFA yang terlalu kecil mengakibatkan campuran kurang kedap terhadap air dan udara karena lapisan film aspal yang tipis sehingga lapisan permukaan pada campuran aspal mudah retak jika menerima beban lalu lintas yang berlebihan.

Hasil pengujian VFA pada penelitian ini menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya kadar aspal nilai VFA meningkat. Semakin tinggi komposisi aspal yang memasuki rongga campuran maka nilai VFA juga semakin tinggi.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini mengkonfirmasi bahwa kadar aspal berperan penting dalam menentukan sifat volumetrik dan stabilitas campuran aspal, serta memberikan panduan praktis untuk aplikasi dalam proyek infrastruktur. Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah:

- a. Agregat dan aspal yang digunakan sebagai material pembentuk campuran aspal sudah memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2.
 - b. Sifat volumetrik (VIM, VMA dan VFA) mempengaruhi kinerja campuran aspal seperti stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas.
 - c. Seiring dengan bertambahnya kadar aspal nilai VIM dan VMA menurun dan sebaliknya untuk VFA meningkat.
 - d. Nilai VIM yang besar mempengaruhi durabilitas, sedangkan nilai VIM rendah maka terjadi bleeding pada permukaan campuran aspal. Kadar aspal yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 pada penelitian ini adalah 6,28% dan 6,5%.
 - e. Nilai VMA yang besar mempengaruhi menurunnya Stabilitas dan sebaliknya jika nilai VMA kecil maka menurunnya durabilitas pada campuran aspal. Nilai VMA yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 pada penelitian ini adalah 4,5% hingga 6,5%.
 - f. Nilai VFA yang besar mengakibatkan bleeding, sedangkan nilai VFA yang terlalu kecil mengakibatkan campuran kurang kedap terhadap air dan udara sehingga lapisan permukaan pada campuran aspal mudah retak. Nilai VFA yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 pada penelitian ini adalah 5,7%, 6% dan 6,5%.
- 5. Saran**
- Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh jenis dan karakteristik agregat terhadap sifat volumetrik campuran aspal, mengingat agregat memiliki peran penting dalam kualitas campuran dan mengkaji penggunaan bahan tambahan (*additives*) seperti polimer atau bahan daur ulang untuk meningkatkan kinerja dan ketahanan campuran aspal, serta mengevaluasi dampaknya terhadap sifat volumetrik.
- Daftar Pustaka**
- [1] J. N. Meegoda and S. Gao, "Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 2, no. 6, pp. 382–390, 2015.
 - [2] C. Celauro and F. G. Praticò, "Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses," *Constr. Build. Mater.*, vol. 170, pp. 245–253, 2018.
 - [3] H. Chakravarty, S. Sinha, and G. Kumar, "Influence of Aggregates on Stripping Behavior of Bituminous Mixes," *Civ. Eng. J.*, vol. 7, no. 03, pp. 531–540, 2021.
 - [4] R. T. Bethary *et al.*, "Development of Asphalt Mix Stiffness Modulus Model Using Slag Materials and Reclaimed Asphalt Pavement," *Int. J. GEOMATE*, vol. 19, no. 73, pp. 1–7, 2020.
 - [5] C. Andy and V. Sinuhaji, "Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lataston Gradasi Senjang (HRS - WC) Dengan Bahan Aspal Modifikasi Starbit E - 55," vol. 25, no. 2, 2018.
 - [6] Y. R. R. Saragi, P. Lumbangaol, R. A. Sidabutar, and B. S. Siahaan, "Marshall Characteristics in Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) in Various Length and Temperature Submersion," *Procedia Eng. Sci.*, vol. 171, pp. 1421–1428, 2017.
 - [7] S. Pysheev, V. Gunka, Y. Grytsenko, M. Shved, and V. Kochubei, "Oil and gas processing products to obtain polymers modified bitumen," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 289–296, 2017.
 - [8] S. Rahmad *et al.*, "Case Studies in Construction Materials Assessment of metal leaching from rediset-polymer modified asphalt binder on groundwater and soil contamination," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, 2022.
 - [9] M. A. Dalhat and K. Al-adham, "Review on laboratory preparation processes of polymer modified asphalt binder," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 10, no. 2, pp. 159–184, 2023.
 - [10] A. V. R. Sihombing, "The Effect of Bioasphalt on Aged Asphalt," *IOP Conf. Ser. ; Mater. Sci. Eng.*, pp. 0–7, 2019.
 - [11] H. Wang, Z. Ma, X. Chen, M. Rosli, and M. Hasan, "ScienceDirect Preparation process of bio-oil and bio-asphalt , their performance , and the application of bio-asphalt: A comprehensive review," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 7, no. 2, pp. 137–151, 2020.
 - [12] D. Zhu and L. Kong, "Case Studies in Construction Materials Laboratory

- evaluation of carbon nanotubes modified bio-asphalt,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. February, p. e01944, 2023.
- [13] H. Wang, X. Liu, M. Van De Ven, G. Lu, S. Erkens, and A. Skarpas, “Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117824, 2020.
- [14] J. Editorial *et al.*, “ScienceDirect New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021,” vol. 8, 2021.
- [15] Á. García, E. Schlangen, M. Van De Ven, and Q. Liu, “A simple model to define induction heating in asphalt mastic,” vol. 31, pp. 38–46, 2012.
- [16] S. Ren, X. Liu, P. Lin, H. Wang, W. Fan, and S. Erkens, “The continuous swelling-degradation behaviors and chemorheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, no. September, p. 124966, 2021.
- [17] Z. Fu *et al.*, “Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO₂ / ZnO and basalt fiber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, no. December 2021, p. 126323, 2022.
- [18] N. Xie, X. Peng, Y. He, W. Lei, C. Pu, and H. Meng, “Case Studies in Construction Materials Investigation on performance and durability of bone glue and crumb rubber compound modified asphalt and its mixture,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, no. May, p. e02437, 2023.
- [19] L. Widodo and P. E. Purnamasari, “Study the Use of Cement and Plastic bottle Waste as Ingredient Added to the Asphaltic Concrete Wearing Course,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 43, pp. 832–841, 2012.
- [20] M. R. Kakar, P. Mikhailenko, Z. Piao, and L. D. Poulidakos, “High and low temperature performance of polyethylene waste plastic modified low noise asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 348, 2022.
- [21] Bina Marga, *Spesifikasi umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (revisi 2)*. Indonesia, 2020.
- [22] E. Sulandari, “Analisis Karakteristik Jenis Batuan Andesit Sebagai Agregat Pada Campuran Beraspal AC-WC Material dan Metodologi,” *Pros. KNPTS*, no. 2017, pp. 1–10, 2022.
- [23] S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*, Ketiga. Bandung: Institut Teknologi Nasional Bandung, 2016.