

PENGGUNAAN ZAT ADITIF *GRAPHENE* PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)

Syukri Hamdani¹⁾, Muhammad Shalahuddin²⁾, Yosi Alwinda²⁾, Amun Amri³⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

³⁾Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : syukri.hamdani6877@student.unri.ac.id

ABSTRACT

One type of road pavement layers that susceptible to damage is Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC). AC-WC is the top layer of the road pavement structure. One effort that can be carried out to improve the quality of asphalt pavement is to modify the asphalt mixture materials by using additive. Graphene is one of the materials that can be used as asphalt additive. Several previous studies have used this material in various reinforcement structures. The aim of this study was to determine the effect of using asphalt that has been mixed with graphene as the additive in the AC-WC mixture based on the value of Marshall characteristics. Variations made in this study were 0% (without mixture) as a comparison, 0.5%, 1%, and 1.5% of asphalt weight. This research was carried out by designing the AC-WC mixture based on the gradation specifications of combined aggregate for each variation. The specimens of Marshall test were made for each variation. Graphene was made by using the Electrochemical and Mechanical Liquid Exfoliation (EMLE) method. The results showed that the use of graphene as the additive in the AC-WC mixture affected the value of Marshall characteristics. The best value that meets the general specifications of Bina Marga 2010 revision 3 was obtained in the addition of 1.5% graphene, with stability value 1485 kg or an increase of 28.57%, flow value 4.25 mm, VIM value 6%, VMA value 18.3%, VFA value 65%, and MQ value 345 kg/mm.

Keywords: Graphene, Additives, AC-WC, General Specifications of Bina Marga 2010 Revision 3, Marshall

A. PENDAHULUAN

Peningkatan kualitas jalan dalam memenuhi kebutuhan masyarakat sangat diperlukan karena adanya peningkatan mobilitas penduduk yang sangat tinggi. Lapisan perkerasan jalan *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) merupakan lapisan teratas dari struktur perkerasan jalan yang menerima langsung repetisi atau pengulangan beban dari kendaraan, sehingga sering mengalami kerusakan.

Salah satu usaha yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan mutu perkerasan aspal, baik dari segi peningkatan beban standar atau stabilitas maupun peningkatan ketahanan terhadap pengaruh cuaca dan air atau durabilitas adalah dengan memodifikasi bahan campuran aspal, baik itu

bahan pengisi (*filler*) maupun dengan penambahan zat aditif.

Graphene bisa menjadi zat aditif aspal lainnya. *Graphene* adalah alotrop karbon yang terdiri dari satu lapisan yang berikatan pada atom karbon sp² sebagai penguatan material komposit karena sifat mekanis, termal, dan elektrikalnya yang mengesankan, dimana mobilitas elektron yang tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, transparansi optik yang baik, serta memiliki kekuatan tarik 1 TPa atau 200 kali lebih keras dari baja dan 20 kali lebih keras dari berlian (Casero dkk., 2012).

Ranjbar N dkk (2015) menggunakan *Graphene Nanoplatelet* (GNP) sebagai *filler* pada geopolimer berbasis *fly ash*. Nilai kuat

lentur tanpa menggunakan GNP adalah sebesar 2,8 MPa, dan setelah penambahan GNP 0,1%, 0,5%, 1% berturut-turut menjadi 4,2 MPa, 5,1 MPa, dan 6,8 MPa. Penelitian lainnya oleh S Aravind, A Joshi Isac, dan S Aparajith (2018) yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik kinerja campuran aspal porus dengan penambahan *graphene*. Jenis aspal yang digunakan adalah PEN 80/100. Hasil penelitian menunjukkan nilai Stabilitas mengalami peningkatan sekitar 14,71% dari aspal berpori bitumen normal.

Berdasarkan sifat-sifat yang dimiliki dari *graphene* bahwa adanya beberapa penelitian terdahulu yang telah menggunakan *graphene* dan telah terbukti *graphene* bisa menjadi *filler* maupun zat aditif. Acuan inilah yang menjadi pegangan penambahan *graphene* pada campuran AC-WC.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Perkerasan Jalan

Silvia Sukirman (2003) menyatakan Perkerasan Jalan merupakan lapisan perkerasan yang terletak diantara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan yang berfungsi memberikan pelayanan pada sarana transportasi. Berdasarkan bahan pengikatnya, jenis konstruksi perkerasan jalan dapat dibedakan atas perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*).

Konstruksi perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapisan permukaan (*surface course*), lapisan pondasi atas (*base course*), lapisan pondasi bawah (*subbase course*) dan lapisan tanah dasar (*subgrade*). Susunan lapis konstruksi perkerasan lentur seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Susunan Lapis Konstruksi Perkerasan Lentur

B.2 Klasifikasi Campuran Aspal

Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga (2005), campuran aspal panas dapat diklasifikasikan dalam beberapa jenis yaitu:

1. Latasir (*Sand Sheet*) Kelas A dan B. Campuran ini ditujukan untuk jalan dengan lalu lintas rencana kurang dari 0,5 juta ESA dan khususnya pada daerah dimana agregat kasar sulit diperoleh.
2. Lataston (HRS) Lataston terdiri dari dua macam campuran yaitu Lataston Lapis Pondasi (HRS-Base) dan Lataston Lapis Permukaan (HRS-Wearing Course).
3. Laston (AC) Laston (AC) terdiri dari tiga macam campuran, yaitu Laston Lapis Aus (AC-WC), Laston Lapis Antara (AC-BC), dan Laston Lapis Pondasi (AC-Base).

B.3 Lapis Aspal Beton (LASTON)

Hendarsin.L.S, (2000), menyebutkan Aspal Beton (Laston) atau sering disebut *Asphalt Concrete* (AC) digunakan untuk jalan dengan lalu-lintas berat. Laston berfungsi sebagai pendukung beban lalu lintas karena Laston merupakan jenis lapis konstruksi yang mempunyai nilai koefisien kekuatan yang tinggi. Salah satu jenis Laston adalah campuran AC-WC yaitu Lapisan Aus (lapisan yang berhubungan langsung dengan beban kendaraan), kedap air dan tahan terhadap cuaca.

Menurut Silvia Sukirman (2003), terdapat tujuh karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh Beton Aspal adalah Stabilitas, Keawetan, Kelenturan, Ketahanan terhadap Kelelahan, Ketahanan Geser, Kedap Air, dan Kemudahan Pelaksanaan.

B.4 Parameter dan Formula Perhitungan

Menurut Bina Marga (2003), dalam menganalisa campuran aspal panas, parameter dan formula perhitungan mengacu kepada RSNI M-01-2003 sebagai berikut.

1. Kadar Aspal Rencana

Perkiraan awal Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat direncanakan setelah dilakukan pemilihan dan penggabungan pada beberapa

fraksi agregat. Perhitungan kadar aspal rencana dapat menggunakan Persamaan I:

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

$$= \{0,035 \times (100 - \text{No.8})\} + \{0,045 \times (\text{No.8} - \text{No.200})\} + \{0,18 \times \text{No.200}\} + K \quad \text{[I]}$$

dengan:

- Pb = Perkiraan kadar aspal optimum (%)
 No.8 = Nilai persentase agregat lolos saringan no.8 (%)
 No.200 = Nilai persentase agregat lolos saringan no.200 (%)
 K = Konstanta kira-kira 0,5 - 1,0 (%)

2. Berat Jenis *Bulk* dan *Apparent* Total Agregat

Perhitungan berat jenis kering dari total agregat dapat menggunakan Persamaan II:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{sbn}}} \quad \text{[II]}$$

dengan:

- Gsb = Berat jenis kering agregat gabungan
 P1, P2, ..., Pn = Persentase masing-masing agregat (%)
 Gsb1, Gsb2,, Gsbn = Berat jenis kering masing-masing agregat.

Perhitungan berat jenis semu dari total agregat dapat menggunakan Persamaan III:

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_{sa1}} + \frac{P_2}{G_{sa2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{san}}} \quad \text{[III]}$$

dengan:

- Gsa = Berat jenis semu agregat gabungan
 P1, P2, ..., Pn = Persentase masing-masing agregat (%)
 Gsb1, Gsb2,, Gsbn = Berat jenis semu masing-masing agregat

3. Berat Jenis Efektif dari Total Agregat

Perhitungan berat jenis efektif dari total agregat dapat menggunakan Persamaan IV:

$$G_{se} = \left[\frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \right] \quad \text{[IV]}$$

dengan:

- Gse = Berat jenis efektif total agregat
 Gsb = Berat jenis kering agregat gabungan
 Gsa = Berat jenis semu agregat gabungan

4. Perhitungan Berat Jenis Teoritis Maksimum Campuran

Perhitungan berat jenis teoritis maksimum campuran dapat menggunakan Persamaan V:

$$G_{mm} = \left[\frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{sa}} + \frac{P_b}{G_b}} \right] \quad \text{[V]}$$

dengan:

- Gmm = Berat jenis teoritis maksimum campuran
 Pmm = Persentase berat terhadap total campuran (%)
 Ps = Persentase agregat terhadap total campuran (%)
 Gse = Berat jenis efektif total agregat
 Gb = Berat jenis aspal
 Pb = Kadar aspal total, persentase terhadap total campuran (%)

5. Berat Isi Benda Uji

Perhitungan berat isi benda uji dapat menggunakan Persamaan VI:

$$G_{mb} = \left[\frac{A}{B-C} \right] \quad \text{[VI]}$$

dengan:

- Gmb = Berat jenis bulk campuran padat
 A = Berat kering sampel (gr)
 B = Berat sampel jenuh air kering permukaan (gr)
 C = Berat sampel dalam air (gr)

6. Rongga diantara Mineral Agregat (*Void in the Mineral Aggregate*)

Rongga dalam mineral agregat merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan rongga diantara partikel agregat dalam suatu campuran yang sudah dipadatkan yang berfungsi untuk menampung volume efektif aspal kecuali yang diserap agregat. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, nilai batas untuk rongga

dalam mineral agregat (VMA) yaitu minimal 15%.

Penentuan rongga diantara mineral agregat dapat menggunakan Persamaan VII:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad [VII]$$

dengan:

VMA = Rongga diantara Mineral Agregat (%)

G_{mb} = Berat jenis bulk campuran padat

G_{sb} = Berat jenis bulk agregat

P_s = Kadar agregat, persen terhadap berat total (%).

7. Rongga didalam Campuran (*Void In the compacted Mixture*)

Rongga dalam campuran (VIM) merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan jumlah ruang udara yang terkandung dalam campuran yang terdapat diantara partikel agregat yang dinyatakan dalam persen dari volume total. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, nilai batas untuk rongga dalam campuran (VIM) yaitu 3-5%.

Penentuan rongga didalam campuran dapat menggunakan Persamaan VIII:

$$VIM = 100 - \frac{G_{mm} \times G_{mb}}{G_{mm}} \quad [VIII]$$

dengan:

VIM = Rongga didalam campuran, persen dari volume (%)

G_{mb} = Berat jenis bulk campuran padat

G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran

8. Rongga Udara yang Terisi Aspal (*Void Filled with Asphalt*)

Rongga terisi aspal (VFA) merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan persentase rongga yang terisi aspal pada campuran setelah mengalami proses pemadatan. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, nilai batas untuk rongga terisi aspal (VFA) yaitu minimal 65%.

Penentuan udara yang terisi aspal dapat menggunakan Persamaan IX:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VIM}{VMA} \quad [IX]$$

dengan:

VFA = Rongga udara yang terisi aspal (%)

VIM = Rongga udara pada campuran, persen dari volume (%)

VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%).

B.5 Pengujian Campuran Aspal

B.5.1 Pengujian Volumetrik

Pengujian volumetrik adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui besarnya nilai *specific gravity* campuran dan porositas setiap benda uji. Pengujian ini terdiri dari pengukuran tinggi, diameter, berat kering, berat dalam air dan berat jenuh kering permukaan benda uji.

B.5.2 Pengujian Marshall

Menurut RSNI M-01-2003, pengujian *Marshall* adalah pengujian terhadap benda uji untuk menentukan Kadar Aspal Optimum dan karakteristik campuran dengan mengetahui nilai stabilitas, *flow (kelelehan)* dan *Marshall Quotient (MQ)*.

1. Stabilitas

Stabilitas merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan kemampuan suatu campuran untuk dapat menahan suatu deformasi yang diakibatkan oleh suatu beban tanpa menimbulkan perubahan yang tetap seperti gelombang, alur dan *bleeding*. Nilai stabilitas yang tinggi berdampak pada konstruksi perkerasan jalan yang semakin kuat dan getas sehingga dapat memikul beban lalu lintas yang lebih berat, namun rentan mengakibatkan permukaan jalan yang lebih mudah retak.

Nilai stabilitas benda uji diperoleh menggunakan Persamaan X:

$$\text{Stabilitas} = q \times C \times k \quad [X]$$

dengan:

q = Pembacaan pada alat *Marshall* (%)

C = Faktor kalibrasi alat (kg)

k = Angka koreksi benda uji diperoleh dari korelasi nilai isi benda uji (cm³) atau tebal benda uji (mm) berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2003 revisi 3.

2. Kelelahan (*Flow*)

Kelelahan (*Flow*) merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan tingkat kekakuan suatu perkerasan, nilai yang kecil cenderung menghasilkan perkerasan yang kaku dan getas. Hal ini akan mengakibatkan perkerasan akan mudah retak. Sebaliknya nilai *flow* yang tinggi akan membuat perkerasan bersifat plastis, hal ini akan mengakibatkan perkerasan akan mudah berubah bentuk apabila dibebani.

Pengukuran *flow* bersamaan dengan pengukuran nilai stabilitas *Marshall*. Nilai *flow* diperoleh dari hasil pembacaan langsung pada alat *Marshall Test*. Nilai kelelahan menunjukkan besarnya deformasi vertikal yang terjadi pada benda uji mulai saat awal pembebanan hingga benda uji mencapai batas maksimum stabilitas, sehingga benda uji sampai batas runtuh yang dinyatakan dalam satuan mm. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, nilai batas untuk kelelahan yaitu 2-4 mm.

3. Hasil Bagi *Marshall* (*Marshall Quotient*, MQ)

Marshall Quotient (MQ) merupakan salah satu karakteristik *Marshall* yang menunjukkan sifat kekakuan suatu perkerasan, tingkat fleksibilitas campuran yang merupakan kemampuan untuk deformasi akibat beban tanpa mengalami perubahan volume dan keretakan. Nilai MQ terlalu kecil menyebabkan perkerasan cenderung menjadi plastis atau lentur sehingga mudah mengalami perubahan bentuk apabila dibebani. Sebaliknya, jika terlalu besar maka lapisan perkerasan tersebut akan getas dan mudah mengalami keretakan. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, nilai batas untuk *Marshall Quotient* (MQ) yaitu minimal 250 kg/mm.

Nilai MQ diperoleh dari hasil bagi nilai stabilitas dengan nilai *flow* yang dapat dihitung dengan Persamaan XI:

$$MQ = \frac{MS}{MF} \quad [XI]$$

dengan:

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

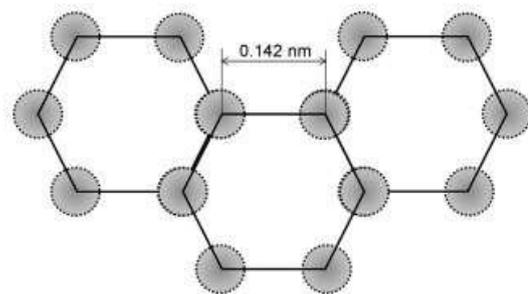
MS = *Marshall Stability* (kg)

MF = *Marshall Flow* (mm)

B.6 *Graphene* sebagai Zat Aditif

Graphene adalah *allotrop carbon* yang terdiri dari satu lapisan yang berikatan pada atom karbon sp^2 . *Allotrop carbon* merupakan senyawa yang terbentuk dari atom unsur karbon dengan struktur yang berbeda. *Graphite*, *Graphene*, *Graphene Oksida*, *Amorf Carbon*, adalah contoh dari *allotrop carbon*.

Graphite dapat diperoleh dari penambangan bahan alam mineral yang banyak digunakan sebagai bahan pada pembuatan pensil. *Graphene*, *Graphene Oksida* merupakan hasil pemecahan lapisan *graphite* menjadi 1 hingga 6 layer yang memiliki sifat lebih unggul dari *graphite*. *Graphene* terdiri dari lapisan monoatomik atom karbon yang disusun dalam bidang dua dimensi sesuai dengan pola sarang lebah, dimana jarak antara atom karbon 0,142 nm seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur dari *Graphene* (Zhen, Z and Zhu, H. 2018)

Graphene memiliki sifat-sifat yang luar biasa. Sifat-sifat tersebut diantaranya adalah mobilitas elektron yang tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, transparansi optik yang baik serta memiliki kekuatan tarik 1 TPa atau 200 kali lebih keras dari baja dan 20 kali lebih keras dari berlian. Satu lembar *graphene* dengan luas 1 m² beratnya hanya 0,77 mg (Casero dkk., 2012).

Penelitian tentang sintesis *graphene* untuk menghasilkan *graphene* satu lapis (*single-layer*) dan beberapa lapis (*few-layer*) dari material dasar karbon diantaranya dengan *Mechanical exfoliation graphene* menggunakan metode *peel-of* dengan *Scotch-tape*, *Chemical Vapor Decomposition* (CVD) lapisan *graphene*, metode *Hummer*, dan sintesis *graphene* dengan metode reduksi

Grafrit Oksida (GO) (Junaidi dan Susanti, 2013).

C. METODOLOGI PENELITIAN

Penentuan proporsi masing-masing agregat yang akan diuji harus memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Gradasi gabungan ditunjukkan dalam persentase terhadap berat agregat. Menurut spesifikasi tersebut, gradasi gabungan untuk campuran aspal harus memenuhi batas-batas gradasi. Penelitian ini menggunakan empat variasi proporsi yang mengacu pada batas-batas gradasi agregat gabungan AC-WC. Standar pengujian yang digunakan menggunakan metode yang telah disahkan oleh Bina Marga dan telah menjadi Standar Nasional Indonesia (SNI).

C.1 Persiapan Bahan

Bahan-bahan yang akan digunakan terdiri dari:

1. Batu pecah (*split*) sebagai agregat kasar, agregat medium dan agregat halus yang berasal dari Sungai Kampar yang diolah oleh PT. Alas Watu Emas menjadi material sirtu (*stone crusher*)
2. Pasir sebagai agregat halus (*fine sand*) merupakan pasir alam diperoleh dari pasir Sungai Taratak Buluh, Kabupaten Kampar
3. Bahan pengisi (*filler*) berupa *Portland Composite Cement* (PCC) berasal dari PT. Semen Padang
4. Aspal sebagai bahan pengikat berupa aspal penetrasi 60/70 dengan merk *Cosmic*
5. *Graphene* sebagai zat aditif akan dibuat di Laboratorium Kimia *Functional and Nanostructured Materials Engineering Research Group* (FN-MER-G) Fakultas Teknik Universitas Riau.

C.2 Prosedur Pengujian Bahan Penyusun

Perlu diperhatikan sebelum pengujian campuran beraspal dilakukan, semua bahan yang akan digunakan harus memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Untuk itu, semua bahan untuk campuran baik itu aspal dan agregat harus diperiksa karakteristiknya terlebih dahulu sesuai standar yang telah ditentukan.

C.3 Pembuatan *Graphene* sebagai Zat Aditif

Graphene sebagai zat aditif akan dibuat dengan metode *Electrochemical and Mechanical Liquid Exfoliation* (EMLE). Metode ini merupakan perpaduan dari metode *Mechanical Exfoliation* (ME) dan *Liquid Exfoliation* (LE). Serpihan *graphite* yang dihasilkan berasal dari proses *Elektrochemical Exfoliation*.

Istilah *Electrochemical and Mechanical Liquid Exfoliation* (EMLE) pada salah satu metode pembuatan *graphene* diartikan bahwa sampel yang dibuat pada fase cair dan dihancurkan atau dihaluskan secara mekanik menggunakan blender (Eswaraiah dkk., 2014). Metode ini sangat menjanjikan untuk produksi *graphene* karena sederhana, biaya rendah, tidak menggunakan bahan kimia beracun, kemudahan dalam produksi skala besar, dan menghasilkan *graphene* dengan kualitas yang baik.

Prinsip dari metode ini adalah terjadinya pengelupasan *graphene* dari *graphite* didalam pelarutnya berupa larutan surfaktan dan dihaluskan secara mekanik menggunakan blender. Surfaktan berfungsi sebagai dispersan dalam air agar tidak mengendap. *Graphite* harus terdispersi dengan baik dalam *Aquades*. Pelemahan pada lembaran-lembaran *graphite* saling mengelupas menjadi *graphene* diakibatkan adanya gaya geser antar lembar *graphene* akibat turbulensi dalam blender.

Metoda ini menggunakan larutan surfaktan jenis FL (*fairy liquid*) 1,25 gr dengan konsentrasi 2,5 mg/ml dalam 500 ml *aquadest* dan diaduk. Untuk proses pengelupasan (*exfoliation*) dilakukan pada serpihan *graphite* berasal dari isi pensil 2B (jenis pensil ini sudah diuji sebelumnya dan menghasilkan kualitas *graphene* yang paling baik dari jenis pensil lainnya), kemudian diayak dan diambil serpihan lolos saringan no. 200 sebanyak 10 gram untuk pembuatan *graphene* konsentrasi 20 mg/ml. Semua campuran dimasukkan ke dalam blender *Kenwood BL370* dengan kecepatan maksimal. Untuk menjaga kondisi proses di dalam blender, maka untuk pengoperasian yaitu 1 menit on dan 1 menit off supaya blender tidak

panas. Jadi butuh waktu selama 2 jam hingga proses pengoperasian blender selesai. Setelah pengelupasan kulit *graphite* selesai, *graphene* EMLE yang dihasilkan kemudian didiamkan, serbuk atau busa-busa *graphite* sisa dibuang. *Graphene* EMLE kemudian dikarakterisasi selama 7 hari dan hasilnya seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pembuatan *Graphene*

C.4 Rancangan Campuran AC-WC

Penentuan campuran atau proporsi masing-masing agregat yang akan digunakan harus memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Pada penelitian ini jenis gradasi Laston yang akan digunakan adalah gradasi AC-WC.

C.4.1 Penentuan Gradasi Agregat

Perencanaan gradasi agregat untuk campuran aspal di laboratorium, dapat dilaksanakan tanpa memblending agregat, yaitu berdasarkan gradasi ideal (batas tengah) spesifikasi gradasi agregat gabungan yang ditentukan. Masing-masing ukuran butir agregat diperoleh dengan mengayak agregat dengan saringan yang ditentukan.

C.4.2 Penentuan Proporsi Agregat

Penelitian ini menggunakan cara analitis (*matriks*) dalam menentukan proporsi agregatnya. Penelitian ini menggunakan beberapa fraksi agregat diantaranya adalah fraksi agregat kasar (CA), agregat medium (MA), agregat halus (FA) dan pasir (FS). Berdasarkan fraksi tersebut diambil nilai yang mewakili masing-masing fraksi yang digabungkan menjadi satu susunan bilangan

matriks dengan nilai hasil adalah bilangan *matriks* nilai antara batas atas dan batas bawah persentase lolos saringan.

C.4.3 Penentuan Kadar Aspal Rencana

Persentase kadar aspal rencana berguna dalam menentukan persentase terhadap berat total campuran. Masing-masing variasi kadar aspal rencana akan mempengaruhi nilai jumlah material saringan berdasarkan proporsi campuran yang direncanakan. Kadar aspal rencana dapat ditentukan dengan mengetahui perkiraan awal kadar aspal optimum (Pb) menggunakan Persamaan (I).

Data-data proporsi agregat gradasi gabungan yang dipakai pada perhitungan nilai Pb yaitu:

1. Nilai persentase lolos saringan no.8 sebesar 34,06%
2. Nilai persentase lolos saringan no. 200 sebesar 7,32%.

Berdasarkan data diatas, diperoleh nilai Pb sebesar 5,829% \approx 6%. Maka, kadar aspal rencana yang akan digunakan adalah 6% \pm 1% (5%-7%) yang artinya variasi kadar aspal rencana mulai dari 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%.

C.4.4 Penentuan Persentase Material terhadap Berat Total Campuran

Persentase proporsi agregat dihitung berdasarkan berat total agregat karena dalam campuran terdapat kandungan aspal, maka perlu dihitung persentasi material terhadap berat total campuran. Untuk membuat sebuah sampel umumnya diperlukan 1200 gram agregat yang proporsinya sesuai dengan ukuran butir agregat. Persentase terhadap berat total campuran akan berubah sesuai dengan variasi persentase kadar aspal rencana.

C.4.5 Perhitungan Jumlah Material yang Dibutuhkan

Setelah proporsi agregat ditentukan, barulah dibuat jumlah material masing-masing saringan berdasarkan kadar aspal rencana 5%-7% (5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%) berdasarkan proporsi campuran yang direncanakan yang telah memenuhi spesifikasi.

C.5 Pembuatan Benda Uji *Marshall* untuk Mencari Nilai KAO

C.5.1 Persiapan Aspal dan *Graphene*

Persiapan yang dilakukan terhadap aspal yaitu dengan memanaskan pada suhu di bawah titik nyalanya hingga aspal mencair.

Pada pengujian ini, untuk memudahkan dalam metode pelaksanaan dalam pembuatan benda uji *Marshall*, disediakan 4 kaleng untuk pencampuran beberapa variasi aspal dan *graphene* dengan berat yang sudah ditetapkan.

Masing-masing variasi campuran aspal untuk pembuatan benda uji *Marshall* terdiri dari beberapa variasi seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis Variasi Campuran Aspal untuk Pembuatan Benda Uji *Marshall* berdasarkan Persentase Penambahan *Graphene*

No.	Jenis Variasi	Persentase Penambahan <i>Graphene</i>
1.	Variasi 1	0 % (tanpa penambahan <i>graphene</i>) sebagai pembanding
2.	Variasi 2	0,5%
3.	Variasi 3	1%
4.	Variasi 4	1,5%

C.5.2 Jumlah Sampel Benda Uji

Berdasarkan variasi kadar aspal, variasi *graphene*, dan jumlah benda uji setiap variasinya sebanyak 3 buah, maka jumlah benda uji yang dibutuhkan sebanyak 60 buah benda uji dalam menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) berdasarkan nilai karakteristik *Marshall* dengan uraian seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Jumlah Benda Uji Berdasarkan Variasi Kadar Aspal dan Penambahan *Graphene*

Kadar Aspal (%)	Variasi Penambahan <i>Graphene</i> (%)				Jumlah Sampel (buah)
	0	0,5	1	1,5	
5	3	3	3	3	12
5,5	3	3	3	3	12
6	3	3	3	3	12
6,5	3	3	3	3	12
7	3	3	3	3	12
Total					60

C.5 Pengujian Volumetrik, Stabilitas Alat dan Kelelahan (*Flow*)

Langkah pengujian volumetrik, stabilitas alat dan kelelahan (*flow*) berdasarkan RSNI M-01-2003 yang merupakan rujukan dari spesifikasi umum Bina Marga. Parameter dan formula perhitungan sebelumnya pada bagian Tinjauan Pustaka.

C.6 Perhitungan dan Analisa Hasil Pengujian

Perhitungan dan analisa hasil pengujian untuk nilai karakteristik *Marshall* dan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan pada masing-masing variasi. Langkah perhitungan dan analisa hasil pengujian benda uji *Marshall* berdasarkan RSNI M-01-2003 yang merupakan rujukan dari spesifikasi umum Bina Marga dengan menganalisa lima karakteristik *Marshall* dengan menjabarkan grafik stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA dan MQ. Setiap nilai karakteristik *Marshall* diuraikan dalam grafik yang dibatasi oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, lalu dipindahkan ke dalam tabel kinerja *Marshall*. Kadar Aspal Optimum diperoleh dari nilai yang memenuhi semua kriteria *Marshall* tersebut.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Analisis dan Hasil Pengujian Bahan Penyusun

Pengujian bahan penyusun bertujuan untuk mengetahui kelayakan dari sifat dan karakteristik campuran Laston dalam memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2010 revisi 3.

D.1.1 Hasil Pengujian Sifat dan Karakteristik Aspal dengan Penambahan *Graphene* sebagai Zat Aditif

Untuk pengujian sifat dan karakteristiknya aspal ditambahkan *graphene*, pada penelitian ini dibatasi dengan melakukan pengujian penetrasi aspal dan daktilitas aspal. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

Berdasarkan hasil pengujian sifat dan karakteristik aspal yang telah dilakukan tanpa campuran *graphene* dinyatakan bahwa aspal

memenuhi syarat dari Spesifikasi Umum Bina Marga dan layak digunakan dalam campuran beraspal. Namun pada pengujian aspal dengan campuran *graphene* khususnya untuk pengujian penetrasi aspal dan daktilitas, hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa:

1. Pengujian penetrasi dengan penambahan 0,5%, 1% *graphene* masih memenuhi spesifikasi, akan tetapi dengan penambahan 1,5% *graphene* tidak memenuhi spesifikasi dengan jenis aspal penetrasi 60/70. Semakin besar persentase *graphene* yang ditambahkan kedalam aspal, nilai penetrasi semakin menurun yang akan mempengaruhi tingkat

kekerasan aspal sehingga fungsi aspal dengan penetrasi yang direncanakan sebelumnya berdasarkan volume lalu lintas dan keadaan daerah atau cuaca, dengan adanya penambahan *graphene* akan berubah.

2. Pengujian daktilitas dengan penambahan 0,5%, 1%, 1,5% masih memenuhi spesifikasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar persentase *graphene* yang ditambahkan kedalam aspal, nilai daktilitas semakin menurun, namun masih memenuhi spesifikasi. Ini membuktikan bahwa *graphene* mempengaruhi sifat kekenyalan atau keplastisan aspal.

Tabel 3. Hasil Pengujian Aspal

Jenis Pengujian	Satuan	Hasil Uji	Standar Uji	Spesifikasi	
				Min	Maks
Penetrasi, 25 °C, 100 gram, 5 detik					
Tanpa Campuran <i>Graphene</i>		62,20	SNI-06-2456-1991	60	79
Tambahan 0,5 % <i>Graphene</i>	Dmm	61,90			
Tambahan 1% <i>Graphene</i>		61,00			
Tambahan 1,5 % <i>Graphene</i>		59,20			
Titik Lembek (<i>Softening Point</i>)	°C	55,85	SNI 2434:2011	48	
Titik Nyala dengan <i>Cleveland Open Cup</i>	°C	235	SNI 2433:2011	232	
Daktilitas, 25 °C, 5 cm/menit					
Tanpa Campuran <i>Graphene</i>	cm	147,5	SNI 2432:2011	100	
Tambahan 0,5 % <i>Graphene</i>		145,5			
Tambahan 1% <i>Graphene</i>		140,5			
Tambahan 1,5% <i>Graphene</i>	cm	137,5	SNI 2432:2011	100	
Berat Jenis		1,032	SNI 2441:2011	1,0	
Kehilangan Berat (TFOT)	%	0,000	SNI-06-2441-1991	0,8	
Viskositas					
Suhu Pematatan Ideal (Viscositas = 280 cSt)	°C	141,5			
Suhu Pematatan Min 250°C	°C	149	AASHTO T 72-90	135	155
Suhu Pematatan Mak 310°C	°C	145			
Suhu Pencampuran Ideal (Viscositas = 170 cSt)	°C	149,5		149	160
Suhu Pencampuran Min 150°C	°C	156	AASHTO T 54-61		
Suhu Pencampuran Mak 190°C	°C	153			

Tabel 4. Hasil Pengujian Agregat Kasar

Pengujian	Satuan	Hasil Uji	Standar Uji	Spesifikasi	
				Min	Maks
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan <i>natrium sulfat</i>	%	7,317	SNI 3407:2008		12
Kearifan agregat dengan mesin <i>Los Angeles</i>	%	31,120	SNI 2417:2008		40
Kelekatan agregat terhadap aspal	%	97,175	SNI 2439:2011	95	
Butir pecah pada agregat kasar	%	92,972	SNI 7619:2012		95/90
Partikel pipih dan lonjong	%	7,325	ASTM D4791		10
Kekuatan agregat terhadap tumbukan (AIV)	%	7,221	BS 812 : Part 3:1975		30
Berat jenis agregat kasar					
a. Berat jenis <i>Bulk</i>		2,554			
b. Berat jenis SSD		2,589		2,5	
c. Berat jenis		2,646			
d. Penyerapan (%)	%	1,370			3
Berat jenis agregat sedang			SNI 03-1969-1990		
a. Berat jenis <i>Bulk</i>		2,632			
b. Berat jenis SSD		2,667		2,5	
c. Berat jenis		2,727			
d. Penyerapan (%)	%	1,328			3

Tabel 5. Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian	Satuan	Hasil Uji	Standar Uji	Spesifikasi	
				Min	Maks
Gumpalan lempung dan butir - butir mudah pecah dalam agregat	%	0,131	SNI 03-4141-1996		1
Angularitas dengan uji kadar rongga	%	45,014	SNI 03-6877-2002	45	
Nilai setara pasir (<i>sand equivalent</i>)	%	80,242	SNI 03-4428-1997	60	
Berat jenis agregat halus					
a. Berat jenis <i>Bulk</i>		2,608			
b. Berat jenis SSD		2,620		2,5	
c. Berat jenis		2,640			
d. Penyerapan (%)		0,462			3
Berat jenis pasir (<i>fine sand</i>)			SNI 03-1970-1990		
a. Berat jenis <i>Bulk</i>		2,638			
b. Berat jenis SSD		2,660		2,5	
c. Berat jenis		2,696			
d. Penyerapan (%)		0,806			3

D.1.2 Hasil Pengujian Sifat dan Karakteristik Agregat

Agregat yang diuji dalam penelitian ini adalah agregat kasar lolos saringan 1” sampai tertahan saringan no. 4 dan agregat halus terdiri dari agregat yang lolos saringan no. 4.

Hasil pengujian sifat dan karakteristik agregat dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Berdasarkan hasil pengujian sifat dan karakteristik agregat yang telah dilakukan, dinyatakan bahwa agregat memenuhi syarat

dari Spesifikasi Umum Bina Marga dan layak digunakan dalam campuran beraspal.

D.2 Hasil Rancangan Campuran Pengujian Karakteristik AC-WC

Karakteristik campuran aspal beton dapat diketahui dengan menganalisa nilai berat isi, VIM, VMA, VFA, stabilitas, *flow* dan MQ. Untuk dapat menentukan nilai-nilai tersebut diperlukan data hasil pengujian volumetrik benda uji *Marshall*, pengujian

analisa saringan, berat jenis agregat dan berat jenis aspal.

D.2.1 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada Campuran AC-WC Berdasarkan Nilai Karakteristik Marshall

Hasil perhitungan pengujian karakteristik Marshall masing-masing dilakukan pada tiap variasi campuran AC-WC berdasarkan nilai karakteristik Marshall. Contoh perhitungan awal pada Variasi 1. Semua nilai karakteristik Marshall yang dibutuhkan dalam menentukan KAO dapat dilihat pada Tabel 7.

Grafik perbandingan masing-masing karakteristik Marshall terhadap kadar aspal berdasarkan hasil perhitungan pengujian karakteristik Marshall pada Variasi 1 tiap benda uji yang berguna dalam penentuan KAO. Hal yang sama dilakukan pada Variasi 2, Variasi 3, dan Variasi 4, sehingga nilai KAO masing-masing variasi yang didapatkan seperti yang terlihat pada Tabel 8.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Karakteristik Marshall Variasi 1 Aspal Ditambahkan 0% Graphene

% Aspal terhadap Campuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	MQ (kg/mm)
1	990,0	3,10	13,360	22,613	40,9	319,35
5	1316,1	3,50	12,755	22,072	42,2	376,03
3	1482,6	3,35	12,822	22,132	42,1	442,55
1	1083,2	3,60	8,671	19,439	55,4	300,88
5,5	1157,1	4,30	10,023	20,631	51,4	269,10
3	1095,8	3,70	9,873	20,499	51,8	296,15
1	1042,8	3,80	3,125	15,606	80,0	274,42
6	1327,2	3,20	3,556	15,982	77,7	414,75
3	988,6	4,20	4,040	16,403	75,4	235,39
1	1449,1	3,80	3,170	16,690	81,0	381,34
6,5	1367,8	4,10	4,324	17,683	75,5	333,62
3	915,5	4,80	2,287	15,930	85,6	190,73
1	866,8	4,40	3,928	18,364	78,6	196,99
7	1196,1	4,70	4,309	18,687	76,9	254,49
3	1151,2	4,00	2,943	17,527	83,2	287,79

Tabel 8. Nilai KAO Masing-Masing Variasi

No.	Jenis Variasi	Persentase Penambahan Graphene	KAO (%)
1.	Variasi 1	0 % (tanpa penambahan graphene) sebagai pembanding	6,10%
2.	Variasi 2	0,5%	6,29%
3.	Variasi 3	1%	6,09%
4.	Variasi 4	1,5%	6%

D.2.2 Penentuan Nilai Karakteristik Marshall pada Campuran AC-WC pada Kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO).

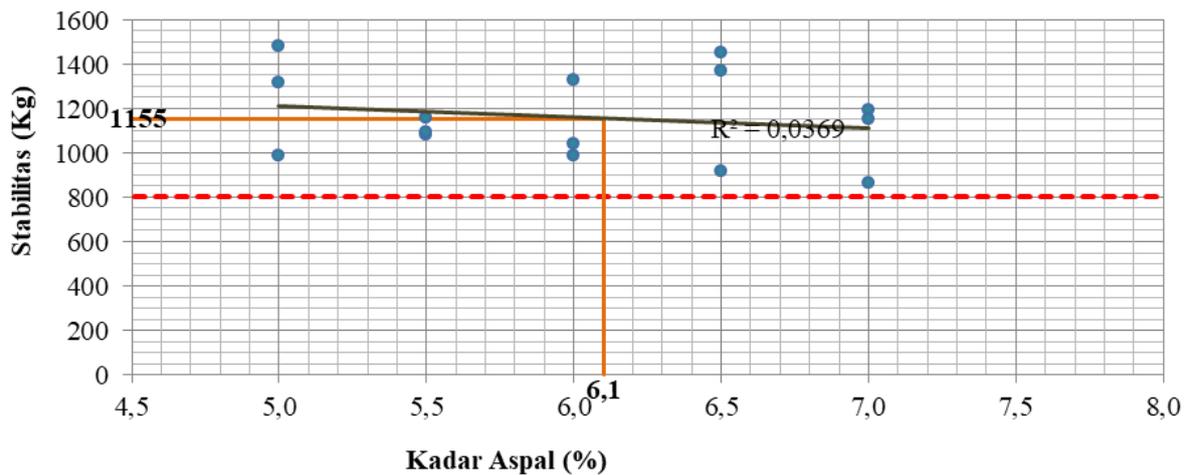
Penentuan nilai karakteristik Marshall pada campuran AC-WC semua variasi dengan penambahan graphene pada kondisi nilai KAO sudah diketahui sebelumnya dengan nilai masing-masing variasi. Penentuan nilai-nilai karakteristik Marshall kondisi KAO pada penelitian ini masing-masing variasi dilakukan dengan memproyeksikan nilai KAO pada tiap-tiap grafik perbandingan nilai karakteristik Marshall stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan MQ terhadap kadar aspal 5%-7% yang sebelumnya yang sudah dibuat dari data perhitungan benda uji Marshall.

Contoh penentuan salah satu nilai karakteristik Marshall pada kondisi KAO khususnya untuk Variasi 1 dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil dari grafik pada Gambar 3 menunjukkan bahwa pada kondisi KAO bernilai 6,1%, nilai stabilitas diperoleh sebesar 1155 kg dan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai batas sebesar 800 kg.

Hal yang sama dilakukan pada nilai karakteristik Marshall lainnya flow, VIM, VMA, VFA, dan MQ terhadap kadar aspal 5%-7% pada kondisi KAO masing-masing variasi, sehingga nilai masing-masing karakteristik Marshall yang dibatasi dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 akan terlihat seperti pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Nilai Tiap-Tiap Karakteristik Marshall Semua Variasi pada Kondisi KAO

Karakteristik Marshall	Spesifikasi	Masing-Masing Variasi Penambahan Graphene pada Kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO)			
		Variasi 1 Graphene 0% KAO:6,1%	Variasi 2 Graphene 0,5% KAO:6,29%	Variasi 3 Graphene 1% KAO:6,09%	Variasi 4 Graphene 1,5% KAO:6%
Stabilitas (Kg)	> 800	1155	1245	1407	1485
Flow (mm)	2 - 4	3,9	4,02	4,02	4,25
VIM (%)	3 - 5	5,08	5,2	5,5	6
VMA (%)	Minimal 15	18,3	18,8	18,3	18,3
VFA (%)	Minimal 65	66	67	66	65
MQ (kg/mm)	Minimal 250	298	310	347	345

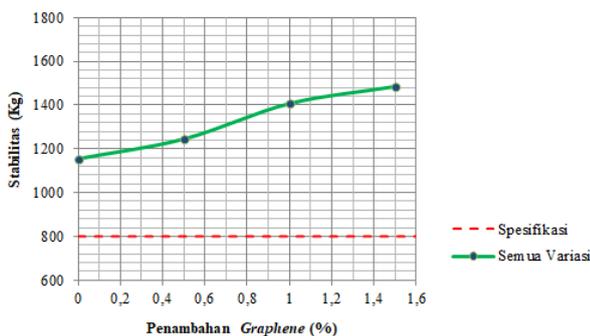


Gambar 3. Grafik Penentuan Nilai Stabilitas pada Kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO)

D.2.3 Analisis Nilai Tiap-Tiap Karakteristik Marshall Semua Variasi terhadap Penambahan Graphene pada Campuran AC-WC pada Kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berikut ini merupakan analisa nilai masing-masing karakteristik Marshall semua variasi terhadap penambahan graphene pada campuran AC-WC pada kondisi KAO ditampilkan dalam bentuk grafik, dapat dilihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 9 mulai dari stabilitas, kelelahan (*flow*), rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA), rongga terisi aspal (VFA), dan Marshall Quotient (MQ).

1. Stabilitas



Gambar 4. Hubungan antara Stabilitas dan Penambahan Graphene

Hasil pembacaan grafik pada Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai stabilitas semua variasi pada kondisi KAO terhadap penambahan graphene secara keseluruhan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga

2010 revisi 3 dengan nilai batas sebesar 800 kg. Semakin besar penambahan graphene yang ditambahkan pada campuran aspal, maka nilai stabilitas semakin meningkat. Perubahan nilai stabilitas terbesar terjadi pada variasi 4 dengan penambahan 1,5% graphene yaitu 28,57 % terhadap nilai stabilitas Variasi 1 dengan penambahan 0% graphene (tanpa campuran) dapat dilihat pada Tabel 10. Terjadinya peningkatan nilai stabilitas akan berdampak kepada kemampuan perkerasan atau campuran dalam menerima beban.

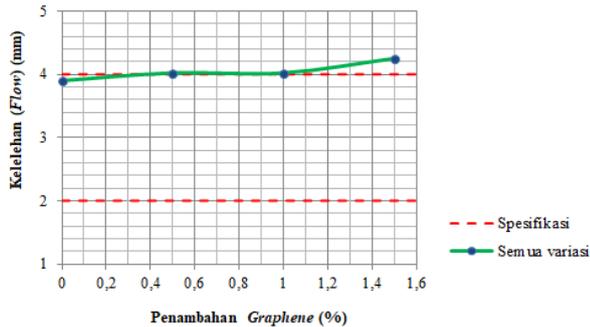
Tabel 10. Perbandingan Nilai Stabilitas terhadap Penambahan Graphene pada Kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO)

Variasi Graphene	Varasi 1 (0%)	Variasi 2 (0,5%)	Variasi 3 (1%)	Variasi 4 (1,5%)
Nilai Stabilitas (kg)	1155	1245	1407	1485
Perubahan Nilai Stabilitas terhadap Variasi 1 0% Graphene (kg)	-	90	252	330
Perubahan Nilai Stabilitas terhadap Variasi 1 0% Graphene (%)	-	7,79%	21,82%	28,57%

2. Kelelahan (*Flow*)

Hasil pembacaan grafik pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai kelelahan (*flow*) semua variasi pada kondisi kadar aspal optimum (KAO) terhadap penambahan graphene secara keseluruhan tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai batas antara 2-4 mm. Semakin besar penambahan graphene yang ditambahkan pada campuran aspal, maka nilai kelelahan (*flow*) cenderung meningkat. Peningkatan terjadi tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan sifat graphene yang

mempengaruhi keplastisan campuran aspal pada variasi benda uji.

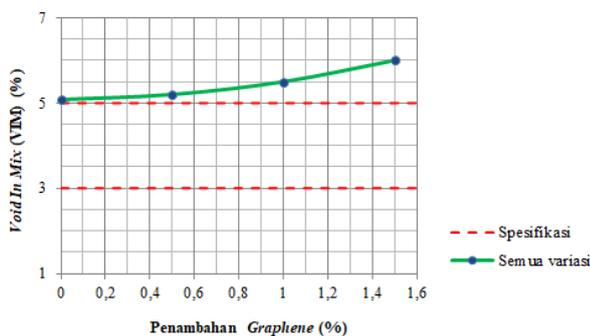


Gambar 5. Hubungan antara Kelelahan (*Flow*) dan Penambahan *Graphene*

3. Rongga dalam Campuran, VIM (*Void in Mix*)

Hasil pembacaan grafik pada Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai rongga dalam campuran (VIM) semua variasi pada kondisi kadar aspal optimum (KAO) terhadap penambahan *graphene* secara keseluruhan tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai batas antara 3%-5%. Nilai ini sebenarnya sangat dipengaruhi oleh besarnya kadar aspal didalam campuran.

Penambahan maksimal *graphene* pada campuran pembuatan benda uji tiap variasi pada penelitian ini sebesar 1,5% dari persentase berat aspal yang menunjukkan kecilnya rongga yang dibutuhkan *graphene* didalam campuran sehingga tidak terlalu mempengaruhi nilai VIM.

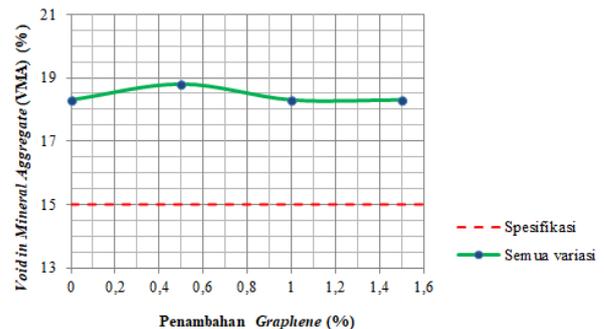


Gambar 6. Hubungan antara Rongga dalam Campuran (VIM) dan Penambahan *Graphene*

4. Rongga dalam Mineral Agregat, VMA (*Void in Mineral Aggregate*)

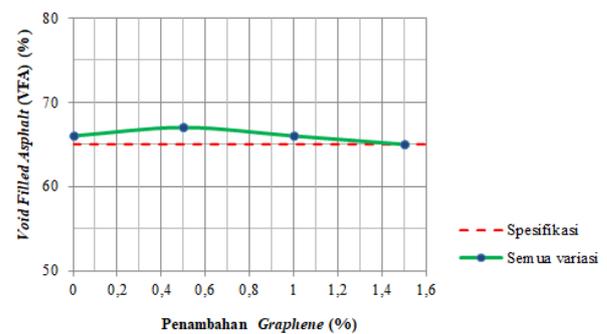
Hasil pembacaan grafik pada Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai rongga dalam mineral agregat (VMA) semua variasi pada

kondisi kadar aspal optimum (KAO) terhadap penambahan *graphene* secara keseluruhan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai minimal 15%. Penambahan maksimal *graphene* pada campuran pembuatan benda uji pada penelitian ini sebesar 1,5% dari persentase berat aspal yang menunjukkan kecilnya rongga yang dibutuhkan *graphene* didalam campuran sehingga tidak terlalu mempengaruhi nilai VMA.



Gambar 7. Hubungan antara Rongga dalam Mineral Agregat (VMA) dan Penambahan *Graphene*

5. Rongga Terisi Aspal, VFA (*Void Filled with Asphalt*)

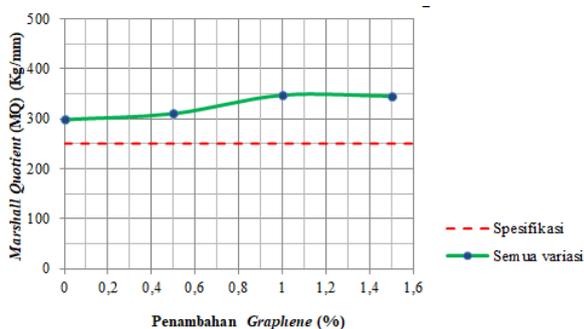


Gambar 8. Hubungan antara Rongga Terisi Aspal (VFA) dan Penambahan *Graphene*

Hasil pembacaan grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai rongga terisi aspal (VFA) semua variasi pada kondisi KAO terhadap penambahan *graphene* secara keseluruhan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai minimal 65%. Penambahan maksimal *graphene* pada campuran pembuatan benda uji pada penelitian ini sebesar 1,5% dari persentase berat aspal yang menunjukkan kecilnya rongga yang dibutuhkan *graphene*

didalam campuran sehingga tidak terlalu mempengaruhi nilai VFA.

6. Marshall Quotient (MQ)



Gambar 9. Hubungan antara Marshall Quotient (MQ) dan Penambahan Graphene

Hasil pembacaan grafik pada Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai Marshall Quotient (MQ) semua variasi pada kondisi kadar aspal optimum (KAO) terhadap penambahan graphene secara keseluruhan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai minimal 250 kg/mm. Nilai MQ menunjukkan sifat kekakuan suatu perkerasan, tingkat fleksibilitas campuran yang merupakan kemampuan untuk deformasi akibat beban tanpa mengalami perubahan volume dan keretakan. Nilai MQ adalah hasil bagi antara nilai stabilitas dan nilai kelelahan (*flow*), sehingga pengaruh graphene terhadap nilai stabilitas yang cenderung besar akan mempengaruhi nilai MQ.

Setelah dilakukan analisis nilai tiap-tiap karakteristik Marshall semua variasi terhadap penambahan graphene pada campuran AC-WC pada kondisi KAO, maka dapat diketahui dan ditentukan masing-masing nilai karakteristik Marshall. Nilai tersebut memiliki batasan masing-masing menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Nilai dikatakan paling baik jika nilai yang diperoleh memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dan mempunyai besaran yang paling besar atau tinggi dari nilai yang lainnya pada masing-masing karakteristik Marshall.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh penggunaan aspal ditambah graphene sebagai zat aditif pada campuran AC-WC berdasarkan nilai karakteristik Marshall dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penambahan graphene sebagai zat aditif pada campuran AC-WC mempengaruhi nilai karakteristik Marshall.
 - a. Penambahan 0% (tanpa campuran) graphene sebagai pembanding dengan KAO 6,1% diperoleh nilai stabilitas 1155 kg, *flow* sebesar 3,9 mm, VIM sebesar 5,08%, VMA sebesar 18,3%, VFA sebesar 66%, dan MQ sebesar 298 kg/mm
 - b. Penambahan 0,5% graphene dengan KAO 6,29% diperoleh nilai stabilitas sebesar 1245 kg dengan peningkatan 7,79%, *flow* sebesar 4,02 mm, VIM sebesar 5,2%, VMA sebesar 18,8%, VFA sebesar 67%, dan MQ sebesar 310 kg/mm
 - c. Penambahan 1% graphene dengan KAO 6,09% diperoleh nilai stabilitas sebesar 1407 kg dengan peningkatan 21,82%, *flow* sebesar 4,02 mm, VIM sebesar 5,5%, VMA sebesar 18,3%, VFA sebesar 66 %, dan MQ sebesar 347 kg/mm
 - d. Penambahan 1,5% graphene dengan KAO 6% diperoleh nilai stabilitas sebesar 1485 kg dengan peningkatan 28,57%, *flow* sebesar 4,25 mm, VIM sebesar 6%, VMA sebesar 18,3%, VFA sebesar 65%, dan MQ sebesar 345 kg/mm.
2. Berdasarkan nilai karakteristik Marshall paling baik yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, variasi dengan penambahan 1,5% graphene direkomendasikan pada campuran AC-WC.

E.2 SARAN

Hasil penelitian ini perlu dikembangkan lebih lanjut sehingga ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu.

1. Adanya penelitian lebih lanjut dengan melakukan pengujian dan pembuatan benda uji setelah didapatkan KAO masing-

masing variasi, sehingga dapat diketahui dan dibandingkan nilai tiap-tiap karakteristik *Marshall* semua variasi yang nantinya dapat diketahui variasi yang paling baik untuk penambahan *graphene*.

2. Tingkat ketelitian diperlukan dalam melakukan penelitian ini dengan peralatan yang bisa menunjang untuk kelancaran penelitian.
3. Adanya penelitian lebih lanjut dengan campuran perkerasan dan variasi penambahan *graphene* yang berbeda, sehingga campuran perkerasan aspal menggunakan *graphene* sebagai zat aditif yang diuji sebelumnya pada skala laboratorium dapat dikembangkan dan diperkenalkan pada skala besar serta direalisasikan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). *Testing Viscosity*. Washington DC: AASHTO; T 72-90 / T 54-61.
- ASTM (American Standard Testing and Material). *Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles In Coarse Aggregate*. United State; D 4791.
- Aravind, S, dkk. (2018). *Construction Of Porous Asphalt Pavement Using Graphene*. Jurnal Teknik Sipil. Vol. 04. ISSN:2455-1457.
- Bina Marga. (1991). *SNI-06-2456. Metode Pengujian Penetrasi Baha-Bahan Bitumen*. Jakarta : Pustran Balitbang Pekerjaan Umum.
- Bina Marga. (2003). *RSNI-M-01. Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat Marshall*. Jakarta : Pustran Balitbang Pekerjaan Umum.
- Bina Marga. (2005). *Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan Pd. T-05-2005-B*. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga.
- Bina Marga. (2010). *Seksi 6.3 Spesifikasi Campuran Beraspal Panas pada Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Edisi 2010*. Jakarta : Direktorat Jendral Bina Marga.
- BSI (British Standards Institution). (1975). *Testing Aggregates (BS 812-3)*. London : W1A 2BS.
- Casero, E., Parra-Alfambra, A. M., Petit-Dominguez, M. D., Pariente, F., Lorenzo, E., dan Alonso, C. (2012). *Differentiation Between Graphene Oxide and Reduced Graphene by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*. *Electrochemistry Communications*. Elsevier, pp. 63–66. DOI: 10.1016/j.elecom.2012.04.002.
- Eswaraiah, V., K. Paton, C. Backes, A. Harvey, R. Smith, J. McCauley dan J.Coleman. (2014). *Turbulence-assisted shear exfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender*. *Nanoscale*. DOI :10.1039/C4NR03560G.
- Hendarsin, Shirley L. (2000). *Perencanaan Teknik Jalan Raya*. Bandung : Politeknik Negeri Bandung.
- Junaidi, M dan Susanti, D. (2013). *Pengaruh Variasi Waktu Ultrasonikasi dan Waktu Tahan Hydrothermal terhadap Struktur dan Konduktivitas Listrik Material Graphene*. Jurnal Teknik Pomits, 2(1), pp. 2337–3539.
- Ranjbar, N, Mehdi, M, M. Mehrali, U.J Alengaram and M. Zamin jumaat. (2015). *Grafena Nanoplatelet-fly ash Based Geopolimer Composites*. *Cement and Concrete Research*. 76 (2015) 222–231.
- Standar Nasional Indonesia. (1990). *SNI 03-1969. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (1990). *SNI 03-1970. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (1996). *SNI 03-4141. Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah Dalam Agregat*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (1997). *SNI 03-4428. Metode Pengujian Agregat Halus atau Pasir yang Mengandung Bahan*

- Plastis dengan Cara Setara Pasir*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2002). SNI 03-6877. *Metode Pengujian Kadar Rongga Agregat Halus yang Tidak Dipadatkan*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2005). *RSNI T 01. Cara Uji Butiran Agregat Berbentuk Pipih, Lonjong, atau Pipih dan Lonjong*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2008). SNI-2417. *Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2008). SNI-3407. *Cara Uji Sifat Kekekalan Agregat dengan Cara Perendaman Menggunakan Larutan Natrium Sulfat Atau Magnesium Sulfat*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2432. *Cara Uji Daktilitas Aspal*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2433. *Cara Uji Kehilangan Berat Aspal*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2433. *Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal dengan Alat Cleveland Open Cup*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2434. *Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2439. *Cara Uji Penyelimutan dan Pengelupasan Pada Campuran Agragat Aspal*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). SNI-2441. *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2012). SNI-7619. *Metode Uji Penentuan Persentase Butir Pecah Pada Agregat Kasar*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Sukirman, Silvia. (2003). *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta : Edisi ke-1, Penerbit Yayasan Obor Indonesia.
- Zhen, Z. and Zhu, H. (2018). *Structure and Properties of Graphene, in Graphene*. doi:10.1016/B978-0-12-812651-6.00001-X.