

EKSPERIMENTAL PENAMBAHAN GRAPHENE SEBAGAI ZAT ADITIF PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE BINDER COURSE (AC-BC)

Ali Novia¹⁾, 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 : ali.novia6895@student.unri.ac.id

ABSTRACT

The type of pavement commonly used in Indonesia is flexible pavement that uses asphalt as its binding material. It is very important to maintain the characteristic of asphalt that functions as the aggregate adhesive in a mixture of asphalt concrete (laston). One way of maintaining or improving the characteristics of the laston is by using graphene as an additive. This study was aimed to examine and analyze the effect of adding graphene as an additive and to find out the most effective level of graphene addition in the asphalt mixture to the Marshall characteristics of the AC-BC laston mixture. This study combined the addition of graphene as an additive of 3.5%, 4%, and 4.5% of the weight of asphalt. The test results showed that the stability value of Marshall characteristics at optimum bitumen content conditions is increased. The highest stability value is found in the addition of 4.5% of graphene which is 1500 kg. The most effective level of graphene addition in the asphalt mixture against Marshall characteristics is by adding 4.5% graphene. The addition of 4.5% of graphene has the highest stability value with a difference of 200 kg or 14.81%, while the value of flow is 4,5 mm, VIM is 3.7%, VFA is 76%, VMA is 14,8%, and MQ is 350 kg/mm, all these values fulfill Bina Marga specifications 2010 revision 3, except the flow values.

Keywords: Graphene, Marshall characteristics, AC-BC, Laston

A. PENDAHULUAN

Jenis perkerasan yang umum digunakan di Indonesia adalah perkerasan lentur yang memakai aspal sebagai bahan pengikatnya. Aspal yang berfungsi sebagai perekat agregat dalam campuran aspal beton sangat penting dipertahankan karakteristiknya. Salah satu lapis aspal beton (laston) yaitu AC-BC (*Asphalt Concrete Binder Course*). Lapisan ini merupakan bagian dari lapis permukaan diantara lapis pondasi atas (*base course*) dengan lapis aus (*wearing course*) yang bergradasi agregat gabungan rapat/menerus. Untuk mempertahankan atau meningkatkan karakteristik aspal beton (laston) tersebut salah satunya bisa dengan menggunakan bahan tambah/aditif. *Graphene* digunakan sebagai bahan tambah/aditif pada aspal dalam pengujian campuran AC-BC

Graphene merupakan alotrop karbon yang terdiri dari satu lapisan yang berikatan

pada atom karbon. *Graphene* digunakan sebagai penguatan material komposit karena sifat mekanis, termal, dan elektrikalnya yang mengesankan. Karakteristik *graphene* yang luar biasa ini membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi teknis, seperti elektronik frekuensi tinggi, sel surya, sensor, dan bahan komposit fleksibel. Selain itu, *graphene* juga bisa digunakan sebagai aditif.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh S Aravind, A Joshi Isac, dan S Aparajith (2018), *Construction of Porous Asphalt Pavement Using Graphene*. Aspal yang digunakan yaitu PEN 80/100 dan penambahan *graphene* dalam berbagai proporsi, yaitu 0,05%, 0,1%, 0,15% dari berat aspal. Hasil penelitian menunjukkan penambahan persentase *graphene* terhadap perkerasan aspal berpori adalah mempengaruhi nilai parameter *marshall*, terutama nilai stabilitas.

Penambahan *graphene* telah meningkatkan kekuatan sekitar 14,71% dari aspal berpori bitumen normal. Secara umum penambahan *graphene* pada perkerasan aspal berpori meningkatkan kinerjanya.

Oleh karena penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan penambahan persentase *graphene* didapatkan nilai stabilitasnya terus meningkat, maka penulis melakukan serangkaian penelitian di laboratorium untuk melihat pengaruh penambahan *graphene* sebagai zat aditif sebesar 3,5%, 4%, dan 4,5% dari berat aspal pada suatu campuran beraspal berdasarkan nilai parameter *marshall* terutama pada nilai stabilitas, dan nilai *flow*, serta menentukan persentase penambahan *graphene* yang lebih baik dengan melihat perbandingan nilai stabilitas dan *flow*.

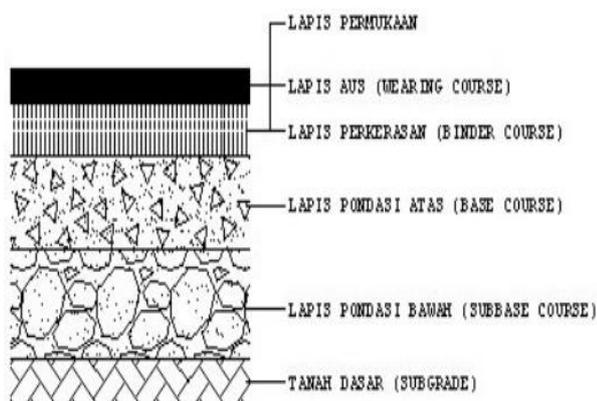
B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Konstruksi Perkerasan Jalan

Sukirman, Silvia (1999), menyatakan konstruksi perkerasan jalan berkembang pesat pada zaman keemasan Romawi. Pada saat itu telah mulai dibangun jalan-jalan yang terdiri dari beberapa lapisan perkerasan. Perkerasan jalan merupakan lapisan perkerasan yang terletak diantara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan yang berfungsi memberikan pelayanan pada sarana transportasi. Jenis lapisan perkerasan yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

1. Perkerasan lentur (*flexible pavement*)
2. Perkerasan kaku (*rigid pavement*)
3. Perkerasan komposit (*composite pavement*)

Secara umum, perkerasan jalan terdiri dari beberapa lapis seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Susunan Pekerjaan Lapisan Perkerasan Lentur

Menurut Sukirman, Silvia (1999) jenis lapisan permukaan yang umum digunakan di Indonesia adalah sebagai berikut:

1. Lapisan bersifat nonstruktural, berfungsi sebagai lapisan aus dan kedap air antara lain:
 - a. Burtu (laburan aspal satu lapis),
 - b. Burda (laburan aspal dua lapis),
 - c. Latasir (lapis tipis aspal pasir),
 - d. Buras (laburan aspal),
 - e. Latasbum (lapis tipis asbuton murni),
 - f. Lataston (lapis tipis aspal beton),
2. Lapisan bersifat struktural, berfungsi sebagai lapisan yang menahan dan menyebarkan beban roda.
 - a. Lapis penetrasi macadam (lapen),
 - b. Lasbutag,
 - c. Laston (lapisan aspal beton), Laston terdiri dari tiga jenis campuran yaitu AC-WC (*asphalt concrete wearing course*), AC-BC (*asphalt concrete binder course*) dan AC-Base (*asphalt concrete base*).

B.2 Asphalt Concrete Binder Course

Beton aspal lapis antara atau *Asphalt Concrete Binder Course* (AC-BC) adalah merupakan lapisan penghubung antara aspal beton lapisan aus (AC-WC) dengan lapisan aspal base (AC-Base) dengan Lapis Pondasi Atas. *Asphalt Concrete Binder Course* mempunyai ukuran maksimum agregat 25,4 mm. Bila campuran *asphalt concrete* yang menggunakan aspal polimer atau aspal dimodifikasi dengan aspal alam maka dikenal sebagai *asphalt concrete – binder course modified* (Departemen Pekerjaan Umum, 2010).

B.3 Material Konstruksi Perkerasan

Jenis perkerasan lapisan aspal beton merupakan campuran merata antara agregat dan aspal sebagai bahan pengikat pada suhu tertentu (Silvia Sukirman, 1999). Material konstruksi perkerasan jalan adalah agregat, aspal, dan filler yang diuraikan sebagai berikut:

1. Agregat yang digunakan sebagai campuran aspal berupa butiran atau pecahan-pecahan batu yang menempati bagian pada struktur perkerasan jalan. Agregat ini berupa batu

pecah, kerikil, pasir ataupun komposisi mineral lainnya baik hasil alam (natural agregat), hasil pengolahan, maupun agregat buatan (sintetik agregat) yang digunakan sebagai bahan penyusun utama perkerasan jalan. Berdasarkan persentase volume, agregat mengisi sekitar 92-96% campuran beton aspal panas dan 4-8% aspal.

2. Aspal didefinisikan sebagai material berwarna hitam atau coklat tua, pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat. Jika dipanaskan pada suhu tertentu aspal dapat menjadi lunak atau cair sehingga dapat membungkus partikel agregat pada waktu pembuatan aspal beton atau dapat masuk ke dalam pori-pori yang ada pada penyemprotan atau penyiraman pada perkerasan. Jika temperatur mulai turun, aspal akan mulai mengeras dan mengikat agregat pada tempatnya (sifat termoplastis). Hidrokarbon adalah bahan dasar utama dari aspal yang biasa disebut bitumen, sehingga aspal sering juga disebut dengan bitumen. (Silvia Sukirman, 1999).
3. Bahan pengisi (*filler*) adalah bahan yang harus kering, bebas dari gumpalan-gumpalan dan mempunyai sifat non plastis. *Filler* berfungsi sebagai pengisi rongga udara pada material sehingga memperkaku lapisan aspal. *Filler* termasuk agregat halus yang sebagian besar lolos saringan no.200. Apabila campuran agregat kasar dan halus masih belum masuk dalam spesifikasi yang telah ditentukan, maka pada campuran laston perlu ditambah dengan *filler*.

B.4 Graphane sebagai Zat Aditif

Graphene dengan satu lapisan atom karbon hibrid sp² dan sangat baik mobilitas elektron dalam sistem konjugasi nilai p dan memungkinkan adanya transmisi elektron dalam komposit *graphene*. *Graphene* mampu meningkatkan efisiensi pemisahan lubang elektron *photogenerated* dari semikonduktor sehingga dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik. *Graphene* dapat digunakan sebagai bahan untuk perakitan nanomaterial karbon. *Graphene* merupakan lapisan tunggal yang baik untuk memperkuat material

komposit. Meski bersifat nanomaterial, *graphene* bisa diamati langsung dalam mikroskop optik karena satu lapisan atom menyerap sekitar 2,3% dari cahaya tampak. Hal ini memungkinkan untuk membedakan serpihan *graphene*. Ketebalan yang dimiliki oleh *graphene monolayer* berkisar 0,4 nm. Raman spektroskopi saat ini banyak digunakan dalam menganalisa *graphene*, hal ini dikarenakan keakuratan yang dihasilkan lebih baik. Ada tiga sifat dasar yang mengklasifikasikan *graphene*, yaitu jumlah lapisan *graphene*, dimensi rata-rata, dan perbandingan karbon : oksigen (C/O).

Karakteristik *graphene* yang luar biasa ini membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi teknis, seperti elektronik frekuensi tinggi, sel surya, sensor, dan bahan komposit fleksibel. Selain itu, *graphene* juga bisa digunakan sebagai aditif dalam pembuatan pelumas. *Graphene* juga telah terbukti kedap cairan dan gas, seperti air atau oksigen, sehingga memperlambat proses korosif dan oksidatif yang biasanya menyebabkan lebih banyak kerusakan pada permukaan selama gesekan. *Graphene* memiliki sifat-sifat yang luar biasa. Sifat-sifat tersebut diantaranya adalah mobilitas elektron yang tinggi mencapai 200.000 cm²/Vs, konduktivitas listrik yang tinggi ($0,96 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$), konduktivitas termal yang tinggi (5000 W/mK), transparansi optik yang baik (97,7%), 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. Bentuk *graphene* cair dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Graphene* Cair

B.5 Kadar aspal optimum

Kadar aspal optimum pada campuran aspal beton harus memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, seperti nilai VIM, VMA, VFA, Flow, dan sebagainya. Nilai karakteristik *marshall* diperoleh dari pengujian dan perhitungan dari beberapa benda uji dengan membuat variasi kadar aspal yang berbeda sedangkan gradasi tetap. Nilai kadar aspal optimum merupakan nilai kadar aspal yang memenuhi semua atau minimal lima karakteristik *marshall* yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

C. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dan deskriptif analisis. Metode ini digunakan untuk memperoleh data kemudian dianalisis sesuai dengan syarat dan peraturan yang ada. Menggabungkan kedua metode ini data-data dari hasil pengujian akan diidentifikasi berdasarkan fakta yang diperoleh saat pengujian kemudian dianalisis berdasarkan pustaka serta data pendukung lainnya. Penentuan proporsi masing-masing agregat yang akan diuji harus memenuhi syarat dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

C.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Laboratorium *Functional and Nanostructured Materials Engineering Research Group* (FN-MER-G), Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru.

C.2 Pengujian Material

Sebelum digunakan untuk campuran beraspal, bahan-bahan yang digunakan harus diperiksa terlebih dahulu karakteristiknya apakah telah memenuhi persyaratan yang disebutkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

C.2.1 Pengujian Agregat

Pengujian terhadap agregat kasar dan halus berdasarkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 yaitu:

1. Pengujian keausan agregat dengan alat abrasi *Los Angeles* (LA) mengacu ke SNI 2417:2008,
2. Pengujian berat jenis agregat kasar mengacu ke SNI 03-1969-1990,
3. Pengujian berat jenis agregat halus mengacu ke SNI 03-1970-1990,
4. Pengujian gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat mengacu ke SNI 03-4141-1996,
5. Pengujian kekekalan agregat terhadap *natrium sulfat* atau *magnesium sulfat* mengacu ke SNI 3407:2008,
6. Pengujian kadar rongga agregat halus mengacu ke SNI 03-6877-2002,
7. Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal mengacu ke SNI 2439:2011,
8. Pengujian agregat pipih dan lonjong mengacu ke ASTM D 4791,
9. Pengujian *sand equivalent* agregat halus mengacu ke SNI 03-4428-1997,
10. Pengujian butir pecah mengacu ke SNI 7619:2012,
11. Pengujian *Aggregate Impact Value* (kekuatan agregat terhadap tumbukan) mengacu ke BS 812 : Part 3:1975.

C.2.2 Pengujian Aspal

Pengujian terhadap bitumen berdasarkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 sebagai berikut:

1. Pengujian penetrasi aspal mengacu ke SNI 06-2456-1991,
2. Pengujian titik lembek aspal mengacu ke SNI 2434:2011,
3. Pengujian titik nyala dan titik bakar aspal SNI 2433:2011,
4. Pengujian daktilitas mengacu ke SNI 2432:2011,
5. Pengujian berat jenis aspal mengacu ke SNI 2441:2011,
6. Pengujian kehilangan berat mengacu ke SNI 06-2441-1991,
7. Pengujian viskositas mengacu ke AASHTO T 72-90/AASHTO T 54-61.

C.2.3 Proporsi Agregat

Penentuan proporsi agregat pada penelitian ini yaitu menggunakan cara analitis matriks. Fraksi yang digunakan yaitu fraksi agregat kasar, fraksi agregat medium, fraksi

agregat halus dan fraksi pasir. Berdasarkan fraksi tersebut diambil nilai yang mewakili, masing-masing fraksi digabungkan menjadi satu susunan bilangan matrik dengan nilai hasil adalah bilangan matrik nilai antara batas atas dan batas bawah persentase lolos saringan yang sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

C.3 Pembuatan Graphene

Graphene dibuat dengan metode *Electrochemical and Mechanical Liquid Exfoliation* (EMLE). Pembuatan graphene merujuk pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Eswarajah, V, dkk (2014) dengan judul *Turbulence-assisted shear exfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender*. Langkah kerja pembuatan graphene dengan konsentrasi 20 mg/ml sebagai berikut:

1. Pengelupasan serpihan *graphite* berasal dari isi pensil 2B, kemudian serpihan *graphite* dihaluskan dan diayak dengan saringan No. 200,
2. Timbang 10 gram *graphite*,
3. Timbang larutan surfaktan sebanyak 1,25 gram dan tambahkan 500 ml *aquadest*,
4. Masukkan 10 gram *graphite* ke dalam blender Kenwood BL370 serta campuran surfaktan dan *aquadest*,
5. Blender dioperasikan pada kecepatan maksimal dengan lama pengoperasian yaitu 60 menit. Untuk menjaga kondisi proses di dalam blender maka untuk pengoperasian yaitu 1 menit on dan 1 menit off supaya blender tidak panas,
6. *Graphene* EMLE yang dihasilkan didiamkan sampai buih didalam tabung menghilang.
7. Kemudian *graphene* EMLE dikarakterisasi dan siap digunakan untuk penelitian.

C.4 Perencanaan Campuran dan Pembuatan Benda Uji Marshall

Pada penelitian ini variasi-variasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Campuran standar (sebagai pembanding)
Campuran ini menggunakan 4 fraksi yaitu CA (agregat kasar), MA (agregat sedang), FA (agregat halus), FS (pasir), dan aspal

tanpa penambahan *graphene* sebagai bahan pengikat, berdasarkan batas tengah spesifikasi AC-BC yang terdapat pada pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

2. Variasi 1 (V1)

Campuran ini menggunakan campuran yang sama dengan campuran standar, tetapi pembedanya yaitu bahan pengikatnya. Bahan pengikat yang digunakan aspal dengan penambahan *graphene* sebesar 3,5 %.

3. Variasi 2 (V2)

Campuran ini menggunakan campuran yang sama dengan campuran standar, tetapi pembedanya yaitu bahan pengikatnya. Bahan pengikat yang digunakan aspal dengan penambahan *graphene* sebesar 4,0 %.

4. Variasi 3 (V3)

Campuran ini menggunakan campuran yang sama dengan campuran standar, tetapi pembedanya yaitu bahan pengikatnya. Bahan pengikat yang digunakan aspal dengan penambahan *graphene* sebesar 4,5 %.

Kadar aspal yang direncanakan yaitu 5%, 5,5%, 6%, 6,5% dan 7%. Variasi penambahan *graphene* ke dalam aspal yaitu 3,5%, 4% dan 5%. Berdasarkan jumlah benda uji setiap variasi sebanyak 3 buah, maka jumlah benda uji yang dibutuhkan adalah sebanyak 60 buah sampel benda uji untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) dengan uraian pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji untuk Menentukan KAO Tanpa Penambahan *Graphene* dan dengan Penambahan *Graphene*

No	Variasi Kadar Aspal (%)	Jumlah Sampel (buah)			
		<i>Graphene</i>			
		0%	3,5%	4%	4,5%
1	5	3	3	3	3
2	5,5	3	3	3	3
3	6	3	3	3	3
4	6,5	3	3	3	3
5	7	3	3	3	3
Jumlah Sampel		15	15	15	15

Langkah pembuatan benda uji *marshall* berdasarkan RSNI M-01-2003 yang merupakan rujukan dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

C.5 Pengujian Sampel

Pengujian ini dilakukan dengan tahapan pengukuran stabilitas dan *flow* pada uji *marshall* standar yaitu:

1. Merendam benda uji di dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit,
2. Mengeluarkan benda uji dan meletakkan ke dalam segmen bawah kepala penekan alat uji *marshall*,
3. Memasang kepala segmen alat uji bagian atas dan meletakkan dalam mesin penguji,
4. Memasang arloji kelelahan (*flow*) pada salah satu batang yang menyentuh segmen dan mengatur jarum pada kondisi 0,
5. Memberikan pembebanan benda uji dengan kecepatan 50 mm/s sampai pembebanan maksimum yang ditunjukkan jarum arloji. Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan arloji stabilitas dikali kalibrasi *proving ring* dan dikali angka koreksi,
6. Mencatat nilai kelelahan (*flow*) yang ditunjukkan jarum arloji kelelahan.

C.6 Menentukan Kadar Aspal Optimum

Kadar aspal optimum diperoleh dari nilai yang memenuhi semua kriteria *marshall* atau lima kriteria *marshall*. Menentukan kadar aspal optimum yaitu sebagai berikut:

1. Hitung karakteristik *marshall* seperti stabilitas, *flow*, VIM, VFA, VMA, dan MQ,
2. Buat grafik *trendline*,
3. Beri garis pembatas untuk setiap grafik yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3,
4. Tarik garis batas atas dan batas bawah sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3,
5. Jumlahkan batas atas dan batas bawah lalu bagi 2.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Material

Sebelum digunakan sebagai bahan campuran laston, semua material atau bahan penyusun laston harus diuji karakteristiknya terlebih dahulu. Pengujian ini bertujuan untuk melihat kelayakan agregat yang digunakan untuk bahan campuran laston dengan acuan spesifikasi umum Bina Marga 2010 revisi 3.

D.1.1 Hasil Pengujian Agregat

Hasil pengujian agregat dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Kasar

Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	
		Min	Maks
Kekekalan agregat	7,317		12
Keausan agregat (LA)	31,120		40
Kelekatan agregat	97,175	95	
Butir pecah	92,972	95/90	
Pipih dan lonjong	7,325		10
AIV	7,221		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			
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 3. Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	
		Min	Maks
Gumpalan lempung dan butir - butir mudah pecah	0,131		1
Angularitas	45,014	45	
Nilai setara pasir	80,242	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 shear</i>)			
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

Catatan: Nilai 95/90 adalah 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 yang disyaratkan, bahwa hasil pengujian agregat kasar maupun agregat halus terdapat pada Tabel 2, Tabel 3 telah memenuhi standar spesifikasi dan agregat

tersebut layak digunakan sebagai bahan agregat campuran beraspal (laston).

D.1.2 Hasil Pengujian Aspal

Pada pengujian aspal ada dua macam pengujian yang dilakukan yaitu, pengujian aspal tanpa penambahan *graphene* dan pengujian aspal dengan penambahan *graphene*. Pada pengujian aspal dengan penambahan *graphene* yang akan diuji adalah penetrasi dan daktilitas, sedangkan pada pengujian tanpa penambahan *graphene* yaitu penetrasi, daktilitas, titik lembek, titik nyala titik bakar, kehilangan berat, berat jenis, dan viskositas. Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal dengan penetrasi 60/70 merek Cosmic. Standar yang akan digunakan untuk campuran beraspal yaitu berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Berdasarkan pengujian aspal pen 60/70 tanpa penambahan *graphene* maupun pengujian aspal dengan penambahan *graphene* dapat dilihat pada Tabel 4, dan Tabel 5 .

Tabel 4. Hasil Pengujian Aspal Pen 60/70 Tanpa Penambahan *Graphene*

Pengujian	Hasil Uji	Spesifikasi	
		Min	Maks
Penetrasi	62,20	60	79
Titik Lembek	55,85	48	
Titik Nyala	235	232	
Daktilitas	147,5	100	
Berat Jenis	1,032	1,0	
Kehilangan Berat Viskositas	0,0		0,8
Suhu pemadatan ideal (viscositas = 280 cSt)	147		
Suhu Min 250°C	149	135	155
Suhu Max 310°C	145		
Suhu pencampuran ideal (viscositas = 170 cSt)	155	149	160
Suhu Min 150°C	156		
Suhu Max 190°C	153		

Tabel 5. Hasil Pengujian Aspal Pen 60/70 dengan Penambahan *Graphene*

Pengujian	Hasil Uji Aspal dengan Penambahan <i>Graphene</i>			Spesifikasi	
	3,5%	4%	4,5%	Min	Maks
Penetrasi	58,20	55,50	53,70	60	79
Daktilitas	129,0	125,0	120,5	100	

Berdasarkan Tabel 4 bahwa karakteristik aspal telah memenuhi spesifikasi. Hasil pengujian aspal Pen 60/70 dengan penambahan *graphene* yang telah dilakukan, bahwa nilai penetrasi yang didapatkan terdapat pada Tabel 5, dimana nilai tersebut tidak sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Nilai yang disyaratkan untuk aspal Pen 60/70 yaitu minimal 60 dmm, sedangkan untuk pengujian penetrasi dengan penambahan *graphene* nilai yang didapatkan kurang dari 60 dmm. Hasil pengujian penetrasi ini menunjukkan bahwa aspal yang dicampur dengan penambahan *graphene* semakin keras dan masuk kedalam spesifikasi Aspal Pen 40/50. Aspal Pen 40/50 yaitu aspal keras yang biasa digunakan pada volume lalu lintas tinggi dan didaerah tropis. Nilai daktilitas pada pengujian didapatkan diatas 100 cm, maka pengujian daktilitas memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

D.2 Penentuan KAO Campuran AC-BC

Dalam menentukan kadar aspal optimum (KAO), metode yang digunakan yaitu berdasarkan RSNI M-01-2003 dengan enam karakteristi *marshall* dengan menjabarkan grafik stabilitas, *flow*, VIM, VFA, VMA, dan MQ. Nilai-nilai karakteristik *marshall* diuraikan dalam grafik yang dibatasi oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

Kadar aspal optimum yang diperoleh dari pengujian tanpa penambahan *graphene* maupun dengan penambahan *graphene* yaitu:

1. *Graphene* 0% (pembanding) adalah 5,70%,
2. *Graphene* 3,5% (variasi 1) adalah 5,90%,
3. *Graphene* 4% (variasi 2) adalah 6,38%,
4. *Graphene* 4,5% (variasi 3) adalah 5,43%,

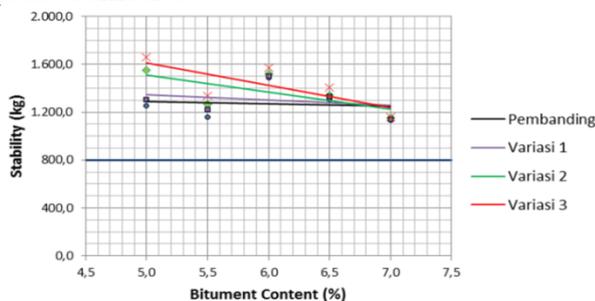
D.3 Analisa Karakteristik *Marshall* Tanpa Penambahan *Graphene* dan dengan Penambahan *Graphene*

Analisa karakteristk *marshall* tanpa penambahan *graphene* dan dengan penambahan *graphene* merupakan hasil perbandingan karakteristik *marshall* yang telah didapatkan untuk menentukan masing-masing kadar aspal optimun dan persentase *graphene* yang paling baik digunakan pada

campuran AC-BC dengan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3.

D.3.1 Stabilitas

Hasil pengujian stabilitas benda uji campuran standar tanpa penambahan *graphene* dengan variasi campuran yang menggunakan aspal dengan penambahan *graphene* sebagai bahan pengikat dapat dilihat pada Gambar 3.

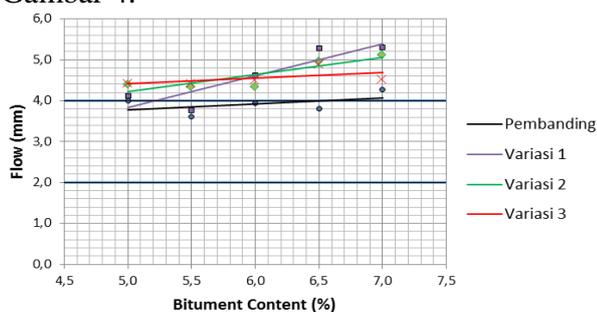


Gambar 3. Hubungan antara *Bitument Content* dan *Stability*

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas campuran aspal dengan penambahan *graphene* sebanyak 4,5% (variasi 3) lebih tinggi dari campuran pembanding, variasi 1, variasi 2 dan memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 5% - 7%. Nilai stabilitas paling tinggi yaitu 1656,8 kg terdapat pada variasi 3 dengan kadar aspal 5%, sedangkan nilai *marshall* paling rendah 1133,1 kg yang terdapat pada kadar aspal 7% tanpa penambahan *graphene*. Dari Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai stabilitas pengujian pembanding, variasi 1, variasi 2, dan variasi 3 campuran memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg.

D.3.2 Kelelahan (*Flow*)

Hasil pengujian *flow* dapat dilihat pada Gambar 4.

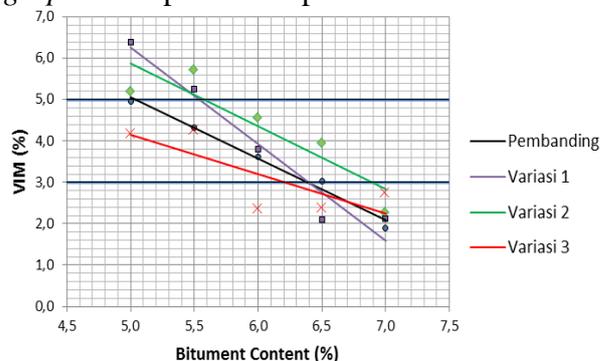


Gambar 4. Hubungan antara *Bitument Content* dan *Flow*

Hasil pengujian *flow* pada Gambar 4 menunjukkan untuk campuran tanpa penambahan *graphene* memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 pada kadar aspal 5% - 6,6%. Pada Gambar 4 semakin bertambahnya kadar aspal akan membuat nilai *flow* suatu campuran semakin meningkat. Dari penelitian ini, nilai *flow* yang lebih tinggi terdapat pada variasi 1 yaitu 5,30 mm. Sedangkan rata-rata penambahan *graphene* tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, dimana nilai *flow* yang disyaratkan untuk laston *binder course* minimal 2 mm dan maksimal 4 mm, sedangkan pada pengujian ini didapatkan nilai *flow* rata-rata > 4 mm. Jadi dengan penambahan *graphene* benda uji yang digunakan semakin bersifat plastis.

D.3.3 Void in Mixture (VIM)

Hasil penelitian terhadap rongga dalam campuran (VIM) berbagai kombinasi campuran standar tanpa penambahan *graphene* dan campuran variasi yang menggunakan aspal dengan penambahan *graphene* dapat dilihat pada Gambar 5.

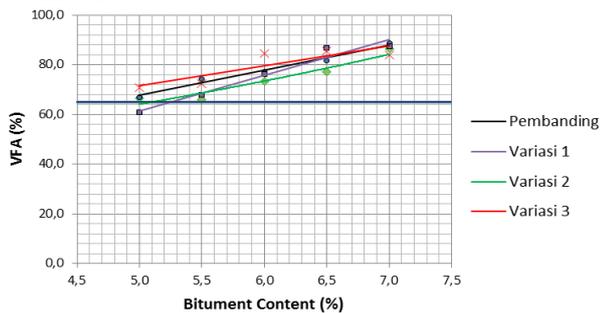


Gambar 5. Hubungan antara *Bitument Content* dan VIM

Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai VIM pada masing-masing variasi rata-rata memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 disyaratkan yaitu sebesar 3-5%. Pada pengujian ini nilai VIM bertambah kecil apabila bertambahnya kadar aspal dari campuran, sehingga rongga udara semakin kecil. Apabila nilai VIM lebih kecil maka akan terjadi keluarnya aspal permukaan perkerasan, jika lebih besar maka perkerasan akan kedap air sehingga perkerasan akan cepat mengalami kerusakan.

D.3.4 Void Filled with Asphalt (VFA)

Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 6

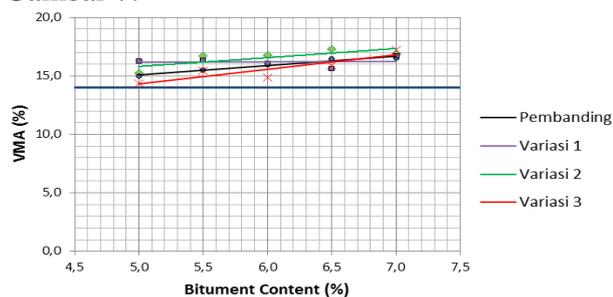


Gambar 6. Hubungan antara *Bitument Content* dan VFA

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai VFA mengalami kenaikan yang tidak terlalu jauh, nilai VFA paling rendah terdapat pada variasi 1 sebesar 60,85%, dan yang paling tinggi terdapat pada campuran pembanding sebesar 88,60%. Dari grafik terlihat bahwa rata-rata semua variasi campuran masuk kedalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 yang disyaratkan minimal adalah 65%, kecuali variasi 1 ada nilai VFA yang tidak masuk yaitu 60,85% terdapat pada kadar aspal 5%.

D.3.5 Void in Mineral Aggregate (VMA)

Hasil penelitian terhadap rongga terisi aspal berbagai kombinasi campuran standar tanpa penambahan *graphene* dan campuran variasi yang menggunakan aspal dengan penambahan *graphene* dapat dilihat pada Gambar 7.



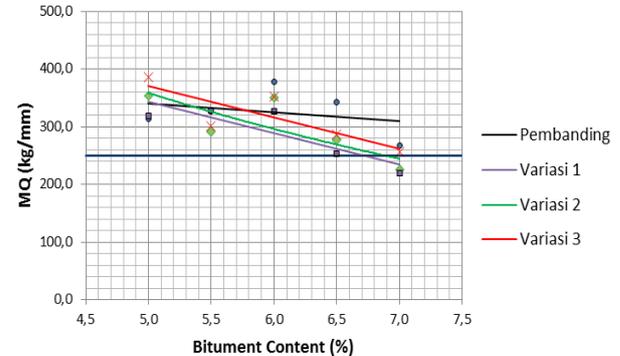
Gambar 7. Hubungan antara *Bitument Content* dan VMA

Pada Gambar 7 semakin bertambahnya kadar aspal akan membuat nilai VMA suatu campuran semakin meningkat. Hasil VMA pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 5% - 7%. Semua pengujian diatas

menunjukkan nilai VMA dari semua variasi campuran masuk kedalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dimana nilai VMA minimal 14%.

D.3.6 Marshall Quotient (MQ)

Hasil pengujian MQ dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan antara *Bitument Content* dan MQ

Berdasarkan Gambar 8 rata-rata nilai MQ untuk tiap campuran kadar aspal memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, namun pada variasi 1, variasi 2 kadar aspal 7% nilai MQ dibawah spesifikasi yang telah ditentukan. Nilai MQ tertinggi terdapat pada variasi 3 kadar aspal 5% yaitu 385,5 kg/mm. Pada grafik dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya kadar aspal akan membuat nilai MQ suatu campuran semakin menurun. Kenaikan dan penurunan nilai MQ dipengaruhi oleh stabilitas dan *flow* pada campuran.

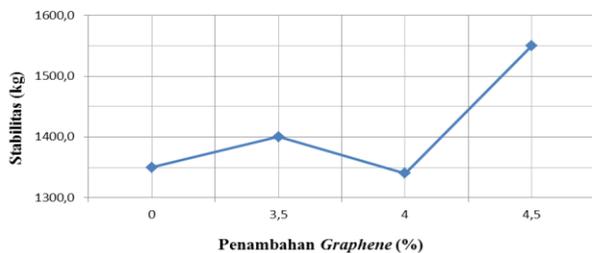
Berdasarkan nilai masing-masing kadar aspal optimum tanpa penambahan *graphene* maupun dengan penambahan *graphene* dapat dibuat benda uji untuk melihat karakteristik *marshall* yang meliputi stabilitas, *flow*, VIM, VMA, VFA, dan MQ. Pada penelitian ini penulis tidak melakukan pembuatan benda uji setelah didapatkan kadar aspal optimum, tetapi penulis menganalisa dengan nilai karakteristik *marshall* yang telah didapatkan. Nilai karakteristik *marshall* yang didapatkan pada masing-masing kadar aspal optimum yaitu dengan menarik garis dari nilai KAO sampai batas nilai karakteristik *marshall*. Hasil masing-masing nilai karakteristik *marshall* pada kondisi kadar aspal optimum tanpa penambahan *graphene* maupun dengan

penambahan graphene 3,5%, 4%, 4,5% dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Karakteristik Marshall Pada Kondisi KAO

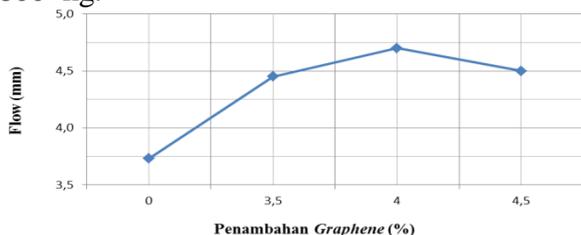
Graphene (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	MQ (kg/mm)
0	1350	3,73	4,1	15,60	75,0	360
3,5	1400	4,45	3,9	16,10	76,0	320
4,0	1340	4,70	4,2	17,20	76,0	291
4,5	1550	4,50	3,7	14,80	76,0	350

Berdasarkan Tabel 6 nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan MQ dibuat dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13, dan Gambar 14.



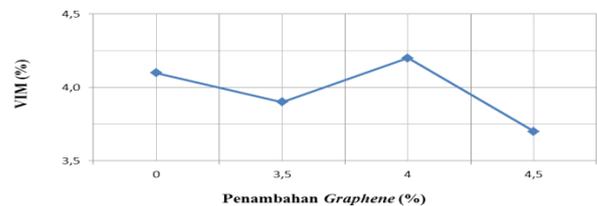
Gambar 9. Hubungan antara Nilai Stabilitas dan Graphene

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas yang didapatkan semakin meningkat, tetapi pada penambahan graphene 4% terjadi penurunan karena nilai KAO yang didapatkan terlalu besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rata-rata semakin bertambahnya persentase graphene nilai stabilitasnya semakin meningkat. Stabilitas paling rendah yaitu sebesar 1340 kg terdapat pada penambahan graphene 4% dan stabilitas paling tinggi dihasilkan pada komposisi penambahan graphene sebesar 4,5% dengan hasil sebesar 1550 kg. Nilai stabilitas masing-masing variasi telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg.



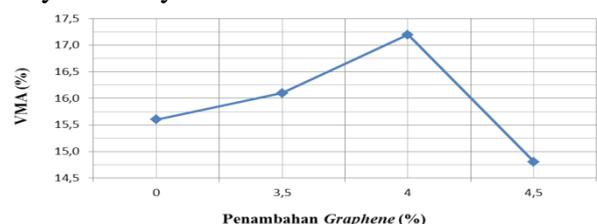
Gambar 10. Hubungan antara Nilai Flow dan Graphene

Pada Gambar 10 nilai flow untuk campuran tanpa penambahan graphene yaitu sebesar 3,73 mm, sedangkan pada penambahan graphene 3,5%, 4%, 4,5%, nilai yang didapatkan yaitu sebesar 4,45 mm, 4,70 mm, dan 4,50 mm. Semakin bertambahnya persentase graphene nilai flow yang didapatkan semakin meningkat. Jadi dengan penambahan graphene benda uji yang digunakan semakin bersifat plastis. Nilai flow pada kondisi KAO tanpa penambahan graphene telah memenuhi spesifikasi dan nilai flow pada kondisi KAO dengan penambahan graphene tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3, dimana nilai flow yang disyaratkan untuk laston binder course minimal 2 mm dan maksimal 4 mm.



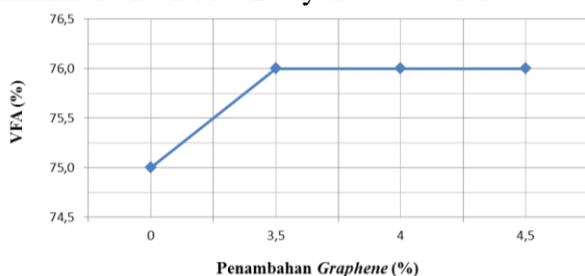
Gambar 11. Hubungan antara Nilai VIM dan Graphene

Berdasarkan Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai VIM tanpa penambahan graphene didapatkan nilai sebesar 4,1%, sedangkan pada penambahan graphene sebesar 3,5%, didapatkan nilai sebesar 3,9% dan 4% penambahan graphene didapatkan nilai VIM sebesar 4,2%. Pada penambahan graphene sebesar 4,5% nilai VIM yang didapatkan yaitu sebesar 3,7%. Apabila nilai VIM lebih kecil maka akan terjadi keluarnya aspal permukaan perkerasan, jika lebih besar maka perkerasan akan kedap air sehingga perkerasan akan cepat mengalami kerusakan. Masing-masing nilai VIM yang didapatkan dari hasil pengujian telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 disyaratkan yaitu sebesar 3-5%.



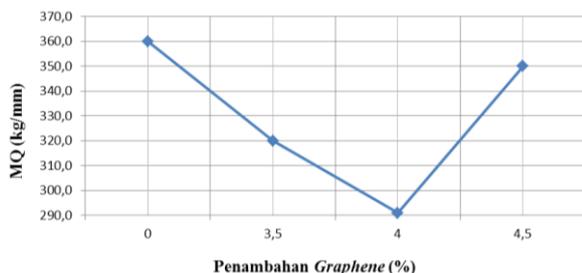
Gambar 12. Hubungan Nilai antara VMA dan Graphene

Pada Gambar 12 nilai VMA untuk campuran tanpa penambahan *graphene* yaitu sebesar 15,6%, sedangkan pada penambahan *graphene* 3,5%, 4%, 4,5%, nilai yang didapatkan yaitu sebesar 16,1%, 17,2% dan 14,8%. Semua pengujian diatas menunjukkan nilai VMA dari semua variasi campuran masuk kedalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dimana nilai VMA minimal untuk AC-BC yaitu sebesar 14%.



Gambar 13. Hubungan antara Nilai VFA dan *Graphene*

Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa nilai VFA mengalami kenaikan yang tidak terlalu jauh. Dari grafik terlihat bahwa nilai VFA masuk kedalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 yang disyaratkan minimal 65%.



Gambar 14. Hubungan antara Nilai MQ dan *Graphene*

Berdasarkan Gambar 14 nilai MQ untuk campuran tanpa penambahan *graphene* yaitu sebesar 360 kg/mm, sedangkan pada penambahan *graphene* 3,5%, 4%, 4,5%, nilai yang didapatkan yaitu sebesar 320 kg/mm, 291 kg/mm dan 350 kg/mm. Semua pengujian diatas menunjukkan nilai MQ dari semua variasi campuran masuk kedalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3 dimana nilai MQ minimal 250 kg/mm.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa hasil karakteristik *marshall* pada kondisi KAO nilai stabilitas meningkat. Nilai stabilitas paling

tinggi terdapat pada penambahan *graphene* 4,5% yaitu 1550 kg. Dari hasil tersebut penggunaan kadar aspal yang paling baik dalam penambahan *graphene* adalah variasi 3 atau penambahan *graphene* 4,5%. Variasi campuran tersebut dipilih menjadi kadar aspal penambahan *graphene* yang paling baik karena penggunaan aspal untuk campuran ini tidak terlalu banyak yaitu sebanyak 5,43%. Variasi 3 memiliki nilai stabilitas yang paling tinggi dengan selisih 200 kg atau 14,81%, nilai VIM, VFA, VMA, dan MQ yang telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Sedangkan nilai *flow* dengan penambahan *graphene* tidak memenuhi spesifikasi, disebabkan oleh aspal yang digunakan semakin keras. Nilai tersebut ditunjukkan pada pengujian penetrasi yang didapatkan yaitu Pen 40/50.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pengaruh penambahan *graphene* sebagai zat aditif terhadap karakteristik *marshall* pada campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan *graphene* mempunyai nilai stabilitas yang tinggi yaitu 1550 kg dengan selisih 200 kg atau 14,81%. Nilai *flow* didapatkan dengan penambahan *graphene* nilainya lebih tinggi dari pada tanpa penambahan *graphene*, disebabkan oleh aspal yang digunakan semakin keras. VIM dan VMA dengan penambahan *graphene* lebih rendah dari nilai tanpa penambahan *graphene*, tetapi nilai tersebut masuk spesifikasi. Sedangkan nilai VFA dan nilai MQ dengan penambahan *graphene* lebih tinggi dari pada nilai tanpa penambahan *graphene*.
2. Penambahan *graphene* yang lebih baik dalam campuran aspal terhadap karakteristik *marshall* pada campuran laston AC-BC adalah 4,5%.

E.2 Saran

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan untuk penyempurnaan hasil penelitian serta mengembangkan penelitian

yang lebih lanjut disarankan untuk melakukan penelitian dengan memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Perlu melakukan penelitian mengenai durabilitas, sebagai pedoman apabila kondisi jalan terendam atau digenangi air dalam jangka waktu yang lama.
2. Memahami prosedur dari setiap objek yang akan diamati sehingga tidak terjadi kesalahan. Selanjutnya dalam menimbang benda uji harus hati-hati dan perhatikan satuan waktu penimbangan. Selain itu juga diperlukan keseriusan, konsentrasi dan kecermatan dalam melakukan penelitian.
3. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan *graphene* sebagai zat aditif atau *filler* terhadap karakteristik *marshall* campuran beraspal dengan penambahan *graphene* 5% dan seterusnya.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. *T 72-90 / T 54-61. Testing Viscosity*. Washington DC : AASHTO
- American Standard Testing and Material. *D 4791. Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles In Coarse Aggregate*. United State : ASTM International
- 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. (2010). *Seksi 6.3 Spesifikasi Campuran Beraspal Panas pada Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Edisi 2010*. Jakarta : Direktorat Jendral Bina Marga.
- British Standards Institution. (1975). *BS 812-3. Testing Aggregates*. London : W1A 2BS
- Dimitros, G., dkk. (2015). *Graphene / Elastomer Nanocomposite*. Carbon. pp: 460-484. Elsevier. DOI:10.1016/j.carbon.2015.08.055.
- Eswaraiah, V., K. Paton, C. Backes, A. Harvey, R. Smith, J. Mc Cauley dan J.Coleman. (2014). *Turbulence-assisted shear exfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender*. Nanoscale. DOI :10.1039/C4NR03560G.
- Standar Nasional Indonesia. (1990). *SNI 03-1969. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasioanal.
- 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 Plastik 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 Kekakuan 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 Agregat 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. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung : Nova.