

PENGARUH PENAMBAHAN GRAPHENE SEBAGAI BAHAN TAMBAH ASPAL TERHADAP KINERJA CAMPURAN AC-WC

Shahifa Annura¹, Hamzani², Emi Maulani³ Burhanuddin⁴
Teknik Sipil Universitas Malikussaleh
Jl. Kampus Unimal Bukit Indah, Blang Pulo, Kec. Muara Satu
Email: Shahifa.190110128@mhs.unimal.ac.id
Corresponden Author : Emimaulani@unimal.ac.id

Abstrak

Asphalt Concrete -Wearing Course (AC-WC) merupakan lapisan yang lebih rentan mengalami kerusakan atau kelelahan terlebih dahulu sebelum sampai usia layan, akibat pengaruh temperatur, air maupun kelembaban. Kinerja campuran AC-WC dapat ditingkatkan dengan memodifikasi bahan tambah pada campuran aspal diantaranya dengan menambahkan material lain ke dalam campuran aspal seperti nanomaterial *graphene*. Penambahan *graphene* sebagai bahan pengikat aspal dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap kelembaban, ketahanan terhadap alur suhu tinggi, modulus ketahanan tekan campuran aspal, dan sedikit mengurangi ketahanan retak pada suhu rendah. Metode eksperimental yang digunakan mengacu pada Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 dengan total jumlah benda uji yaitu 15 sampel, dengan variasi 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04%, dan 0,05%. Hasil penelitian pada penambahan *graphene* dapat mempengaruhi karakteristik marshall diantaranya meningkatkan nilai stabilitas yaitu 7,54% dan flow 10,12%. Semakin tinggi persentase *graphene* yang ditambahkan seiring dengan menurunnya VIM, VMA dan juga nilai density tetapi tidak signifikan. Variasi optimum karakteristik marshall pada campuran AC-WC didapat pada variasi 0,04%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *graphene* bisa menjadi bahan aditif yang efektif untuk meningkatkan kualitas dan kinerja jalan raya, menawarkan solusi jangka panjang untuk pemeliharaan infrastruktur jalan.

Kata kunci: AC-WC, bahan tambah, *Graphene*, parameter Marshall

Abstract

Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) is a layer that is more prone to damage or fatigue before reaching its service life due to the influence of temperature, water, and humidity. The performance of the AC-WC mixture can be improved by modifying the additive materials in the asphalt mixture, such as by adding other materials like *graphene* nanomaterial to the asphalt mixture. The addition of *graphene* as an asphalt binder can significantly increase moisture resistance, high-temperature rutting resistance, compressive strength modulus of the asphalt mixture, and slightly reduce crack resistance at low temperatures. The experimental method used refers to the 2018 Bina Marga Specifications Revision 2 with a total of 15 test samples, with variations of 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.04%, and 0.05%. The research results show that the addition of *graphene* can affect the Marshall characteristics, including increasing stability by 7.54% and flow by 10.12%. The higher the percentage of *graphene* added, the lower the VIM, VMA, and density values, although not significantly. The optimum variation in Marshall characteristics in the AC-WC mixture was obtained at a 0.04% variation. The research results indicate that *graphene* can be

an effective additive material to improve the quality and performance of roadways, offering a long-term solution for road infrastructure maintenance.

Keywords: AC-WC, additives, *graphene*, Marshall parameters

1. PENDAHULUAN

Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) merupakan lapisan aspal beton (laston) yang berfungsi sebagai lapisan aus pada sebuah konstruksi perkerasan jalan (Mashuri & Rahman, 2020). Campuran aspal jenis AC-WC ini merupakan campuran yang sering mengalami kerusakan atau kelelahan terlebih dahulu sebelum sampai usia layan. AC-WC ini sangat rentan mengalami kerusakan akibat pengaruh temperatur, air atau kelembaban. Untuk meningkatkan performa campuran beraspal, berbagai modifikasi yang diasumsikan untuk dievaluasi. Modifikasi campuran beraspal dapat dilakukan melalui modifikasi aspal atau agregat.

Selama masa layannya aspal sebagai bahan pengikat perkerasan jalan raya mudah mengalami kerusakan seperti retak, berlubang dan deformasi plastis yang di akibatkan oleh perubahan cuaca atau suhu, atau muatan berat yang berlebihan dan volume lalu lintas yang padat untuk itu diperlukan tindakan yang menghasilkan campuran aspal yang dapat mengatasi masalah tersebut, salah satunya dengan melakukan modifikasi terhadap aspal yang ditambahkan *graphene*.

Graphene merupakan salah satu jenis nanomaterial, sebagai partikel mini dengan setidaknya satu dimensi kurang dari 100 nm. Bahan pada tingkat nano menunjukkan perilaku yang sangat berbeda baik secara fisik maupun kimia yang berasal dari sifat bawaannya, rasio luas permukaan terhadap volume aktif yang tinggi dan juga pemeran efek kuantum yang timbul dari dimensi partikelnya yang kecil yaitu pengurangan spasial (Raufi et al., 2019). Berdasarkan hasil penelitian Du et al (2019), penambahan *graphene* 1% dispersi dapat meningkatkan sifat anti-penuaan, stabilitas campuran pada suhu tinggi. sebagian besar penelitian aspal modifikasi *Graphene Oxide* sebelumnya hanya fokus pada sifat makroskopis (fisik dan reologi). Terdapat perbedaan pendapat mengenai mekanisme modifikasi dan metode investigasi mikro untuk mengungkap modifikasi dan mekanisme peningkatan kinerja yang langka dan perlu dieksplorasi lebih lanjut.

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 *graphena* 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. Penambahan *graphene* sebagai bahan pengikat aspal dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap kelembaban, ketahanan terhadap alur suhu tinggi, modulus ketahanan tekan campuran aspal, dan sedikit mengurangi ketahanan retak pada suhu rendah (Zhu et al., 2019).

Berdasarkan latar belakang, maka *graphene* digunakan sebagai bahan tambah (*aditif*) pada aspal dalam pengujian campuran AC-WC, penulis fokus pada penelitian mekanisme *graphene* memodifikasi kinerja campuran aspal AC-WC. *Graphene* yang tersedia secara komersial tanpa perlakuan awal apa pun dipilih sebagai pengubah, aspal penetrasi 60/70 yang umum

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aspal

Campuran beraspal adalah suatu kombinasi campuran antara agregat dan aspal. Dalam campuran beraspal, aspal berperan sebagai pengikat atau lem antar partikel agregat, dan agregat berperan sebagai tulangan. Sifat-Sifat mekanisme aspal dalam campuran beraspal diperoleh dari friksi dan kohesi dari bahan-bahan pembentuknya. Friksi agregat diperoleh dari ikatan antar butir agregat (*interlocking*), dan kekuatannya tergantung pada gradasi, tekstur permukaan, bentuk butiran dan ukuran agregat maksimum yang digunakan. Sedangkan sifat kohesinya diperoleh dari sifat-sifat aspal yang digunakan. Oleh karena itu, kinerja campuran beraspal sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat agregat dan aspal serta sifat-sifat agregat dan aspal serta sifat-sifat campuran padat yang sudah terbentuk dari kedua bahan tersebut (Suhardi et al., 2016).

2.2 Lapisan Aspal Beton (Laston)

Menurut (Hamirhan Saodan, 2005) laston atau *Asphalt Concrete (AC)* yang bergradasi menerus ini adalah suatu lapisan permukaan, yang terdiri dari campuran aspal keras dan agregat yang bergradasi menerus, dicampur, dihampar dan dipadatkan, dalam keadaan panas pada suhu tertentu.

- a. Laston sebagai lapisan aus, dikenal dengan nama AC-WC (*Asphalt Concrete - Wearing Course*) dengan tebal minimum AC-WC adalah 4cm. Lapisan ini adalah lapisan yang berhubungan langsung dengan ban kendaraan dan dirancang untuk tahan terhadap perubahan cuaca, gaya geser, tekanan roda ban kendaraan serta memberikan lapis kedap air untuk lapisan dibawahnya.
- b. Laston sebagai lapisan pengikat, dikenal dengan nama AC-BC (*Asphalt Concrete - Binder Course*) dengan tebal minimum AC-BC adalah 5 cm. Lapisan ini untuk membentuk lapis pondasi jika digunakan pada pekerjaan peningkatan atau pemeliharaan jalan.
- c. Laston sebagai lapisan pondasi, dikenal dengan nama AC-Base (*Asphalt Concrete-Base*) dengan tebal minimum AC-Base adalah 6 cm. Lapisan ini tidak berhubungan langsung dengan cuaca tetapi memerlukan stabilitas untuk memikul beban lalu lintas yang dilimpahkan melalui roda kendaraan.

Penggunaan AC-WC yaitu untuk lapis permukaan (paling atas) dalam perkerasan dan mempunyai tekstur yang paling halus dibandingkan dengan jenis laston lainnya. Pada campuran laston yang bergradasi menerus tersebut mempunyai sedikit rongga dalam struktur agregatnya dibandingkan dengan campuran bergradasi senjang. Hal tersebut menyebabkan campuran AC-WC lebih peka terhadap variasi dalam proporsi campuran. Lapisan Aspal Beton (Laston) memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi sehingga penempatan langsung di atas lapisan seperti lapisan aus (*AC - Wearing Course*) membuat lapisan ini rentan terhadap kerusakan akibat temperatur yang tinggi dan beban lalu lintas berat. Jenis kerusakan yang sering terjadi pada Laston adalah pelepasan butiran dan retak. Di samping hal tersebut, kerusakan jalan juga karena terlalu tingginya viskositas aspal keras saat pencampuran dengan agregat akibat tidak berjalannya pengendalian mutu di *Asphalt Mixing Plant (AMP)* sehingga temperatur aspal tidak terkontrol.

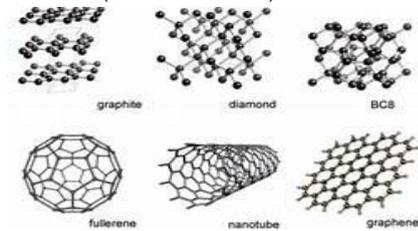
Tabel 1. Ketentuan sifat-sifat campuran laston (AC)

Sifat-sifat Campuran	Laston		
	Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan per bidang		75	112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min.		0,6
	Maks		1,2
Rongga dalam Campuran (%)	Min.		3,0
	Maks		5,0
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800	1800
Pelelehan (mm)	Min.	2	3
	Maks	4	6
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perndaman selama 24 jam, 60°C	Min.		90
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal (refusal)	Min.		2

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018

2.3 Nanomaterial

Nanomaterial merupakan material yang memiliki komposisi struktur partikel lebih kecil dari 1µm minimal dalam 1 dimensi. Nano partikel memiliki bentuk *amorphous* atau *crystalline* yang mana permukaannya dapat berfungsi sebagai carrier terhadap cairan droplets atau gas (Resentia, 2023). Terdapat 2 faktor yang menyebabkan nanomaterial berbeda dengan bulk material yaitu efek terhadap permukaan dan efek quantum. Efek permukaan menghasilkan ukuran sifat halus yang disebabkan oleh fraksi atom yang terdapat pada permukaan. Efek quantum menghasilkan pemutusan perilaku yang disebabkan oleh efek selubung quantum pada material dengan delokalisasi electron (Ramesh, 2009)



Gambar 2.1 Struktur Ikatan Nanomaterial

2.4 Graphene

Graphene adalah alotrop karbon yang berbentuk lembaran datar tipis di mana setiap atom karbon memiliki ikatan sp² dan dikemas seperti sarang lebah. Material ini dapat diandaikan sebagai suatu jaring-jaring berskala atom yang terdiri dari atom karbon beserta ikatannya. Jarak antara dua karbon terdekat pada *graphene* adalah sekitar 0,142 nm. *Graphene* merupakan struktur dasar dari alotrop karbon yang meliputi grafit, tabung nano karbon, dan fullerena. *Graphene* juga dapat dianggap sebagai molekul aromatik yang sangat besar. *Graphene* juga merupakan kelompok senyawa hidrokarbon polisiklik aromatik data (Dwandaru et al., 2019).

Graphene diklaim sebagai material paling kuat di dunia. Selembar logam *graphene* memiliki kekuatan sekitar 200 kali lebih kuat dari baja. Selain itu, *graphene* juga dikenal sebagai objek tertipis dan teringan di dunia dengan ketebalan hanya satu atom. Sebuah *graphene* berukuran 1meter persegi beratnya hanya 0,0077 gram, namun mampu mendukung hingga empat kilogram berat badan. Material ini dapat ditebuk, merenggang, transparan, dan tahan air. *Graphene* juga bisa mencegah korosi dan karat, bahkan *biodegradable*.

Penggunaan GO sebesar 3% sebagai bahan tambah dapat meningkatkan stabilitas termal dan juga dapat meningkatkan kinerja penuaan aspal. Disamping itu penggunaan GO dapat meningkatkan titik leleh dan viskositas (kekentalan aspal) dapat mencegah difusi oksigen dalam aspal. Kemudian GO dapat meningkatkan kinerja anti retak pada suhu rendah (Li et al., 2018).



Gambar 2.2 Struktur Grafena
Sumber : (www.lkons.id 2017)



Gambar 2.3 Graphene dispersi
Sumber : Maxlab

2.5 Karakteristik Marshall

Metode pengujian *Marshall* adalah suatu metode pengujian yang dilakukan untuk mengukur beban maksimum yang dapat dipikul benda uji sebelum hancur (*Marshall Stability*) dan deformasi permanen dari suatu benda uji sebelum hancur (*Marshall Flow*) serta turunannya yang merupakan perbandingan diantara keduanya yang disebut dengan *Marshall Quotient* (MQ) (Ngurah Widyantara et al., 2018).

Menurut Silvia Sukirman, karakteristik campuran aspal panas agregat aspal dapat diukur dengan sifat-sifat *Marshall* yang ditunjukkan pada nilai-nilai sebagai berikut:

a. *Density*

Density merupakan tingkat kerapatan campuran setelah dipadatkan. Semakin tinggi nilai *density* suatu campuran menunjukkan bahwa kerapatannya semakin baik. Campuran aspal dengan densitas yang tinggi cenderung memiliki kekuatan struktural yang lebih baik. Mereka mampu menahan tekanan dan beban yang lebih besar tanpa deformasi yang signifikan.

$$Density \text{ (gram/m}^3\text{)} = \frac{BKBU \text{ (gram)}}{VBU \text{ (m}^3\text{)}} = \quad (1)$$

Dimana :

Density : Kerapatan (gr/cm³)

BKBU : Berat Kering Benda Uji (gr)

VBU : Volume Benda Uji (gr)

b. Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan lapis keras untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang dan alur. Nilai stabilitas dipengaruhi oleh bentuk, kualitas, tekstur permukaan dan gradasi agregat yaitu gesekan antar butiran agregat dan penguncian antar agregat, daya lekat dan kadar aspal dalam campuran. Penggunaan aspal dalam campuran akan menentukan nilai stabilitas campuran tersebut. Penambahan aspal di atas batas maksimum justru akan menurunkan stabilitas campuran itu sendiri sehingga lapis perkerasan menjadi kaku dan bersifat getas, nilai stabilitas berpengaruh pada fleksibilitas lapis perkerasan yang dihasilkan. Berdasarkan bina marga tahun 2018 revisi 2 batas minimum untuk stabilitas pada campuran aspal AC-BC adalah 800 Kg.

Untuk mendapatkan nilai stabilitas dapat menggunakan rumus dibawah ini

$$S = P \times q \times r \quad (2)$$

Dimana :

S : Stabilitas (Kg)

P : Pembacaan arloji stabilitas

- q : Angka koreksi benda uji
 r : Nilai Kalibrasi alat *marshall*

c. *Void in the mineral aggregate (VMA)*

VMA adalah rongga udara antar butir agregat aspal padat, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif yang dinyatakan dalam persen terhadap total volume. Kuantitas rongga udara di pengaruhi terhadap kinerja suatu campuran karena jika VMA terlalu kecil maka campuran bisa mengalami masalah durabilitas dan jika VMA terlalu besar maka campuran akan memperlihatkan masalah stabilitas dan tidak ekonomis untuk produksi. Nilai VMA dipengaruhi oleh faktor pemadatan, yaitu data dan temperatur pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal. Nilai VMA ini berpengaruh pada sifat kekedapan campuran terhadap air dan udara serta sifat elastis campuran. Dapat juga dikatakan bahwa nilai VMA menentukan stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas. Nilai VMA pada spesifikasi bina marga tahun 2018 revisi 2 diisyaratkan adalah minimum 14%. Untuk menentukan nilai VMA dapat menggunakan rumus dibawah ini :

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} - P_s}{G_{sb}} \quad (3)$$

- Dimana :
 VMA : Rongga udara pada mineral agregat (%)
 G_{mb} : Berat jenis campuran setelah dipadatkan (gr/cc)
 P_s : Kadar agregat (%)
 G_{sb} : Berat jenis *bulk* agregat (gr/cc)

d. *Void in the mix (VIM)*

VIM merupakan persentase rongga yang terdapat dalam total campuran. Nilai VIM berpengaruh terhadap keawetan lapis perkerasan, semakin tinggi nilai VIM menunjukkan semakin besar rongga dalam campuran sehingga campuran bersifat porous. Hal ini mengakibatkan campuran menjadi kurang rapat sehingga air dan udara mudah memasuki rongga-rongga dalam campuran yang mengakibatkan aspal mudah teroksidasi sehingga menyebabkan lekatan antar butiran agregat berkurang sehingga terjadi pelepasan butiran dan pengelupasan permukaan pada lapis perkerasan. Pada spesifikasi bina marga 2018 revisi 2 syarat VIM pada campuran AC-BC adalah 3% - 5%. Untuk mendapatkan nilai VIM dapat menggunakan rumus dibawah ini:

$$VIM = \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \times 100 \quad (4)$$

- Dimana :
 G_{mb} : Berat jenis campuran maksimum pemadatan
 G_{mm} : Berat jenis campuran setelah pemadatan
 P_s : Kadar agregat (%)

e. *Void Filled with Asphalt* (VFA)

VFA merupakan persentase rongga terisi aspal pada campuran setelah mengalami proses pemadatan, yaitu jumlah dan temperatur pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal. Nilai VFA berpengaruh pada sifat kedapan campuran terhadap air dan udara serta sifat campuran elastisitas campuran. Dengan kata lain VFA menentukan stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas semakin tinggi nilai VFA berarti semakin banyak rongga dalam campuran yang terisi aspal sehingga kekedapan campuran terhadap air dan udara juga semakin tinggi, tetapi nilai VFA terlalu tinggi akan mengakibatkan bleeding. Nilai VFA yang terlalu kecil akan menyebabkan campuran kurang kedap terhadap air dan udara karena lapisan film aspal akan menjadi tipis dan akan mudah retak bila menerima penambahan beban sehingga campuran aspal mudah teroksidasi yang akhirnya menyebabkan lapis perkerasan tidak akan lama. Berdasarkan Bina marga tahun 2018 revisi 2 batas minimal untuk nilai VFA adalah 65%. Untuk menentukan nilai VFA dapat menggunakan rumus dibawah ini :

$$VFA = \frac{VMA - VIM}{VMA} \quad (5)$$

Dimana :

VFA : Rongga udara yang terisi aspal (%)

VMA : Rongga udara pada mineral agregat (%)

VIM : Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%)

f. *Flow* (kelelehan)

Flow menunjukkan deformasi benda uji akibat pembebanan (sampai beban atas). Nilai ini langsung dapat dibaca dari pembacaan arloji dalam satuan inch, kemudian harus dikonversikan lagi dalam satuan millimeter.

g. *Marshall Quotient* (MQ)

MQ adalah rasio antara stabilitas *marshall* dengan kepadatan campuran aspal ,MQ memberikan indikasi tentang kualitas relatif campuran aspal. Nilai dari *marshall quotient* diperoleh dengan rumus :

$$M = \frac{S}{R} \quad (6)$$

Dimana :

M : Nilai *marshall quotient* (Kg/mm)

S : Nilai Stabilitas (Kg)

R : Nilai *flow* (mm)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Hal pertama yang harus dilakukan dalam penelitian ini adalah menentukan kajian kepustakaan, mempersiapkan bahan dan peralatan yang akan digunakan dalam penelitian. Sebelum melaksanakan penelitian ini perlu dilakukan studi literatur mengenai penelitian ini, setelah studi literatur dirasa sudah cukup maka tahap selanjutnya adalah mempersiapkan material seperti agregat baik agregat kasar maupun agregat halus yang diambil dari PT. Abad Jaya Sentosa, Aceh Utara. Aspal penetrasi 60/70 yang diambil dari laboratorium Teknik Sipil Universitas Malikussaleh, semen Portland type 1 yang berfungsi sebagai filler dan variasi *graphene* yaitu 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04%, 0,05% yang berfungsi sebagai zat aditif pada penelitian ini. Tahap selanjutnya yaitu melakukan pengujian sifat fisis agregat kasar, agregat halus, pengujian sifat fisis material sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Pengujian analisis saringan dan berat jenis untuk mendapatkan nilai kadar aspal optimum (KAO), terlebih dahulu menghitung nilai *pb* untuk menentukan nilai kadar aspal tengahnya, selanjutnya pembuatan benda uji untuk memperoleh nilai kadar aspal optimum, kemudian uji *Marshall* dan hitung parameter *Marshall*. Durasi perendaman 24 jam lalu dilakukan uji *Marshall* pada benda uji. Setelah didapat hasil uji *Marshall* berupa stabilitas dan *flow*, kemudian hitung juga sifat volumetrik beton aspal yang meliputi *density*, VIM, VMA, dan VFA, kemudian didapat analisis dan pembahasan, kesimpulan dan selesai.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian dan nilai dari pengolahan data yang meliputi beberapa tahapan dimulai dari pemeriksaan sifat fisis pada agregat kasar dan halus, pembuatan benda uji KAO dan pengujian benda uji KAO sehingga didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Hasil pengujian *Marshall* standar campuran aspal beton AC-WC yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2.

4.1. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air

Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar dan agregat halus untuk mendapat hasil berat jenis bulk, berat jenis kering permukaan jenuh, berat jenis semu (apparent) dan penyerapan air (absorpsi) Agregat yang digunakan untuk membentuk beton aspal padat, memiliki gradasi tertentu yang biasanya diperoleh dari pencampuran beberapa agregat total yang terdiri dari atas fraksi-fraksi agregat kasar, agregat halus dan bahan pengisi yang masing-masing mempunyai berat jenis yang berbeda.

Tabel 4.1 Hasil pengujian Berat jenis dan penyerapan air

Pengujian	Hasil	Min	Max	Spek
Agregat Kasar Ukuran 3/4"				
Berat Jenis <i>Bulk</i> (Gr/cm ³)	2,64	2,5	-	M
Berat Jenis kering permukaan jenuh (Gr/cm ³)	2,68	2,5	-	M
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) (Gr/cm ³)	2,74	2,5	-	M

Penyerapan Air (absorpsi) (%)	1,3	-	3	M
Agregat Kasar Ukuran 3/8 "				
Berat Jenis <i>Bulk</i> (Gr/cm ³)	2,54	2,5	-	M
Berat Jenis kering permukaan jenuh (Gr/cm ³)	2,62	2,5	-	M
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) (Gr/cm ³)	2,76	2,5	-	M
Penyerapan Air (absorpsi) (%)	3	-	3	M
Agregat Halus Pasir				
Berat Jenis <i>Bulk</i> (Gr/cm ³)	2,50	2,5	-	M
Berat Jenis kering permukaan jenuh (Gr/cm ³)	2,55	2,5	-	M
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) (Gr/cm ³)	2,64	2,5	-	M
Penyerapan Air (absorpsi) (%)	2,0	-	3	M
Agregat Halus Dust				
Berat Jenis <i>Bulk</i> (Gr/cm ³)	2,55	2,5	-	M
Berat Jenis kering permukaan jenuh (Gr/cm ³)	2,61	2,5	-	M
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) (Gr/cm ³)	2,70	2,5	-	M
Penyerapan Air (absorpsi) (%)	2,0	-	3	M

4.2. Analisa Saringan

Pemeriksaan analisa saringan diperoleh untuk perencanaan campuran aspal. Analisa saringan dilakukan pada agregat halus berupa pasir dan dust serta agregat kasar berupa batu pecah 1/2" dan 3/8". Hasil pemeriksaan analisa saringan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil pemeriksaan Analisa saringan

No Saringan	Lolos Komulatif (%)				Tertahan Komulatif (%)			
	Jenis Agregat				Jenis Agregat			
	1/2	3/8	Dust	Pasir	1/2	3/8	Dust	Pasir
1"	100.00	100.00	100.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4 "	100.00	100.00	100.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
1/2 "	90.52	99.99	99.94	100.0	9.48	0.01	0.06	0.00
3/8 "	8.26	96.56	99.90	100.0	91.74	3.44	0.10	0.00
NO.4	0.03	13.12	99.68	99.9	99.97	86.88	0.32	0.11
NO.8	0.03	0.05	83.13	98.6	99.97	99.95	16.87	1.43
NO.30	0.01	0.03	32.13	20.1	99.99	99.97	67.87	79.88
NO.50	0.01	0.01	18.43	1.5	99.99	99.99	81.57	98.55
N0.100	0.01	0.01	6.88	1.1	99.99	99.99	93.12	98.94
N0.200	0.01	0.01	0.92	0.6	99.99	99.99	99.08	99.44
PAN	0.00	0.00	0.00	0.0	100.00	100.00	100.00	100.00

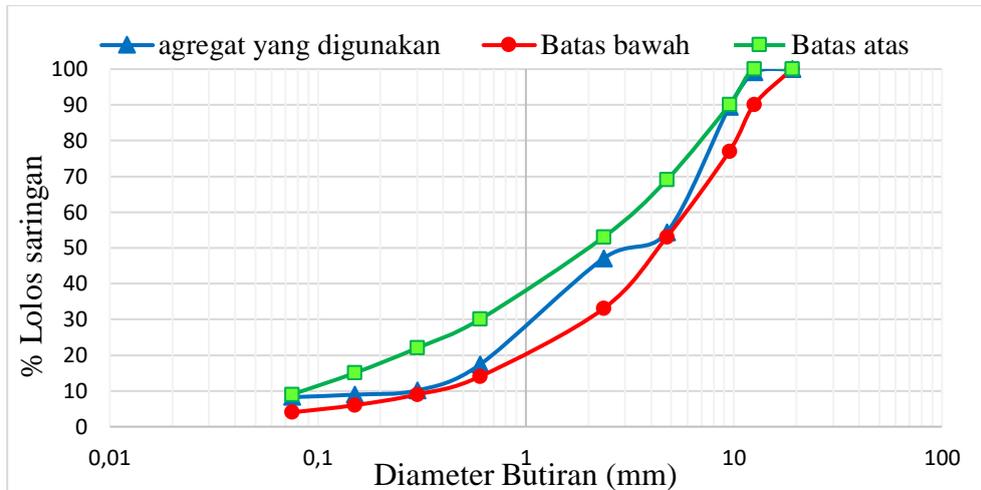
4.3. Perencanaan Mix Design AC-WC

Penentuan gradasi campuran adalah proses dimana pembuatan mix design dilakukan. Dari hasil pengujian analisa saringan diperoleh hasil agregat kasar batu pecah 3/4 dan 3/8, agregat halus pasir dan *dust* serta *filler* memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dan layak digunakan sebagai agregat pada campuran. Untuk penentuan gradasi campurannya diperlihatkan pada Tabel dibawah ini

Tabel 4.5 Mix Design Campuran Aspal AC-WC

Saringan	Ukuran (mm)	% Lolos					% Mix design					Spek Bina Marga 2018 Rev.2		
		CA	MA	Dust	Pasir	Filler	CA	MA	Dust	Pasir	Filler	Total mix	Min	Max
NO		10	41.00	9.00	32.00	8	10	41.00	9.00	32.00	8	100		
3/4	19	100	100	100	100	100	10	41.00	9.00	32.00	8	100	100	100
1/2	12.5	90.52	99.99	99.94	100.0	100	9.05	41.00	8.99	32.00	8	99.04	90.00	100
3/8	9.5	8.26	96.56	99.90	100.0	100	0.83	39.59	8.99	32.00	8	89.41	77.00	90.00
NO.4	4.75	0.03	13.12	99.68	99.89	100	0.00	5.38	8.97	31.96	8	54.32	53.00	69.00
NO.8	2.36	0.03	0.05	83.13	98.57	100	0.00	0.02	7.48	31.54	8	47.05	33.00	53.00
NO.30	0.6	0.01	0.03	32.13	20.12	100	0.00	0.01	2.89	6.44	8	17.34	14.00	30.00
NO.50	0.3	0.01	0.01	18.43	1.45	100	0.00	0.01	1.66	0.47	8	10.13	9.00	22.00
NO.100	0.15	0.01	0.01	6.88	1.06	100	0.00	0.01	0.62	0.34	8	8.96	6.00	15.00
NO.200	0.075	0.01	0.01	0.92	0.56	100	0.001	0.003	0.083	0.18	8	8.27	4.00	9.00

Dari Tabel 4.5 diperoleh proporsi fraksi agregat kasar (CA) yaitu 10%, fraksi agregat sedang (MA) yaitu 41 %, fraksi dust 9 %, fraksi pasir 32 %, filler 8 % sehingga total mix design masuk kedalam spesifikasi yang disyaratkan Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Grafik gradasi campuran agregat diperlihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Distribusi gradasi agregat campuran aspal AC-WC

4.4. Benda Uji

Pembuatan benda uji adalah tahap yang dilakukan setelah didapat komposisi campuran (*mix design*) dan penentuan kadar aspal tengah (*pb*). Tata cara pembuatan benda uji ini mengacu kepada Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Kadar aspal tengah (*pb*) diperoleh setelah didapatkan hasil persentase lolos saringan gradasi butiran agregat dengan proporsi campuran agregat kasar 51%, agregat halus 41% dan filler sebesar 8%. Perhitungan kadar aspal rencana bertujuan untuk menentukan nilai kadar aspal tengan (*Pb*) dengan cara empiris guna mendapatkan hasil tengah sebagai acuan untuk bervariasi aspal dalam menentukan kadar aspal optimum. Nilai dari kadar aspal tengah (*pb*) diperlihatkan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Kadar Aspal Rencana (*pb*)

Kadar Aspal Rencana				
I	II	III	IV	V
4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%

$$\begin{aligned}
 Pb &= 0,035 (\% CA) + 0,045 (\% FA) + 0,18 (\% FILLER) + K \\
 &= 0,035 (10\% + 41\%) + 0,045 (9\% + 32\%) + 0,18 (8\%) + 0,5 \\
 &= 5.5 \%
 \end{aligned}$$

4.5. Hasil Uji Marshall Untuk Nilai KAO

Hasil pengujian *Marshall* ini bertujuan untuk mencari kadar aspal optimum pada campuran aspal dari hasil penentuan kadar aspal tengah (Pb) dengan dilakukan pengujian pada beberapa variasi aspal dengan (Pb) sebagai acuannya. Variasi kadar aspal yang digunakan untuk pengujian KAO adalah 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, KAO harus memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 mengenai parameter *Marshall* yaitu VMA, VIM, VFA, Stabilitas, Flow, MQ.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Parameter Marshall

No	Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
1	Density (Gr/cm ³)	2.316	2.309	2.299	2.284	2.277
2	VMA (%)	13.01	13.67	14.46	15.43	16.09
3	VIM (%)	5.73	5.29	5.03	4.97	4.81
4	VFA (%)	56.15	61.63	65.27	68.60	76.92
5	Sabilitas (Kg)	1255.69	1405.85	1579.25	1635.20	1372.00
6	Flow (mm)	2.93	3.17	3.23	3.30	3.17
7	MQ (Kg/mm)	460.85	462.96	499.32	523.59	439.09

4.6. Hasil Uji Marshall Campuran aspal AC-WC dengan bahan Tambah *graphene*

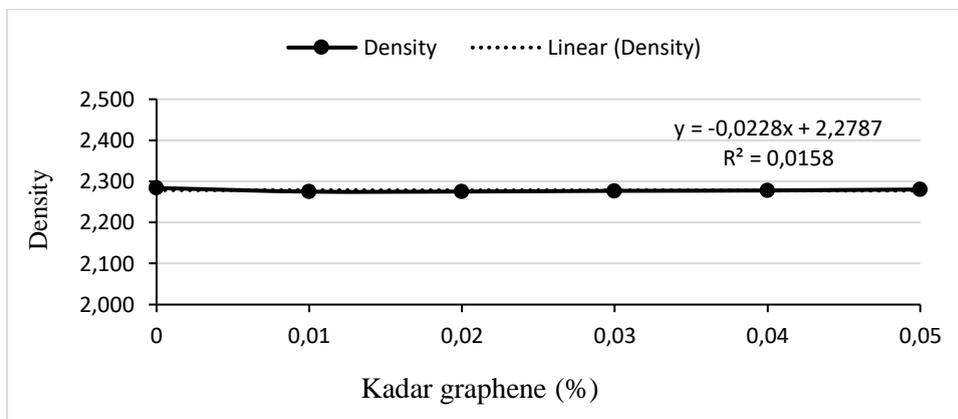
Berdasarkan hasil pengujian Marshall terhadap benda uji yang telah diberikan variasi *graphene* yaitu 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04%, 0,05% diperoleh hasil pengujian parameter Marshall di setiap variasi *graphene*. Nilai parameter pada setiap variasi akan mempengaruhi kinerja campuran aspal AC-WC. Hasil pengujian parameter Marshall dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Marshall AC-WC dengan bahan tambah *graphene*

No	Karakteristik Marshall	Satuan	Kadar <i>Graphene</i> (%)					
			0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
1	Density	Gr/cm ³	2.28	2.275	2.275	2.277	2.278	2.280
2	VMA	%	15.43	15.34	15.33	15.27	15.24	15.15
3	VIM	%	4.97	4.95	4.94	4.87	4.84	4.7
4	VFA	%	68.60	67.92	68.09	68.71	68.29	68.88
5	Sabilitas	Kg	1635.20	1649.8	1683.3	1875.8	1902.0	1681.5
6	Flow	Mm	3.30	3.47	3.63	3.70	3.87	3.50
7	MQ	Kg/mm	523.59	524.1	529.4	530.3	539.4	521.4

1. Density

Nilai *Density* yang tinggi pada campuran aspal menunjukkan Tingkat kerapatan suatu campuran perkerasan agregat dan aspal, semakin tinggi density maka semakin rapat campuran tersebut. jumlah rongga udara yang lebih sedikit, yang berarti material tersebut lebih padat dan kuat. Pada penelitian ini penggunaan *graphene* mempengaruhi nilai *density* pada campuran aspal AC-WC walaupun tidak signifikan. Kenaikan rata-rata nilai *density* ketika ditambahkan *graphene* adalah sebesar 0,30% terhadap aspal kontrol, hal ini dapat terjadi karena *graphene* memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi dan modulus elastisitas yang besar. Saat ditambahkan ke campuran aspal, *graphene* dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan campuran, sehingga membuatnya lebih padat dan tahan terhadap beban berat. Selain itu *graphene* dapat membantu mengisi rongga-rongga mikro dalam campuran aspal, mengurangi jumlah udara yang terperangkap dan meningkatkan densitas material. Ini menghasilkan campuran yang lebih padat dan homogen.

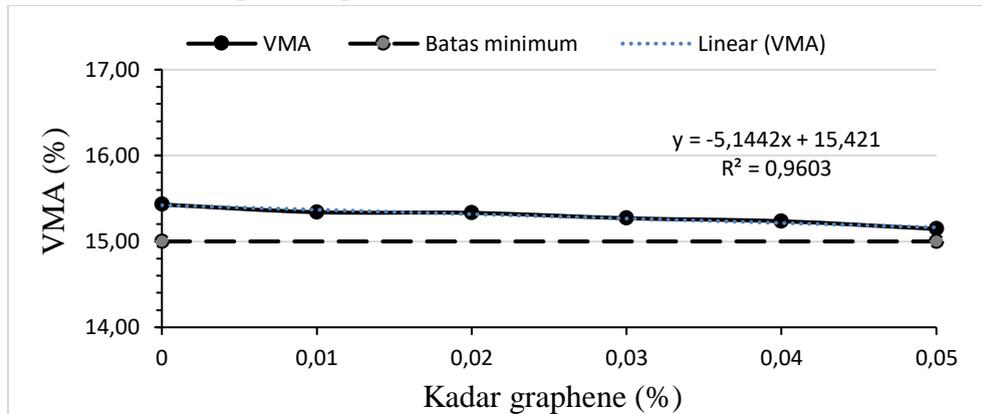


Gambar 4. 2 pengaruh *graphene* terhadap *density*

2. Void Mineral Aggregate (VMA)

VMA adalah parameter penting dalam desain campuran aspal yang mengukur volume ruang kosong di antara partikel agregat dalam campuran. VMA dinyatakan sebagai persentase dari volume total campuran. VMA memberikan indikasi ruang yang tersedia untuk diisi oleh aspal dan udara setelah proses pemadatan. Pada penelitian ini dengan penambahan *graphene* nilai VMA pada campuran aspal mengalami penurunan rata-rata yaitu sebesar 1,07% terhadap campuran aspal kontrol. Penurunan VMA ketika menambahkan *graphene* ke dalam campuran aspal disebabkan oleh beberapa faktor yang saling berkaitan, termasuk peningkatan kepadatan, pengisian rongga mikro, interaksi kimia dengan binder aspal, modifikasi struktur mikro, serta peningkatan kohesi dan stabilitas campuran. Semua faktor ini berkontribusi untuk mengurangi volume rongga udara dalam campuran, yang mengarah pada penurunan VMA dan peningkatan kinerja keseluruhan dari perkerasan jalan. Berdasarkan hasil

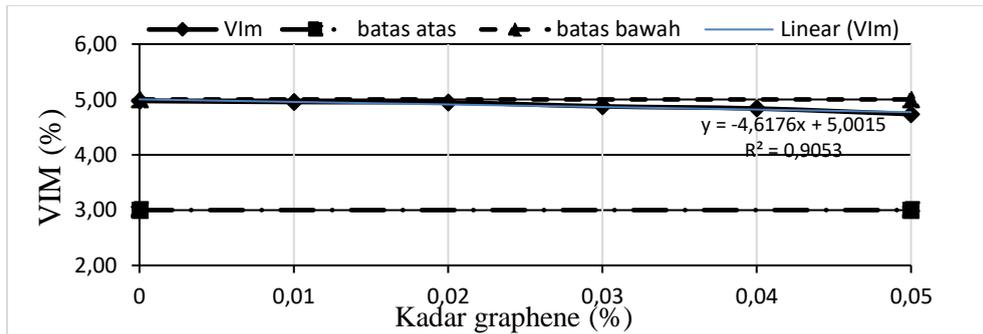
penelitian seluruh nilai VMA pada setiap variasi *graphene* memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk campuran aspal AC-WC.



Gambar 4. 3 pengaruh *graphene* terhadap VMA

3. Void in The Mix (VIM)

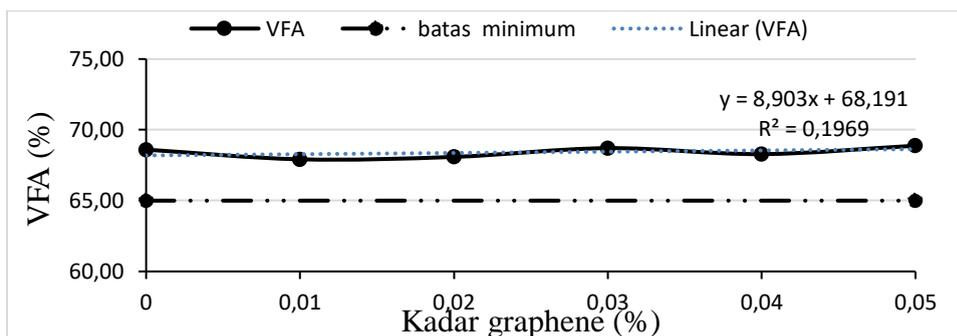
VIM adalah parameter penting dalam menentukan kualitas dan kinerja campuran aspal, termasuk yang dimodifikasi dengan *graphene*. Penambahan *graphene* dapat mengurangi VIM dengan meningkatkan kepadatan campuran, mengisi rongga-rongga mikro, dan meningkatkan interaksi antara agregat dan binder. Mengontrol VIM secara tepat penting untuk memastikan durabilitas, stabilitas, dan kinerja jangka panjang dari perkerasan jalan. Berdasarkan penelitian ini nilai VIM pada campuran aspal AC-WC dengan bahan tambah *graphene* mengalami penurunan dari aspal kontrol rata-rata sebesar 2,10%. Hal ini dapat terjadi karena *graphene* jika ditambahkan dalam jumlah yang tepat dan tersebar secara merata dalam matriks aspal dapat membantu mengisi ruang pori diantara agregat mineral. Penambahan *graphene* ke dalam campuran aspal dapat mempengaruhi VIM atau rongga dalam campuran dengan cara yang signifikan. *Graphene* dengan sifatnya yang sangat halus dan berukuran nano, dapat membantu mengisi rongga-rongga kecil di dalam campuran aspal yang biasanya diisi oleh udara. Partikel *graphene* dapat masuk ke dalam ruang-ruang mikro di antara partikel agregat dan binder aspal, sehingga mengurangi volume total rongga udara yang ada dalam campuran. Ini mengakibatkan penurunan VIM, yang berarti campuran menjadi lebih padat dan kompak. Nilai VIM pada penelitian ini memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.



Gambar 4. 4 pengaruh *graphene* terhadap VIM

4. Void Filled With Asphalt (VFA)

VFA adalah salah satu parameter penting dalam desain campuran aspal karena pengisi ruang kosong yang baik dapat meningkatkan ketahanan pada campuran. Berdasarkan hasil penelitian ini yang diperoleh menunjukkan bahwa pengaruh penggunaan *graphene* sebagai bahan tambah terhadap campuran aspal AC-WC dapat meningkatkan nilai rata-rata VFA terhadap aspal kontrol sebesar 0,55%. Hal ini dapat terjadi karena dalam campuran aspal dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk peningkatan kadar aspal, penggunaan agregat dengan gradasi yang tepat, pengurangan rongga udara melalui pemadatan yang efektif, sifat material aspal yang baik, penambahan bahan aditif, desain campuran yang tepat, dan kondisi pencampuran yang optimal. Berdasarkan hasil penelitian, seluruh nilai VFA pada setiap variasi *graphene* memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk campuran aspal AC-WC, yaitu nilai minimum sebesar 65%. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *graphene* tidak hanya meningkatkan nilai VFA tetapi juga memenuhi standar yang telah ditetapkan, memastikan bahwa campuran aspal yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik dan memenuhi persyaratan teknis yang diperlukan untuk aplikasi di lapangan. Dengan demikian, penggunaan *graphene* sebagai bahan tambah dalam campuran aspal dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan kinerja dan umur layan jalan raya.



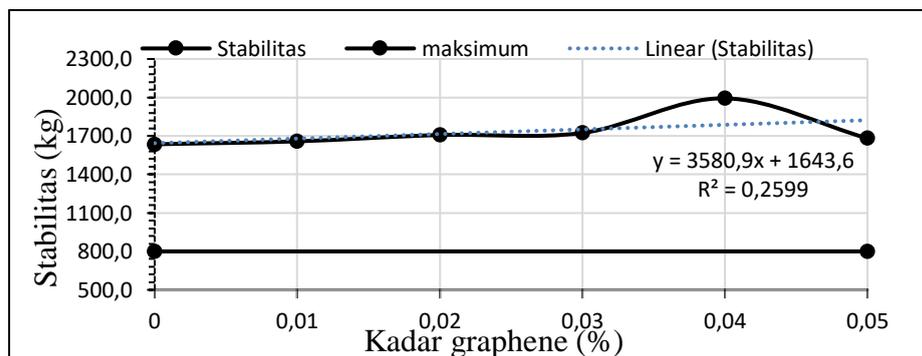
Gambar 4.5 pengaruh *graphene* terhadap VFA

5. Stabilitas

Stabilitas pada aspal mengacu pada kemampuan campuran aspal untuk menahan perubahan bentuk di bawah beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang berubah. Stabilitas ini merupakan salah satu parameter kunci dalam mengevaluasi kualitas dan kinerja campuran aspal. Berdasarkan hasil penelitian yang didapat menunjukkan bahwa penambahan *graphene* terhadap campuran aspal AC-WC mengalami peningkatan nilai stabilitas aspal AC-WC dengan nilai optimum berada di variasi 0,04%, namun pada variasi 0,05% campuran aspal mengalami penurunan walaupun tidak signifikan karena *graphene* memiliki kecenderungan untuk beragregasi atau menggumpal jika ditambahkan dalam jumlah yang berlebihan. Agregasi ini dapat mengurangi dispersibilitas *graphene* dalam campuran aspal, sehingga mengurangi efektivitasnya dalam meningkatkan sifat mekanik campuran. Rata-rata peningkatan nilai stabilitas yaitu sebesar 7,19% terhadap aspal kontrol. Hal ini dapat terjadi karena *graphene* memiliki modulus elastisitas yang sangat tinggi, ketika ditambahkan ke dalam campuran aspal, *graphene* dapat meningkatkan modulus elastisitas campuran, membuatnya lebih tahan terhadap beban lalu lintas. Ini berkontribusi pada peningkatan stabilitas campuran aspal. Pada penelitian ini nilai stabilitas memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 4.6 Pengaruh *graphene* pada stabilitas campuran AC-WC

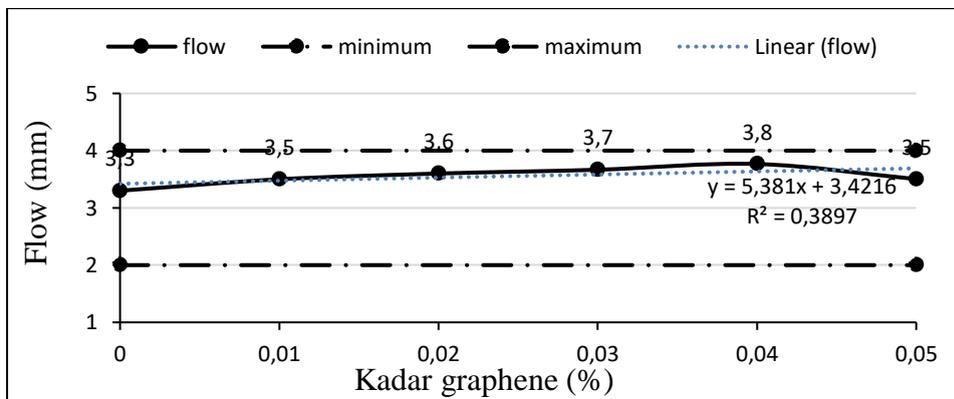
<i>Graphene</i> (%)	Selisih hasil pengujian dengan variasi (kg)	Pengaruh pengujian dengan variasi (%)	Selisih benda dengan kontrol (kg)	Pengaruh benda uji dengan control (%)
0	0.00	0	0.00	0.00
0.01	22.80	1.37	22.80	1.39
0.02	49.41	2.89	72.20	4.42
0.03	15.93	0.92	88.13	5.39
0.04	269.94	13.54	358.07	21.90
0.05	311.75	18.54	46.32	2.83
Rata-Rata	133.96	7.46	117.50	7.19



Gambar 4. 6 pengaruh *graphene* terhadap stabilitas

6. *flow*

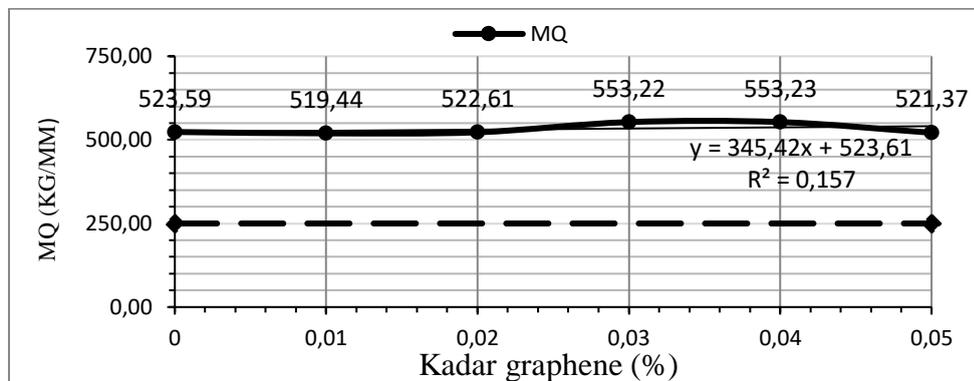
Flow yang baik menunjukkan bahwa campuran aspal memiliki konsistensi yang sesuai untuk proses pencampuran dan pengecoran di lapangan. Campuran yang terlalu kental atau terlalu cair dapat menyulitkan dalam proses pengangkutan, pencampuran, dan penyebaran campuran. Berdasarkan penelitian ini nilai *flow* pada campuran aspal AC-WC mengalami peningkatan Ketika ditambahkan *graphene*, peningkatan rata-rata nilai *flow* terhadap aspal control adalah sebesar 9,31%, dimana peningkatan tertinggi terjadi pada variasi 0,04% dengan nilai *flow* sebesar 3,77 mm, hal ini dapat terjadi karena penambahan *graphene* ke dalam campuran aspal dapat mengurangi viskositas aspal, terutama pada suhu tinggi. Viskositas yang lebih rendah membuat aspal lebih mudah mengalir dan menyebabkan campuran aspal menjadi lebih cair. Hal ini menyebabkan peningkatan *flow* campuran secara keseluruhan.



Gambar 4. 7 pengaruh *graphene* terhadap *flow*

7. *Marshall Quotient (MQ)*

MQ adalah parameter penting dalam desain perkerasan jalan karena mempengaruhi kinerja struktural dan fungsional perkerasan. Penambahan *graphene* pada campuran aspal dapat secara signifikan meningkatkan *MQ* dengan meningkatkan stabilitas campuran dan meningkatkan *flow*. Hal ini terjadi karena sifat mekanis superior *graphene*, peningkatan adhesi dan kohesi, distribusi beban yang lebih baik, dan peningkatan kepadatan campuran. Penggunaan *graphene* dalam campuran aspal dapat menghasilkan campuran yang lebih kaku dan tahan lama, yang mampu menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang berat. Namun, penting untuk mengoptimalkan proporsi *graphene* dalam campuran untuk memastikan kinerja yang maksimal. Nilai *MQ* pada penelitian ini mengalami peningkatan, sama halnya dengan yang terjadi pada stabilitas. Peningkatan nilai *MQ* rata-rata sebesar 10,39% terhadap aspal kontrol.



Gambar 4. 8 pengaruh graphene terhadap MQ

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan didapatkan bahwa *graphene* dapat mempengaruhi karakteristik *marshall* campuran AC-WC, dimana *graphene* meningkatkan nilai stabilitas, flow dan MQ dengan kadar optimum didapat pada variasi *graphene* 0,04%, kemudian nilai VFA meningkat seiring ditambahkan *graphene*. Sedangkan untuk nilai VIM, VMA mengalami penurunan seiring ditambahkan *graphene*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *graphene* dapat menjadi bahan aditif yang efektif dalam meningkatkan kualitas dan daya tahan jalan aspal.

5.2 Saran

Berdasarkan dari hasil dan pembahasan penggunaan *graphene* sebagai bahan tambah pada campuran aspal *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC), maka dapat dikemukakan beberapa saran sebagai berikut :

1. Untuk pengujian selanjutnya dapat dikembangkan dengan meneliti pengaruh reaksi kimia pada *graphene* terhadap campuran aspal.
2. Dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan nanomaterial yang berbeda pada campuran aspal AC-WC

DAFTAR PUSTAKA

- Arthono, A., & Pransiska, D. A. (2022). Perencanaan Perkerasan Lentur Jalan Raya Menggunakan Metode Sni1932-1989-F Dibandingkan Dengan Menggunakan Metode Aastho 1993, Pada Ruas Jalan Raya Rangkasbitung - Citeras. *Jurnal UMJ*, November 2022, 1-12.
- Bulgis, B., & Alkam, R. B. (2017). Pemanfaatan Agregat Alami Dan Agregat Batu Pecah Sebagai Material Perkerasan Pada Campuran Aspal Beton. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 19(1), 23-32. <https://doi.org/10.35313/potensi.v19i1.530>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum 2018 (REVISI 2). *Edaran Dirjen Bina*
- SISFO : Jurnal Ilmiah Sistem Informasi. Vol 8, No 1 (2024)

Marga Nomor 02/SE/Db/2018, Revisi 2, 6.1-6.104.

- Du, S., Tang, Z., Zhong, J., Ge, Y., & Shi, X. (2019). Effect of admixing graphene oxide on abrasion resistance of ordinary portland cement concrete. In *AIP Advances* (Vol. 9, Issue 10). <https://doi.org/10.1063/1.5124388>
- Dwandaru, W. S. B., Wijaya, R. I. W., & Parwati, L. D. (2019). *Nanomaterial Graphene Oxide Sintesis dan Karakterisasinya*.
- Hamirhan Saodan. (2005). Kontruksi Jalan Raya. In *Nova Bandung* (Issue April).
- Hamzah, R. A., Kaseke, O. H., & Manopo, M. M. (2016). "Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi Terhadap Kriteria Marshall Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lapis Tipis Aspal Beton - Lapis Aus Gradasi Senjang." *Jurnal Sipil Statik*, 4(7), 447-452.
- Jyothirmmai, B., Haritha Kiranmai, M., & Vagdevi, K. (2020). Graphene reinforces asphalt - Doubles durability of road. *AIP Conference Proceedings*, 2269(October). <https://doi.org/10.1063/5.0019643>
- Kasan, M. (2009). Karakteristik Stabilitas dan Stabilitas Sisa Campuran Beton Aspal Daur Ulang. *Mektek*, 11(2), 134-146.
- Li, Y., Wu, S., & Amirkhanian, S. (2018a). Effects of graphene oxide on asphalt binders. In *Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00010-4>
- Li, Y., Wu, S., & Amirkhanian, S. (2018b). Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials*, 165, 572-584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.068>
- Maal, A., Saleh Pallu, M., Ali, N., & Ramli, I. (2017). Kinerja struktural, Durabilitas Dan Ketahanan Terhadap Deformasi Plastis Aspal Beton menggunakan bubuk Botol Plastik Sebagai Filler. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 127-136.
- Mashuri, M., & Rahman, R. (2020). Pengaruh Penuaan Aspal Pada Karakteristik Campuran Beton Aspal Lapis Aus AC - WC. *Rekonstruksi tadulako: civil engineering journal on research and Development*, 47-56. <https://doi.org/10.22487/renstra.v1i2.30>
- Ngurah Widyantara, I. G., Budi Suparma, L., & Muthohar, I. (2018). Stabilitas Marshall Dan Ketahanan Deformasi Warm Mix Asphalt Menggunakan Aditif Zycotherm. *INERSIA: LNformasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 14(1), 48-61. <https://doi.org/10.21831/inersia.v14i1.19494>
- Ramesh, K. T. (2009). Nanomaterials: Mechanics and mechanisms. *Nanomaterials: Mechanics and Mechanisms*, 1-316. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09783-1>
- Raufi, H., Topal, A., Sengoz, B., & Kaya, D. (2020). Assessment of asphalt binders and hot mix asphalt modified with nanomaterials. In *Periodica Polytechnica Civil Engineering* (Vol. 64, Issue 1, pp. 1-13). <https://doi.org/10.3311/PPci.14487>
- Resentia, N. K. (2023). jurnal teoritis dan penerapan rekaya sipil Pengaruh Penambahan Nano Silika terhadap Volumetrik dengan Metode Pemadatan Marshall dan Superpave pada Campuran Beraspal Ac - Wc. 30(1), 71-78. <https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.1.9>

- Suhardi, Pratomo, P., & Ali, H. (2016). Study of Marshall Characteristics due to Asphalt Mixture with the Addition of Plastic Bottle Waste. *Journal of Civil Engineering and Design*, 4(2), 284–293.
- Sukirman, S. (2003). Beton Aspal Campuran Panas. In *Granit Yayasan Obor Indonesia*. (Vol. 53, Issue 9).
- Sumiati, & Sukarman. (2019). Pengaruh gradasi agregat terhadap nilai karakteristik aspal beton (ac-bc). *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*, 2(1), 27. <https://doi.org/10.32662/gojise.v2i1.524>
- Syarwan, Ar, S., & Hazmi, F. (2013). Kajian Gradasi Agregat Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) Terhadap Nilai Parameter Marshall Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2010 (Study of Aggregate Gradation of Wear Coated Asphalt Concrete (AC-WC) Against Marshall Parameter Values Based on Highways . *REINTEK Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Terapan*, 8(2), 149–155.
- Zhang, X., He, J. X., Huang, G., Zhou, C., Feng, M. M., & Li, Y. (2019). Preparation and characteristics of Ethylene Bis(Stearamide)-based graphene-modified asphalt. *Materials*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/ma12050757>
- Zhou, X. (2019). *Graphene-Modified Asphalt*. 7, 199–223.
- Zhu, J., Zhang, K., Liu, K., & Shi, X. (2019). Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide. In *Construction and Building Materials* (Vol. 217, pp. 273–282). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.054>