

KARAKTERISITIK MARSHALL CAMPURAN ASPAL AC-WC DENGAN BAHAN TAMBAH GRAPHENE YANG DIPAPAR PADA AMBIENT TEMPERATURE

Wahyu Pulungan¹, Said Jalalul Akbar², Maizuar³

^{1,2,3} Program Studi/Jurusan/Fakultas, Perguruan Tinggi

e-mail: *¹ wahyu.210110179@mhs.unimal.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Peningkatan suhu permukaan bumi dan kondisi iklim tropis yang fluktuatif dapat mempercepat penuaan aspal dan menurunkan performa perkerasan jalan, khususnya pada lapisan Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC). Salah satu pendekatan untuk mengurangi dampak ini adalah penambahan graphene , nanomaterial yang mampu meningkatkan ikatan antara aspal dan agregat. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh graphene sebesar 0,04% terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC yang dipaparkan pada ambient temperature dengan suhu rata-rata harian 27°C (23,9–31,8°C) dan kelembapan rata-rata 87,93%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan graphene mempertahankan stabilitas lebih lama dibanding campuran normal, dengan peningkatan awal hingga 12,87%, sedangkan flow meningkat 15,68% secara bertahap dengan laju lebih rendah, dan Marshall quotient lebih tinggi pada awal hingga pertengahan pemaparan. Penambahan graphene secara keseluruhan memperlambat degradasi campuran AC-WC akibat fluktuasi suhu dan kelembapan tinggi, sehingga meningkatkan ketahanan dan ketegaran struktural campuran pada kondisi tropis.

Kata kunci : Peningkatan suhu, AC-WC, graphene , ambient temperature , Marshall .

Abstract

The rise in Earth's surface temperature and fluctuating tropical climate can accelerate asphalt aging and reduce pavement performance, particularly in the Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) layer. One approach to mitigate this effect is the addition of graphene , a nanomaterial that enhances the bonding between asphalt and aggregates. This study evaluates the effect of 0.04% graphene on the Marshall characteristics of AC-WC mixtures exposed to ambient temperature with an average daily temperature of 27°C (23.9–31.8°C) and an average humidity of 87.93%. The results show that mixtures with graphene maintain stability longer than normal mixtures, with an initial increase of up to 12.87%, while flow increases gradually by 15.68% at a slower rate, and the Marshall quotient is higher from the beginning to mid-exposure. Overall, the addition of graphene slows the degradation of AC-WC mixtures under fluctuating temperature and high humidity, improving the durability and structural stiffness of the mixture under tropical conditions.

Keywords : Temperature rise, AC-WC, graphene , ambient temperature , Marshall .

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan fenomena pergeseran pola cuaca global yang ditandai oleh peningkatan frekuensi kejadian ekstrem, perubahan pola curah hujan, serta naiknya suhu rata-rata tahunan. Fenomena ini terutama dipicu oleh pemanasan global akibat akumulasi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida, di

atmosfer (Le Quéré et al., 2018). Di wilayah tropis seperti Indonesia, tren peningkatan suhu ini semakin jelas terlihat. Data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika menunjukkan bahwa suhu rata-rata nasional meningkat dari 26,6°C pada 2011 menjadi 27,5°C pada 2024, dengan fluktuasi harian mencapai 21°C hingga 35,3°C. Ketidakstabilan suhu tersebut berpotensi

History of article:

Received: 2025-09-20, Revised: 2025-12-10, Published: 2026-01-08

memengaruhi ketahanan material infrastruktur, termasuk campuran aspal.

Campuran aspal dikenal sensitif terhadap suhu. Kenaikan suhu dapat menyebabkan penurunan kohesi, kekakuan, dan kekuatan campuran. Suhu di atas 30°C dapat mempercepat deformasi plastis (*rutting*) pada lapisan perkerasan karena perubahan viskositas aspal yang menjadi lebih lunak (K. Zhang et al., 2023). Hal ini memengaruhi stabilitas dan *flow*, dua parameter utama dalam uji *Marshall*, serta menurunkan durabilitas campuran aspal (Asmawi, 2020). Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai inovasi telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan nanomaterial seperti *graphene*.

Graphene, yang dikenal memiliki kekuatan tarik tinggi, konduktivitas termal baik, dan struktur berlapis dua dimensi, terbukti dapat meningkatkan performa campuran aspal terhadap suhu tinggi. Penambahan *graphene* dalam campuran AC-WC dapat meningkatkan nilai stabilitas sebesar 7,54% dan *flow* sebesar 10,12% (Annura et al., 2024). *Graphene* juga mampu memperbaiki *Marshall* quotient, menandakan peningkatan keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan. Kombinasi *graphene oxide* dan polimer bahkan dilaporkan mampu menurunkan deformasi plastis hingga 76% dan meningkatkan kekuatan sebesar 20,7% (Guo et al., 2025).

Namun, sebagian besar studi sebelumnya hanya menguji performa aspal termodifikasi *graphene* dalam kondisi laboratorium, tanpa mempertimbangkan efek jangka panjang dari paparan suhu dan kelembapan lingkungan nyata. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa campuran aspal AC-WC dengan penambahan *graphene* sebesar 0,04% yang dipaparkan pada kondisi *ambient temperature* tropis selama 90 hari. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis perubahan parameter *Marshall* (stabilitas, *flow*, dan MQ) terhadap durasi paparan, serta menilai kelayakannya berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi empiris dalam perencanaan jalan yang adaptif terhadap perubahan iklim di Indonesia.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan berupa aspal penetrasi 60/70, agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran 3/4" dan 3/8", agregat halus berupa pasir dan abu batu, filler berupa semen Portland tipe I, serta bahan tambahan nanomaterial berupa *graphene* dengan konsentrasi 0,04% dari berat aspal. Seluruh agregat diuji sifat fisiknya untuk memastikan kesesuaian dengan

standar yang berlaku pada campuran aspal. Pengujian sifat fisik agregat kasar mencakup berat jenis, daya serap air, bobot isi untuk masing-masing ukuran, serta analisis saringan, sedangkan agregat halus diuji meliputi bobot isi, kadar air, berat jenis, dan analisis saringan. Desain campuran dilakukan setelah semua parameter memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018). Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan dengan terlebih dahulu menggunakan campuran aspal biasa sebagai acuan, kemudian kadar tersebut diterapkan pada campuran yang mengandung *graphene* 0,04%.

Pembuatan spesimen dimulai dengan pengeringan dan pemanasan agregat kasar, agregat halus, dan filler hingga 150°C, sementara aspal dipanaskan sebelum dicampur dengan *graphene*. Setelah agregat mencapai suhu 150°C, campuran agregat dan filler dicampur dengan aspal yang sudah dimodifikasi *graphene* hingga homogen. Setiap spesimen terdiri dari total 1200 gram campuran agregat dan filler. Campuran kemudian ditempatkan ke dalam cetakan dan dipadatkan menggunakan *Marshall* compactor sebanyak 2x75 pukulan pada suhu 145°C. Setelah pemadatan selesai, spesimen didinginkan, dikeluarkan dari cetakan, diberi tanda, dan ketebalannya diukur dengan jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm.

Setelah itu, benda uji ditempatkan di bawah kondisi *ambient temperature* sesuai dengan variasi lama paparan yaitu 0, 15, 30, 45, 60, 75, dan 90 hari. Setelah periode paparan selesai, spesimen direndam dalam air selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian *Marshall*. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai kepadatan, stabilitas, *flow*, *Marshall* quotient (MQ), VIM, VMA dan VFA. Hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk menilai pengaruh *graphene* dan lama paparan *ambient temperature* terhadap karakteristik campuran AC-WC, serta membandingkan performa antara campuran aspal biasa dan campuran *graphene*.

Dalam pengujian *Marshall*, beberapa parameter utama dihitung untuk menilai kinerja campuran aspal terhadap beban lalu lintas. Parameter tersebut meliputi stabilitas, *flow*, *Marshall* Quotient (MQ), density, Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Mix (VIM), dan Void Filled with Asphalt (VFA). Setiap parameter dihitung berdasarkan rumus standar yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

1. Stabilitas (Stability)

Stabilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk menahan beban maksimum sebelum terjadi deformasi plastis. Nilai stabilitas diperoleh langsung dari alat uji *Marshall* Stability Testing Machine, yaitu beban

maksimum (dalam kilogram) yang dapat diterima benda uji pada suhu 60°C hingga titik keruntuhan.

$$S = P \times o \quad (1)$$

Dimana

- S = Stabilitas (Kg)
- P = Pembacaan arloji stabilitas (Kg)
- o = Faktor koreksi tebal benda uji

Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap deformasi akibat beban lalu lintas berat.

2. Flow

Flow adalah besarnya perubahan bentuk vertikal benda uji pada saat mencapai beban maksimum. Nilainya ditunjukkan oleh dial flow pada alat Marshall dalam satuan milimeter (mm).

$$R = \text{Nilai arloji flow pada Marshall (mm)} \quad (2)$$

Parameter ini menggambarkan keplastisan campuran. Flow yang terlalu rendah menandakan campuran kaku, sedangkan terlalu tinggi menandakan campuran terlalu lunak.

3. Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient merupakan rasio antara stabilitas terhadap flow, yang menunjukkan tingkat kekakuan atau ketahanan campuran terhadap deformasi permanen.

$$MQ = \frac{S}{R} \quad (3)$$

Dimana:

- M = Nilai *Marshall quotient* (Kg/mm)
- S = Nilai stabilitas (Kg)
- R = Nilai *flow* (mm)

Nilai MQ yang besar menunjukkan campuran aspal yang kaku dan stabil, namun nilai yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi rapuh.

4. Berat Jenis Bulk (Density)

Density atau berat jenis bulk campuran dihitung berdasarkan perbandingan antara berat benda uji di udara dengan selisih berat di udara dan di air.

Nilai density yang tinggi menunjukkan campuran lebih padat dan memiliki porositas rendah, yang berpengaruh terhadap durabilitas perkerasan.

5. Void in Mineral Aggregate (VMA)

VMA adalah volume rongga di antara butiran agregat dalam satuan persen terhadap total volume campuran, termasuk rongga yang diisi aspal dan udara.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (5)$$

Dimana:

- VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%)
- Gmb = BJ campuran setelah dipadatkan (gr/cc)
- Ps = Kadar agregat (%)
- Gsb = Berat jenis bulk agregat (gr/cc)

VMA yang cukup besar memungkinkan lapisan film aspal menutupi agregat dengan baik, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap keausan dan retak.

6. Void in Mix (VIM)

VIM atau rongga udara dalam campuran adalah persentase volume udara terhadap total volume benda uji. Rumusnya sebagai berikut:

$$VIM = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (6)$$

Dimana:

- VIM = Volume rongga dalam beton aspal padat (%)
- Gmm = BJ beton aspal sebelum dipadatkan (gr/cm³)
- Gmb = Berat jenis bulk dari beton aspal padat (gr/cm³)

VIM penting untuk menjaga keseimbangan antara stabilitas dan durabilitas. Nilai VIM yang terlalu kecil membuat aspal mudah bleeding, sedangkan terlalu besar membuat campuran mudah retak.

7. Void Filled with Asphalt (VFA)

VFA adalah persentase rongga dalam agregat (VMA) yang terisi oleh aspal. Nilainya dihitung dengan rumus:

$$VFA = 100 \times \frac{(VMA - VIM)}{VMA} \quad (7)$$

Dimana:

- VFA = Rongga terisi aspal (%)
- VMA = Rongga di antara mineral agergat (%)
- VIM = Rongga udara campuran (%)

Nilai VFA yang sesuai menunjukkan keseimbangan ideal antara kekosongan udara dan jumlah aspal yang mengisi rongga agregat. Nilai terlalu rendah menyebabkan kurangnya pengikatan, sedangkan terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perencanaan Kadar Aspal Optimum

Kadar aspal untuk sampel uji ditetapkan terlebih dahulu. Pembuatan sampel mengikuti pedoman SNI dan Spesifikasi Umum Pekerjaan Jalan dan Jembatan 2018. Berdasarkan analisis saringan, komposisi material adalah agregat kasar 46%, agregat halus 52%, dan filler 2%. Kadar aspal rencana dihitung sebesar 5,31% dan dibulatkan menjadi 5,5% sebagai acuan pembuatan benda uji untuk menentukan kadar aspal optimum, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perencanaan kadar aspal optimum
Kadar Aspal Rencana

Kadar Aspal Rencana				
I	II	III	IV	V
4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%

Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

Berdasarkan kadar aspal rencana, proporsi campuran dihitung untuk variasi kadar aspal 4,5% hingga 6,5% dengan interval 0,5%. Berat aspal untuk total campuran 1.200 gram adalah 54 g (4,5%), 60 g (5,0%), 66 g (5,5%), 72 g (6,0%), dan 78 g (6,5%). Sisa berat campuran dibagi ke agregat kasar, agregat halus, dan filler sesuai komposisi 46%, 52%, dan 2%, dengan cara mengurangkan berat aspal dari total campuran kemudian dikalikan persentase masing-masing fraksi. Tabel 2 memperlihatkan komposisi lengkap untuk seluruh variasi kadar aspal.

Tabel 2. Komposisi campuran penentuan kadar aspal optimum

No	Persentase aspal (%)	Material (gram)					
		CA	MA	Dust	Pasir	Filler	Aspal
1	4,5	194,82	332,34	424,02	171,90	22,92	54,00
2	5,0	193,80	330,60	421,80	171,00	22,80	60,00
3	5,5	192,78	328,86	419,58	170,10	22,68	66,00
4	6,0	191,76	327,12	417,36	169,20	22,56	72,00
5	6,5	190,74	325,38	415,14	168,30	22,44	78,00

Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

Hasil pengujian *Marshall* untuk berbagai kadar aspal ditampilkan pada Tabel 3. Tabel ini memperlihatkan variasi setiap parameter—densitas, stabilitas, *flow*, MQ, VMA, VIM, dan VFA—pada tiap kadar aspal serta kesesuaiannya dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Dari data ini dapat dilihat kadar aspal di

mana setiap parameter memenuhi atau tidak memenuhi persyaratan, sehingga memberikan indikasi kadar aspal optimum untuk mencapai kinerja campuran yang diharapkan.

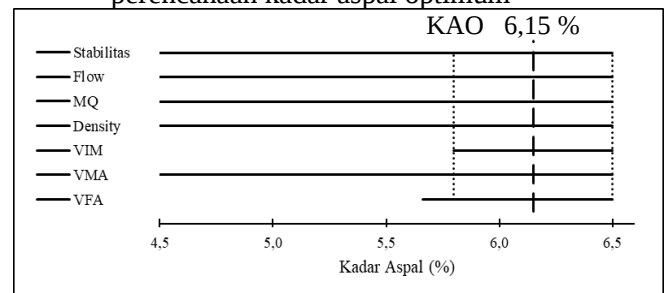
Tabel 3. Karakteristik *Marshall* perencanaan kadar aspal optimum

No	Karakteristik <i>Marshall</i>	Kadar aspal (%)				
		4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
1	Stabilitas (Kg)	1286,1	1361,1	1339,3	1267,3	1240,3
2	<i>Flow</i> (mm)	2,58	2,72	2,75	3,31	2,96
3	<i>Marshall quotient</i> (Kg/mm)	518,05	498,76	491,92	383,18	418,07
4	<i>Density</i> (gr/cm ³)	2,28	2,29	2,31	2,34	2,34
5	VIM (%)	8,49	7,67	6,19	4,12	3,50
6	VMA (%)	16,08	16,32	15,97	15,11	15,53
7	VFA (%)	47,32	53,04	61,26	72,70	77,46

Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

Berdasarkan Tabel 3, campuran aspal AC-WC mencapai seluruh parameter *Marshall* sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 pada kadar aspal 6,15%. Pada kadar ini, densitas, stabilitas, *flow*, MQ, VMA, VIM, dan VFA semuanya memenuhi standar, sehingga kadar aspal 6,15% dapat dianggap memberikan kinerja campuran optimum menurut pedoman Bina Marga.

Tabel 4. Rekapitulasi karakteristik *Marshall* perencanaan kadar aspal optimum



Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

2. Karakteristik *Ambient temperature* Di Lokasi Pemaparan

Selama periode pemaparan, kondisi lingkungan di lokasi penelitian dicatat meliputi suhu, kecepatan angin, dan kelembapan udara berdasarkan pengukuran langsung. Suhu harian bervariasi antara 22,3–34,6°C dengan fluktuasi 5,7–9,3°C, di mana lonjakan suhu maksimum tercatat pada beberapa hari di bulan Maret dan Mei. Kecepatan angin maksimum berada pada kisaran 2–7,8 m/s, sedangkan kecepatan rata-rata 1–4 m/s, dengan fluktuasi yang lebih signifikan pada pertengahan bulan Maret. Kelembapan udara relatif

tinggi, berkisar antara 80–99% dengan rata-rata harian 87,9–95,8%, menunjukkan kandungan uap air yang konsisten di atmosfer. Kombinasi fluktuasi suhu, angin, dan kelembapan ini menggambarkan kondisi *ambient temperature* yang dinamis di lokasi penelitian sepanjang periode pemaparan.

3. Hasil Pengujian *Marshall* Aspal AC-WC Normal dan *Graphene* pada Kondisi *Ambient temperature*

Hasil pengujian *Marshall* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal AC-WC, baik pada benda uji normal maupun benda uji dengan tambahan *graphene*, yang dipaparkan pada *ambient temperature*. Parameter yang diukur meliputi densitas, stabilitas, *flow*, *Marshall* quotient (MQ), VMA, VIM, dan VFA. Pengujian dilakukan pada variasi waktu penjemuran 0, 15, 30, 45, 60, 75, dan 90 hari, sehingga dapat dianalisis pengaruh durasi paparan terhadap kinerja campuran. Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan kadar aspal optimum serta mengevaluasi pengaruh tambahan *graphene* dan variasi waktu penjemuran terhadap performa campuran sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 untuk memudahkan perbandingan antar jenis sampel.

Tabel 5. Parameter *Marshall* campuran aspal normal setelah dipapar pada *ambient temperature*

No	Karakteristik <i>Marshall</i>	Hari Pemaparan						
		0	15	30	45	60	75	90
1	Stabilitas (Kg)	1921,7	1843,5	1811,5	1791,6	1645,8	1566,8	1511,0
2	<i>Flow</i> (mm)	3,41	3,46	3,82	4,02	4,11	4,13	4,65
3	<i>Marshall</i> quotient (Kg/mm)	566,57	547,01	478,76	446,74	406,30	383,66	325,70
4	Density (gr/cm ³)	2,33	2,31	2,31	2,30	2,30	2,30	2,29
5	VMA (%)	15,67	16,38	16,55	16,71	16,65	16,71	17,07
6	VIM (%)	4,43	5,23	5,43	5,60	5,54	5,61	6,02
7	VFA (%)	71,78	68,05	67,20	66,51	66,76	66,46	64,79

Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

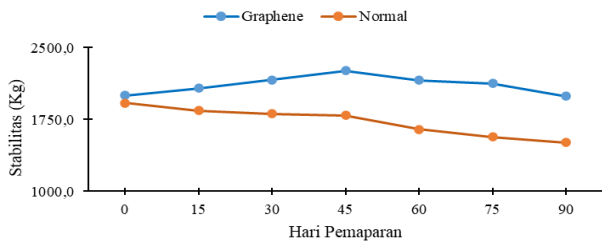
Tabel 6. Parameter *Marshall* campuran aspal *graphene* setelah dipapar pada *ambient temperature*

No	Karakteristik <i>Marshall</i>	Hari Pemaparan						
		0	15	30	45	60	75	90
1	Stabilitas (Kg)	2002,4	2075,6	2165,9	2260,3	2159,7	2126,8	1994,4
2	<i>Flow</i> (mm)	3,70	3,84	3,89	3,94	4,07	4,16	4,28
3	<i>Marshall</i> quotient (Kg/mm)	498,67	506,52	537,41	557,95	507,45	493,94	465,41
4	Density (gr/cm ³)	2,341	2,339	2,336	2,332	2,320	2,312	2,308
5	VMA (%)	15,29	15,35	15,45	15,60	16,02	16,31	16,46
6	VIM (%)	4,00	4,06	4,18	4,35	4,83	5,16	5,33
7	VFA (%)	73,88	73,54	73,26	72,12	70,00	68,44	67,65

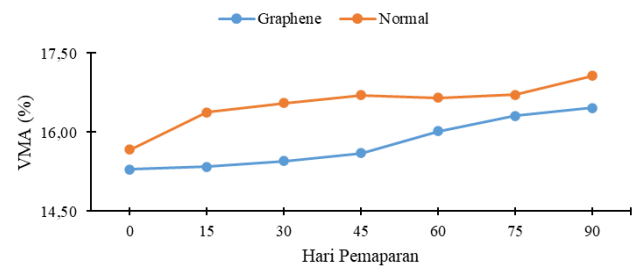
Sumber: Pengujian Laboratorium 2025

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada campuran aspal AC-WC yang dipapar pada *ambient temperature*, penambahan *graphene* sebesar 0,04% terbukti mampu memperbaiki dan mempertahankan performa campuran dibandingkan campuran normal. Campuran dengan *graphene* menunjukkan peningkatan stabilitas hingga 12,88% dan mencapai puncak pada hari ke-45, sementara campuran tanpa *graphene* mengalami penurunan sejak awal pemaparan. Nilai *flow* campuran dengan *graphene* lebih rendah dan terkendali dibandingkan campuran normal, mencerminkan resistensi yang lebih baik terhadap deformasi (Ben Charhi and Baba, 2024). *Marshall* Quotient (MQ) campuran *graphene* meningkat konsisten hingga hari ke-45 dengan nilai puncak 557,95 kg/mm, sedangkan campuran normal menurun signifikan setelah hari ke-30, yang sejalan dengan mekanisme pengerasan binder akibat oksidasi (Bazar Asmawi, 2020). Dari sisi fisik, campuran *graphene* memiliki densitas awal lebih tinggi, dengan tren penurunan seiring penuaan akibat pemanasan berkepanjangan dan hilangnya fraksi minyak Wang et al., (2022).

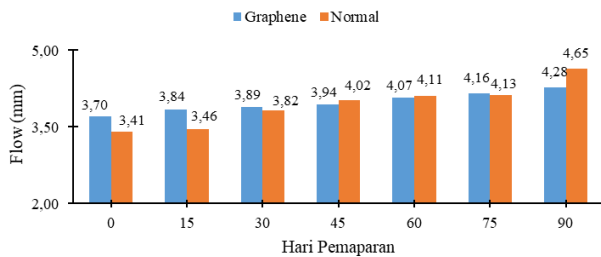
Analisis parameter volumetrik menunjukkan bahwa campuran *graphene* memiliki nilai VMA dan VIM yang lebih rendah sejak awal dibandingkan campuran normal, dengan kenaikan yang lebih terkendali selama 90 hari pemaparan. Kondisi ini terkait kemampuan *graphene* berukuran nano dalam mengisi rongga mikro serta memperkuat lapisan film aspal (Mashuri and Rahman, 2020); Widodo, Harnaeni and Wijayanti, 2012). Nilai VFA pada kedua campuran menurun selama pemaparan, namun campuran dengan *graphene* mengalami penurunan lebih kecil (6,23%) dibandingkan campuran tanpa *graphene* (6,99%), menandakan bahwa *graphene* mampu mempertahankan proporsi rongga yang terisi aspal (Albayati and Alani, 2017). Meski demikian, kelembapan udara tinggi setelah 45 hari (89–95%) menjadi faktor dominan yang mempercepat degradasi struktur *graphene* oxide akibat adsorpsi molekul air (Chang et al., 2016). Secara keseluruhan, penambahan *graphene* tetap memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas, ketahanan deformasi, serta kemampuan campuran dalam mempertahankan sifat volumetriknya selama pemaparan di lingkungan tropis lembap.



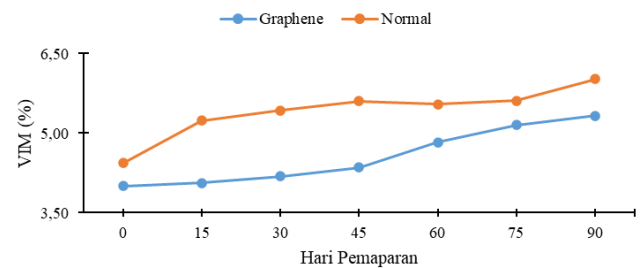
Gambar 1. Stabilitas campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



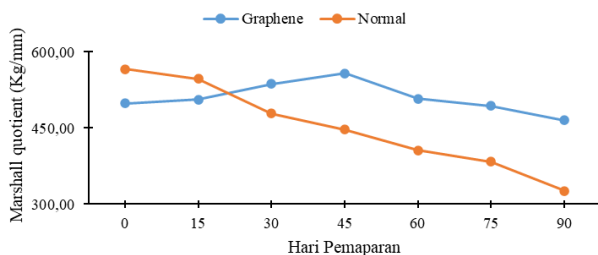
Gambar 5. VMA campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



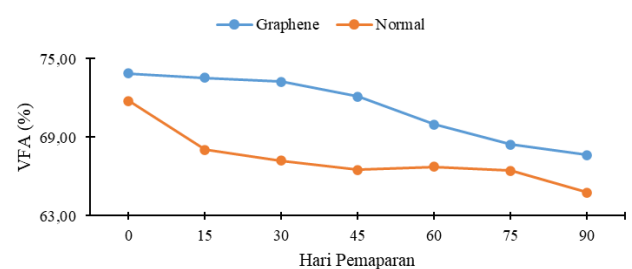
Gambar 2. Flow campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



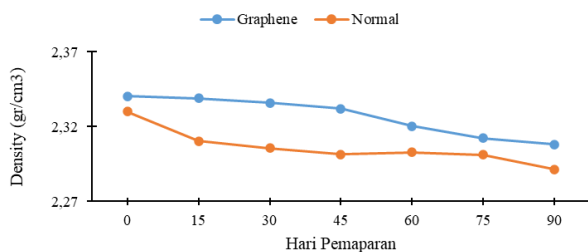
Gambar 6. VIM campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



Gambar 3. MQ campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



Gambar 7. VFA campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*



Gambar 4. Density campuran aspal setelah dipapar pada *ambient temperature*

IV KESIMPULAN

Pada kondisi *ambient temperature* dengan suhu rata-rata harian sekitar 27°C dengan fluktuasi harian antara 23,9°C hingga 31,8°C, serta kelembapan relatif tinggi antara 88% hingga 96%, campuran aspal AC-WC dengan bahan tambah *graphene* mengalami perubahan performa yang bervariasi pada parameter Marshall. Nilai stabilitas sempat meningkat pada awal hingga pertengahan periode sebelum menurun tipis sebesar 0,39% di akhir pemaparan, menunjukkan kemampuan *graphene* dalam mempertahankan kekuatan beban lebih baik dibandingkan campuran tanpa *graphene*. Flow meningkat sebesar 15,68% dan pada akhir periode melampaui batas maksimum 5 mm sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, namun laju kenaikannya

relatif lebih rendah dibandingkan campuran tanpa *graphene*. Parameter lain menunjukkan penurunan kekakuan *Marshall* sebesar 6,67%, penurunan density sebesar 1,41%, peningkatan VMA sebesar 7,65%, kenaikan VIM sebesar 33,25% hingga melewati batas 5%, dan penurunan VFA sebesar 8,43%. Kesimpulan berisi tentang poin-poin utama artikel. Kesimpulan hendaknya tidak mengulangi yang sudah dituliskan di bagian Intisari, akan tetapi membahas hasil-hasil yang penting, penerapan maupun pengembangan dari penelitian yang dilakukan. Bagian ini hendaknya juga dapat menunjukkan apakah tujuan penelitian dapat tercapai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Said Jalalul Akbar dan Bapak Maizuar selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi selama proses penelitian hingga penyusunan jurnal ini. Segala masukan dan ilmu yang diberikan menjadi kontribusi penting bagi terselesaikannya penelitian ini.

REFERENSI

- Albayati, A.H. And Al.Ani, A.F.H. (2017) 'Influence Of Temperature Upon Permanent Deformation Parameters Of Asphalt Concrete Mixes', *Journal Of Engineering*, 23(7), Pp. 14–32. Available At: <https://doi.org/10.31026/J.Eng.2017.07.02>.
- Annura, S. Et Al. (2024) 'Pengaruh Penambahan *Graphene* Sebagai Bahan Tambah Aspal Terhadap Kinerja Campuran Ac-Wc', 8(1).
- Asmawi, B. (2020) 'Durabilitas Campuran Aspal Ac-Bc Terhadap Perubahan Suhu', *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 8(1).
- Badan Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika. (2024). Data Suhu Rata-Rata Di Lhokseumawe Tahun 1994–2024. Diakses Pada 14 April 2025, Dari <https://www.bmkg.go.id/iklim/informasi-iklim.bmkg>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1969:2016 – Cara Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Kasar. Jakarta: Bsn.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1970:2016 – Cara Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus. Jakarta: Bsn.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI Astm C136:2012 – Standard Test Method For Sieve Analysis Of Fine And Coarse Aggregates. Jakarta: Bsn.
- Badan Standardisasi Nasional. (1998). SNI 03-4804-1998 – Berat Isi Agregat Dan Rongga Di Antara Butir Agregat. Jakarta: Bsn.
- Badan Standardisasi Nasional. (2003). RSNI M-01-2003 – Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas Dengan Alat *Marshall*. Jakarta: Bsn.
- Ben Charhi, O. And Baba, K. (2024) 'Influence Of Temperature On The Viscoelastic Behavior And Durability Of Flexible Pavements', *Civil Engineering Journal*, 10(7), Pp. 2162–2176. Available At: <https://doi.org/10.28991/Cej-2024-010-07-06>.
- Guillonau, G. Et Al. (2024) 'Surface Mechanical Properties And Microstructural Evolutions Along A Thermal Cycle Using High Temperature Scanning Indentation', P. 1. Available At: <https://doi.org/10.34726/6596>.
- Guo, T. Et Al. (2025) 'Study On The Performance And Mechanism Of *Graphene* Oxide / Polyurethane Composite Modified Asphalt', *Scientific Reports*, 15(1), P. 2482. Available At: <https://doi.org/10.1038/S41598-025-86078-9>.
- Mashuri, M. And Rahman, R. (2020) 'Pengaruh Penuaan Aspal Pada Karakteristik Campuran Beton Aspal Lapis Aus Ac – Wc', *Rekonstruksi Tadulako: Civil Engineering Journal On Research And Development*, Pp. 47–56. Available At: <https://doi.org/10.22487/Renstra.V1i2.30>.
- Wang, H.-P. Et Al. (2021) 'Review On Structural Damage Rehabilitation And Performance Assessment Of Asphalt Pavements', *Reviews On Advanced Materials Science*, 60(1), Pp. 438–449. Available At: <https://doi.org/10.1515/Rams-2021-0030>.
- Widodo, S., Harnaeni, S.R. And Wijayanti, E. (2012) 'Pengaruh Penuaan Aspal Terhadap Karakteristik Asphalt Concrete Wearing Course'.
- Zhang, K. Et Al. (2023) 'Influence Of Temperature And Humidity Coupling On Rutting Deformation Of Asphalt Pavement', *Science And Engineering Of Composite Materials*, 30(1), P. 20220232. Available At: <https://doi.org/10.1515/Secm-2022-0232>.