ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN ADITIF *GRAPHENE* TERHADAP KINERJA *ASPHALT CONCRETE – WEARING COURSE (AC-WC)*

TESIS

Program Studi Magister Teknik Sipil
Jurusan Teknik Sipil

Oleh:
RINDI ANTIKA
NIM D2071241014

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
PONTIANAK
2026

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rindi Antika

NIM : D2071241014

menyatakan bahwa dalam TESIS yang berjudul " Analisis Pengaruh Penambahan Aditif Graphene Terhadap Kinerja *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC)" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar magister di suatu perguruan tinggi manapun. Sepanjang pengetahuan Saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atas diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Rujukan.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya. Saya sanggup menerima konsekuensi akademis dan hukum di kemudian hari apabila pernyataan yang dibuat ini tidak benar.

Pontianak, 19 Mei 2026



Rindi Antika
NIM D2071241014

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email : ft@untan.ac.id Website : http://teknik.untan.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN ADITIF GRAPHENE TERHADAP KINERJA *ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)*

Jurusan Teknik Sipil
Program Studi Magister Teknik Sipil

Oleh:

RINDI ANTIKA
NIM D2071241014

Telah dipertahankan di depan Penguji Tesis pada 19 Mei 2026
dan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Susunan Penguji Tesis

Dosen Pembimbing Utama	: Dr.- Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM NIP. 19671223199203100 2
Dosen Pembimbing Kedua	: Dr. Ir. Eti Sulandari, S.T., M.T. NIP. 19710720199802200 1
Dosen Penguji Utama	: Dr. Ir. Siti Mayuni, M.T., IPM NIP. 19680518199303200 2
Dosen Penguji Kedua	: Dr. Said, S.T., M.T. NIP. 19720109200501100

Pontianak, 19 Mei 2026

Dekan,

Dr.-Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM

NIP. 19671223199203100 2

Pembimbing Utama

Dr.-Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM

NIP. 19671223199203100 2

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa yang telah melimpahkan berkah dan kemurahan-Nya, sehingga penulis berkesempatan menyelesaikan tesis berjudul "Analisis Pengaruh Penambahan *Graphene* Sebagai Bahan Aditif Terhadap Kinerja *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC)". Tesis ini merupakan salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tanjungpura.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan *Graphene* Sebagai Bahan Aditif Terhadap Kinerja *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) jenis *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*.

Penulisan Tesis ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penuh rasa terima kasih, saya mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr.-Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM selaku Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga dalam penyusunan tesis ini.
2. Ibu Dr. Ir. Eti Sulandari, S.T., M.T. selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan bimbingan, saran, dan dukungan dalam penyempurnaan tesis ini.
3. Ibu Dr. Ir. Siti Mayuni, M.T., IPM selaku Penguji Utama yang telah bersedia memberikan masukan dan evaluasi terhadap tesis ini.
4. Bapak Dr. Said, S.T., M.T. selaku Penguji Kedua yang telah memberikan kritik dan saran konstruktif untuk perbaikan tesis ini.
5. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Tanjungpura, beserta jajaran pengelola program studi, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan.
6. Seluruh dosen Program Magister Teknik Sipil Universitas Tanjungpura, atas ilmu, pengalaman, dan wawasan yang telah diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan.
7. Kedua Orang Tua yang telah senantiasa mendoakan.

8. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada suami tercinta yang senantiasa mendampingi, memberikan doa, dukungan, perhatian, dan semangat selama masa perkuliahan hingga penyelesaian tesis ini. Terima kasih atas dukungan dan finansial yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan.
9. Teruntuk buah hati tercinta yang masih berada dalam kandungan, terima kasih telah menemani setiap langkah perjuangan penulis selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini. Kehadiranmu menjadi anugerah sekaligus sumber kekuatan yang memberikan semangat untuk terus berjuang dan menyelesaikan studi ini. Semoga suatu hari nanti engkau dapat mengetahui bahwa sejak sebelum lahir, engkau telah menjadi bagian dari perjalanan dan pencapaian ini.
10. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Tanjungpura, yang selalu memberikan semangat, masukan, serta diskusi yang bermanfaat selama proses perkuliahan dan penelitian.

Harapan penulis tesis ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik sipil, serta dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya. Oleh karena itu, saya sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif untuk perbaikan lebih lanjut.

Pontianak, 19 Mei 2026
Penulis,

Rindi Antika
Nim. 2071241014

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ADDING GRAPHENE ADDITIVES ON THE PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE – WEARING COURSE (AC-WC)

The increasing development of road infrastructure in Indonesia demands the use of pavement materials capable of providing optimal stability, durability, and resistance to deformation. One approach to improving the performance of asphalt mixtures is through the use of additives such as graphene. This study aims to analyze the effect of graphene addition on Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) mixtures using 60/70 penetration grade asphalt, focusing on the physical properties of asphalt, Marshall characteristics, as well as the bitumen stiffness modulus (Sbit) and mixture stiffness modulus (Smix), and to determine the optimum graphene content. The research was conducted using laboratory experimental methods with variations in graphene content of 0.0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8%. The optimum asphalt content (OAC) was determined using the Marshall method, followed by an analysis of mixture performance parameters, including stability, flow, and Marshall Quotient. The bitumen stiffness modulus (Sbit) was determined using the Van der Poel approach, while the mixture stiffness modulus (Smix) was calculated using the Nottingham method based on Sbit values and mixture parameters. The results indicate that the addition of graphene tends to increase the stiffness of both bitumen and the mixture, as evidenced by the increase in Sbit and Smix values, and also improves the mixture's resistance to moisture damage. However, at a higher graphene content (0.8%), the mixture did not meet the specifications, and the OAC could not be determined. Based on the evaluation of specifications and mixture performance parameters, including stability, flow, durability, and stiffness, a graphene content of 0.4% was identified as the optimum, with an OAC of 5.95%, stability of 920.23 kg, Marshall Quotient of 276.39 kg/mm, retained stability of 94.09%, Sbit of 10 MPa, and Smix of 3,118.18 MPa. Therefore, graphene shows strong potential as an additive in AC-WC mixtures to enhance performance under the material conditions and testing procedures applied in this study.

***Keywords** : AC-WC, Marshall, Graphene, Sbit, Smix, Van Der Poel, Nottingham.*

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN ADITIF GRAPHENE TERHADAP KINERJA ASPHALT CONCRETE – WEARING COURSE (AC-WC)

Peningkatan pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia menuntut penggunaan material perkerasan yang mampu memberikan stabilitas, durabilitas, serta ketahanan terhadap deformasi secara optimal. Salah satu upaya untuk meningkatkan kinerja campuran perkerasan adalah melalui penggunaan bahan tambah berupa aditif graphene. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan graphene pada campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) dengan menggunakan aspal penetrasi 60/70 terhadap sifat fisik aspal, karakteristik Marshall, serta modulus kekakuan bitumen (Sbit) dan modulus kekakuan campuran (Smix), sekaligus menentukan kadar graphene yang paling optimal. Penelitian dilakukan melalui metode eksperimental di laboratorium dengan variasi kadar graphene sebesar 0,0%; 0,2%; 0,4%; 0,6%; dan 0,8%. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan menggunakan metode Marshall, kemudian dianalisis parameter kinerja campuran yang meliputi stabilitas, flow, dan Marshall Quotient. Nilai modulus kekakuan bitumen (Sbit) ditentukan menggunakan pendekatan Van der Poel, sedangkan modulus kekakuan campuran (Smix) dihitung menggunakan metode Nottingham berdasarkan nilai Sbit dan parameter campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan graphene cenderung meningkatkan kekakuan bitumen dan campuran, yang ditunjukkan oleh kenaikan nilai Sbit dan Smix, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap perendaman. Namun, pada kadar graphene tinggi (0,8%), campuran tidak memenuhi spesifikasi sehingga nilai KAO tidak dapat ditentukan. Berdasarkan evaluasi terhadap spesifikasi dan kinerja campuran yang meliputi stabilitas, flow, durabilitas, dan kekakuan, kadar graphene sebesar 0,4% dinilai paling optimal dengan nilai KAO sebesar 5,95%, stabilitas 920,23 kg, Marshall Quotient 276,39 kg/mm, stabilitas sisa 94,09%, Sbit sebesar 10 MPa, dan Smix sebesar 3.118,18 MPa. Dengan demikian, graphene berpotensi digunakan sebagai bahan tambah pada campuran AC-WC untuk meningkatkan kinerja campuran berdasarkan kondisi material dan prosedur pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

Kata Kunci: *AC-WC, Marshall, Graphene*, Sbit, Smix, *Van Der Poel, Nottingham.*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i

ABSTRACT iii

ABSTRAK iv

DAFTAR ISI v

DAFTAR GAMBAR viii

DAFTAR TABEL x

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Perumusan Masalah 3

1.3. Tujuan Penelitian 4

1.4. Batasan Masalah 4

1.5. Manfaat Penelitian 5

1.6. Hipotesis 5

1.7. Sistematika Penulisan 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1. Lapis Aspal Beton 7

2.2. *Aspalht Concrete-Wearing Course* (AC-WC) 7

2.3. Agregat 8

2.3.1. Agregat Kasar 8

2.3.2. Agregat Halus 9

2.3.3. Bahan Pengisi *Filler* 10

2.3.4. Gradasi Agregat Gabungan 10

2.3.5. Spesifikasi Agregat untuk campuran *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) 11

2.4. Bitumen (Aspal) 12

2.5. *Graphene* 13

2.5.1. Karekteristik *Graphene* 13
2.5.2. Mekanisme Kerja *Graphene* 14
2.5.3. Jenis Jenis *Graphene* 14
2.5.4. Kekurangan Aditif *Grahphene* 15
2.6. Penelitian Terdahulu 15
2.7. Parameter *Marshall* 18
2.7.1. *Void in Mixture* (VIM) 18
2.7.2. *Void in Mineral Aggregate* (VMA) 19
2.7.3. *Voids Filled with Bitumen* (VFB) 20
2.7.4. Stabilitas *Marshall* 21
2.7.5. *Flow* 21
2.7.6. *Marshall Quontient* 22
2.7.7. Pengujian Indeks Kekuatan Marshall Sisa 22
2.8. Modulus Kekakuan 23
2.8.1. Modulus Kekakuan Aspal *(S_{bit})* 24
2.8.2. Modulus Kekakuan Campuran Beraspal *(Smix)* 27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 29
3.1. Metode Penelitian 29
3.2. Lokasi Penelitian 29
3.3. Rencana Kerja 29
3.4. Tahap 1 Melakukan Studi Literatur dan Persiapan Alat dan Bahan 32
3.5. Tahap 2 Pengujian Bahan 34
3.6. Tahap 3 Perancangan Proporsi 35
3.7. Tahap 4 Melakukan Analisis 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 41
4.1. Pengujian Karekteristik Bahan 41
4.1.1. Pengujian Karekteristik Aspal 41
4.1.2. Hasil Pengujian Agregat Kasar 53

4.1.3. Hasil Pengujian Agregat Kasar.....53
4.1.4. Hasil Pengujian Agregat Halus.....55
4.1.5. Rangkuman Hasil Pemeriksaan Karakteristik Aspal/Bitumen.....56
4.2. Perencanaan Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC).....57
4.2.1. Perhitungan Kadar Aspal Rencana.....60
4.3. Hasil Analisis Pengujian Pengujian *Marshall*.....61
4.3.1. Analisis Hasil Pengujian Marshall Aspal Aspalindo Pen 60/70.....61
4.3.2. Analisis Hasil Pengujian *Marshall* Campuran Antara Aspal Pen 60/70 dan *Graphene*.....66
4.4. Analisis Kadar Aspal Optimum Campuran.....76
4.5. Rangkuman Nilai Marshall Test Campuran Kadar Aspal Optimum.....80
4.5.1. Analisis Diagram dan Interpretasi Rangkuman Parameter Marshall Test.....81
4.6. Analisis Modulus Kekakuan Aspal dan Kekakuan Campuran.....90
4.6.1. Modulus Kekakuan Aspal (Sbit).....90
4.6.2. Modulus Kekakuan Campuran Aspal (Smix).....92
4.7. Rekap Hasil Pengujian Pengaruh Graphene terhadap Campuran Aspal.....95
BAB V PENUTUP.....97
5.1. Kesimpulan.....97
5.2. Saran.....99
DAFTAR PUSTAKA.....100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 *Graphene Oxsida* Dispersi 13
Gambar 2. 2 Nomogram untuk menentukan modulus kekakuan bitumen (Read, 2019) 25

Gambar 4. 1 Pengujian Penetrasi 42
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Penetrasi Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene43
Gambar 4. 3 Pengujian Titik Lembek 44
Gambar 4. 4 Hasil Pengujian Titik Lembek Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene 45
Gambar 4. 5 Pengujian Dektilitas 46
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Dektilitas Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene 47
Gambar 4. 7 Pengujian Titik Nyala dan Bakar 48
Gambar 4. 8 Hasil Pengujian Titik Nyala dan Bakar Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene 48
Gambar 4. 9 Pengujian Berat Jenis Aspal 50
Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene 50
Gambar 4. 11 Pengujian Kehilangan Berat 51
Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Pada Bitumen Dengan Variasi Graphene 52
Gambar 4. 13 Penggujian Agregat Kasar 54
Gambar 4. 14 Pengujian Agregat Halus 55
Gambar 4. 15 Grafik Gradasi Campuran (Amplop) Untuk Perkerasan AC-WC.. 58
Gambar 4. 16 Grafik Hasil Marshall Test Dengan Aspal AspalindoPen 60/70.... 65
Gambar 4. 17 Grafik Hasil Marshall Test Dengan Campuran Aspal Graphene 0,2% 72
Gambar 4. 18 Grafik Hasil Marshall Test Dengan Campuran Aspal Graphene 0,4% 73
Gambar 4. 19 Hasil Marshall Test Dengan Campuran Aspal Graphene 0,6% 74

Gambar 4. 20 Grafik Hasil Marshall Test Dengan Campuran Aspal Graphene 0,8% 75
Gambar 4. 21 Diagram Kadar Aspal Optimum (KAO) Untuk Semua Variasi Campuran 82
Gambar 4. 22 Diagram Stabilitas (Kg) Untuk Semua Variasi Campuran 83
Gambar 4. 23 Diagram Nilai Marshall Quotient (MQ) Untuk Semua Variasi Campuran 84
Gambar 4. 24 Diagram Nilai Void In The Mixture (VIM) Untuk Semua Variasi Campuran 85
Gambar 4. 25 Diagram Nilai Void In Mineral Aggregate (VMA) Untuk Semua Variasi Campuran..... 86
Gambar 4. 26 Diagram Nilai Void Filled with Bitumen (VFB) Untuk Semua Variasi Campuran 87
Gambar 4. 27 Diagram Nilai Flow Untuk Semua Variasi Campuran..... 88
Gambar 4. 28 Diagram Nilai Stabilitas Sisa Perendaman 24 Jam Untuk Semua Variasi Campuran..... 89

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ketentuan sifat-sifat campuran Laston (Bina Marga, 2018)..... 8
Tabel 2. 2 Ketentuan Agregat Kasar (Bina Marga, 2018) 9
Tabel 2. 3 Ketentuan Agregat Halus (Bina Marga, 2018) 10
Tabel 2. 4 Amplop gradasi agregat gabungan campuran beraspal (Bina Marga, 2018)..... 11

Tabel 3. 1 Spesifikasi Pengujian Agregat Kasar..... 35
Tabel 3. 2 Spesifikasi Pengujian Agregat Halus..... 35
Tabel 3. 3 Spesifikasi Pengujian Aspal..... 35
Tabel 3. 4 Jumlah Sampel Variasi Kadar Aspal di tambah Graphene..... 36
Tabel 3. 5 Variasi benda uji setelah KAO..... 38
Tabel 3. 6 Spesifikasi Pengujian Marshall..... 38

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar 54
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 55
Tabel 4. 3 Rangkuman Hasil Pemeriksaan Karakteristik Aspal/Bitumen 56
Tabel 4. 4 Amplop Gradasi Gabungan Untuk Campuran AC-WC..... 57
Tabel 4. 5 Perhitungan Berat Masing–Masing Bahan Dalam Campuran 60
Tabel 4. 6 Tabel Hasil Marshall Test Campuran Aspal Pen 60/70 Campuran 0,0%. 64
Tabel 4. 7 Tabel Hasil *Marshall Test* Campuran Aspal Pen 60/70 Campuran 0,2% *Graphene*..... 66
Tabel 4. 8 Hasil Marshall Test Campuran Aspal Pen 60/70 Campuran 0,4% *Graphene*..... 68
Tabel 4. 9 Hasil Marshall Test Campuran Aspal Pen 60/70 Campuran 0,6% *Graphene*..... 69
Tabel 4. 10 Hasil Marshall Test Campuran Aspal Pen 60/70 Campuran 0,8% *Graphene*..... 71
Tabel 4. 11 Hasil Uji *Marshall* Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70 76
Tabel 4. 12 Hasil Uji *Marshall* Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70 Dengan Campuran *Graphene* 0,2% 77
Tabel 4. 13 Hasil Uji *Marshall* Kadar 22Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70 Dengan Campuran *Graphene* 0,4% 78

Tabel 4. 14 Hasil Uji *Marshall* Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70 Dengan Campuran *Graphene* 0,6% 79
Tabel 4. 15 Rangkuman Nilai Parameter *Marshall* 81
Tabel 4. 16 Nilai Modulus Kekakuan Bitumen/Stiffness Bitumen *(Sbit)* Dengan Metode *Nomogram Van der Poel* 92
Tabel 4. 17 Modulus Kekakuan Campuran *(Smix)* Dengan Metode *Nottingham* (1984) 94

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pesatnya perkembangan infrastruktur transportasi menuntut adanya konstruksi perkerasan jalan dengan kinerja yang semakin optimal di Indonesia, Perkerasan jalan pada umumnya dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan komposit [1]. Dari ketiga jenis tersebut, perkerasan lentur merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena memberikan kenyamanan berkendara, permukaan yang lebih halus, serta relatif mudah dalam pelaksanaan dan pemeliharaan [2].

Pada perkerasan lentur, lapisan permukaan memiliki peran yang sangat penting karena langsung menerima beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Salah satu jenis lapisan permukaan yang umum digunakan adalah *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC). Campuran ini terdiri atas agregat dan aspal sebagai bahan pengikat yang berfungsi memberikan kekuatan, kedap air, serta ketahanan terhadap gaya geser kendaraan [3]. Selain itu, AC-WC juga memiliki beberapa kelebihan, antara lain mampu memberikan permukaan jalan yang halus dan nyaman, memiliki tingkat kedap air yang baik sehingga melindungi lapisan di bawahnya dari infiltrasi air, serta memberikan nilai *skid resistance* (ketahanan geser) yang cukup tinggi untuk meningkatkan keselamatan pengguna jalan Pada perkerasan lentur, lapisan permukaan memiliki peran yang sangat penting karena langsung menerima beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan [4]. Namun demikian, sebagai lapisan paling atas, AC-WC juga merupakan bagian yang paling rentan mengalami kerusakan karena berada paling atas dan bersentuhan langsung dengan roda kendaraan, Adapun jenis Kerusakan yang sering terjadi antara lain retak, deformasi permanen, lubang, gelombang [5]. Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa kinerja campuran aspal, terutama dalam hal stabilitas dan kekakuan, masih perlu ditingkatkan.

Stabilitas merupakan salah satu parameter utama dalam pengujian Marshall yang menunjukkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Nilai stabilitas yang rendah dapat

mempercepat terjadinya kerusakan jalan dan menurunkan umur layan perkerasan [6]. Namun demikian, parameter Marshall belum sepenuhnya mampu menggambarkan kekakuan (stiffness) material beraspal, khususnya dalam merespons beban berulang dan perubahan suhu [7]. Oleh karena itu, diperlukan parameter tambahan untuk mengevaluasi kinerja aspal secara lebih menyeluruh. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah analisis modulus kekakuan aspal (Sbit) dan modulus kekakuan campuran (Smix) [8]. Parameter Sbit menunjukkan tingkat kekakuan aspal sebagai bahan pengikat, sedangkan Smix menunjukkan kekakuan campuran secara keseluruhan. Dengan mengombinasikan parameter Marshall, Sbit, dan Smix, diharapkan diperoleh gambaran yang lebih lengkap mengenai perilaku campuran beraspal [9].

Upaya peningkatan kinerja campuran aspal dapat dilakukan melalui modifikasi material dengan menambahkan bahan aditif. Penambahan bahan aditif bertujuan untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik aspal, seperti meningkatkan stabilitas, kekakuan, serta ketahanan terhadap deformasi, suhu tinggi, dan pengaruh air [10]. Berbagai jenis bahan aditif telah digunakan dalam campuran aspal, antara lain polimer [11], karet [12], sulfur [13], serat selulosa [14], abu terbang (*fly ash*) [15], kapur hidrat [16], plastik daur ulang [17], serta nanosilika dan graphene [18], [19], [20]. Penambahan bahan-bahan tersebut terbukti dapat meningkatkan daya ikat antara aspal dan agregat, memperbaiki ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat beban lalu lintas

Salah satu bahan aditif yang mulai banyak dikembangkan dalam campuran aspal adalah graphene [21], [22], [19]. Pada penelitian ini digunakan graphene dalam bentuk graphene dispersion, yaitu graphene yang telah terdispersi secara merata dalam cairan berwarna hitam pekat sehingga lebih mudah dicampurkan ke dalam aspal [23]. Bentuk dispersi cair dipilih karena memiliki kemampuan penyebaran yang lebih baik dibandingkan graphene serbuk, sehingga partikel graphene dapat tercampur lebih homogen ke dalam aspal pada proses pencampuran [24]. Penggunaan graphene dalam bentuk dispersi juga membantu mengurangi terjadinya aglomerasi atau penggumpalan partikel, yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dan luas permukaan yang besar [25]. Sifat tersebut membuat graphene meningkatkan interaksi antara aspal dan agregat. Penambahan graphene

dapat meningkatkan kekakuan, memperkuat ikatan aspal–agregat, serta meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kadar yang digunakan. Pada kadar tertentu, graphene dapat meningkatkan kinerja campuran, tetapi pada kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan kinerja akibat terjadinya penggumpalan (aglomerasi) [26].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh penambahan aditif graphene terhadap kinerja campuran *Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC),* khususnya terhadap stabilitas dan kekakuan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan parameter Marshall, penelitian ini juga menganalisis kekakuan melalui parameter Sbit dan Smix. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan evaluasi yang lebih menyeluruh terhadap kinerja campuran beraspal. Meskipun demikian, penggunaan aditif graphene memiliki kelemahan utama, yaitu harga bahan yang relatif mahal dibandingkan aditif lainnya, oleh karena itu, penelitian ini menjadi poin penting untuk menentukan persentase penambahan graphene seminimal mungkin yang tetap mampu memberikan kinerja optimum terhadap stabilitas aspal, sehingga hasilnya tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga efisien secara ekonomi.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, terdapat beberapa permasalahan yang menjadi fokus dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh penambahan *graphene* terhadap karakteristik sifat fisik aspal penetrasi 60/70?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *graphane* terhadap karakteristik campuran *Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC)*?
3. Bagaimana pengaruh penambahan *graphene* terhadap modulus kekakuan aspal *(Stiffness bitumen)?*
4. Bagaimana pengaruh penambahan *graphene* terhadap modulus kekakuan campuran beraspal (*Stiffness mixture*)?

5. Berapa proporsi optimal *graphene* yang harus ditambahkan dalam campuran *Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC)* untuk memperoleh kinerja terbaik?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh graphene terhadap karakteristik sifat fisik aspal penetrasi 60/70.
2. Menganalisis pengaruh *graphane* terhadap karakteristik campuran *Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC).*
3. Menganalisis pengaruh penambahan *graphene* terhadap modulus kekakuan aspal *(Stiffness bitumen)?*
4. Menganalisis pengaruh penambahan *graphene* terhadap modulus kekakuan campuran beraspal *(Stiffness mixture)?*
5. Menganalisis Proporsi Optimal *graphane* dalam Campuran *Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC).*

1.4. Batasan Masalah

Agar dalam penulisan ini lebih terarah dan tidak terlalu luas untuk dibahas, maka dibuat pembatasan masalah pada hal-hal berikut :

1. Aditif yang digunakan adalah merk graphene oxsida dispersion merupakan produk inovasi dari Maxlab Kabupaten Tenggerang.
2. Material agregat yang di pakai berasal dari Quary Peniraman Kecamatan Sei Pinyuh Kabupaten Mempawah Provinsi Kalimantan Barat karena lokasi tersebut merupakan quary yang sudah teruji kualitasnya, memiliki ketersediaan material yang memadai untuk kebutuhan penelitian, serta memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang sesuai dengan spesifikasi teknis yang disyaratkan.
3. Penelitian dibatasi pada pengujian karakteristik *Marshall* campuran AC-WC dengan variasi persentase yang telah ditentukan.
4. Perubahan sifat aspal.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat mengembangan ilmu dan pengetahuan, serta mengeksplorasi penggunaan graphane dalam campuran perkerasan jalan jenis *Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC).* Selain itu, penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi proporsi *graphane* dalam campuran AC-WC, yang berpotensi menjadi bahan rujukan untuk penelitian lanjutan di bidang perkerasan jalan.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan bahwa pemanfaatan *graphene* mampu meningkatkan stabilitas campuran serta mendukung pengembangan teknologi perkerasan jalan yang berkelanjutan
3. Penelitian ini dapat memberikan rekomendasi teknis bagi pemerintah dalam pengembangan infrastruktur jalan.

1.6. Hipotesis

Hipotesis penelitian ini Adalah sebagai berikut

1. Graphene pada campuran aspal dapat meningkatkan nilai modulus kekakuan aspal *(Sbit)* dan modulus kekakuan campuran *(Smix).*
2. Graphene pada campuran aspal dapat meningkatkan nilai stabilitas pada campuran aspal AC WC

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan bertujuan untuk membagi inti dari isi penulisan dalam beberpa bab yang terstruktur. Penjelasan lebih lanjut dalam masing masing bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Terdiri dari teori-teori yang melandasi penulisan tentang material campuran aspal dan teori yang akan digunakan pada penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Menjelaskan metode atau tata cara pelaksanaan penelitian dari awal hingga akhir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdiri dari analisis hasil pelaksanaan dan penelitian dilaboratorium serta pengerjaan untuk mendapatkan karakteristik dari benda uji.

BAB V PENUTUP

Terdiri dari kesimpulan akhir dan saran dari peneliti yang mungkin dapat dilakukan atau diterapkan oleh penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Terdiri dari buku – buku atau referensi yang digunakan dalam penulisan.

LAMPIRAN

Terdiri dari data – data pendukung dan gambar – gambar yang berfungsi sebagai pelengkap dalam penulisan.