

**STABILITAS DAN KUAT TEKAN PERKERASAN *WEARING COURSE*  
(*WC*) MENGGUNAKAN BAHAN PENGIKAT LIMBAH  
PLASTIK LDPE (*LOW-DENSITY POLYETHYLENE*)**

**(SKRIPSI)**

Oleh

**DENNY KURNIAWAN**

**NPM 2255011002**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

## ABSTRAK

### STABILITAS DAN KUAT TEKAN PERKERASAN *WEARING COURSE* (WC) MENGGUNAKAN BAHAN PENGIKAT LIMBAH PLASTIK LDPE (*LOW-DENSITY POLYETHYLENE*)

Oleh

**DENNY KURNIAWAN**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemanfaatan limbah plastik *Low-Density Polyethylene* (LDPE) sebagai bahan pengikat pada campuran *Wearing Course* (WC) terhadap karakteristik *Marshall* dan kuat tekan. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi kadar LDPE sebesar 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, dan 15% menggunakan metode *wet process*. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), serta kuat tekan untuk mengetahui perubahan perilaku mekanis campuran akibat penambahan LDPE.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan LDPE memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja campuran hingga batas tertentu. Nilai optimum berdasarkan uji *Marshall* diperoleh pada kadar LDPE 7,5% dengan stabilitas 2934,05 kg, *flow* 2,07 mm, dan MQ 1432 kg/mm. Sementara itu, nilai kuat tekan maksimum dicapai pada kadar 12,5% sebesar 10,90 MPa. Secara umum, penambahan LDPE mampu meningkatkan kekuatan dan ketahanan campuran, namun kadar berlebih menyebabkan penurunan kinerja akibat berkurangnya *interlocking* antar agregat.

Kata kunci: LDPE, *Wearing Course*, Stabilitas, Kuat Tekan, Limbah Plastik

## **ABSTRACT**

### ***STABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF WEARING COURSE (WC) PAVEMENT USING LDPE (LOW-DENSITY POLYETHYLENE) PLASTIC WASTE AS A BINDER***

By

**DENNY KURNIAWAN**

*This study aims to analyze the effect of utilizing Low-Density Polyethylene (LDPE) plastic waste as a binder in Wearing Course (WC) mixtures on Marshall characteristics and compressive strength. The research was conducted using a laboratory experimental method with LDPE content variations of 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, and 15% using the wet process method. The parameters analyzed include stability, flow, Marshall Quotient (MQ), and compressive strength to evaluate changes in the mechanical behavior of the mixture due to the addition of LDPE.*

*The results show that the addition of LDPE has a significant effect on improving the performance of the mixture up to a certain limit. The optimum value based on the Marshall test was obtained at 7.5% LDPE content, with a stability of 2934.05 kg, flow of 2.07 mm, and MQ of 1432 kg/mm. Meanwhile, the maximum compressive strength was achieved at 12.5% LDPE content, reaching 10.90 MPa. In general, the addition of LDPE enhances the strength and durability of the mixture; however, excessive content leads to performance reduction due to decreased aggregate interlocking.*

*Keywords: LDPE, Wearing Course, Stability, Compressive Strength, Plastic Waste*

**STABILITAS DAN KUAT TEKAN PERKERASAN *WEARING COURSE*  
(WC) MENGGUNAKAN BAHAN PENGIKAT LIMBAH PLASTIK  
LDPE (*LOW-DENSITY POLYETHYLENE*)**

**Oleh:**

**Denny Kurniawan**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL**

**Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**Judul Skripsi : STABILITAS DAN KUAT TEKAN  
PERKERASAN WEARING COURSE  
(WC) MENGGUNAKAN BAHAN  
PENGIKAT LIMBAH PLASTIK LDPE  
(LOW-DENSITY POLYETHYLENE)**

**Nama Mahasiswa : Denny Kurniawan**

**Nomor Pokok Mahasiswa : 2255011002**

**Program Studi : S1 Teknik Sipil**

**Jurusan : Teknik Sipil**

**Fakultas : Teknik**



**1. Komisi Pembimbing**

**Sasana Putra, S.T., M.T.**  
NIP 19691111 200003 1 002

**Prof. Dr. Eng. Ir. Aleksander Purba,**  
S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.  
NIP 19681107 200012 1 001

**2. Ketua Jurusan Teknik Sipil**

**3. Ketua Program Studi Teknik Sipil**

**Sasana Putra, S.T., M.T.**  
NIP 19691111 200003 1 002

**Dr. Suyadi, S.T., M.T.**  
NIP 19741225 200501 1 003

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

**Ketua**

**: Sasana Putra, S.T., M.T.**

**Sekretaris**

**: Prof. Dr. Eng. Ir. Aleksander Purba,  
S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.**

**Penguji**

**Bukan Pembimbing : Dr. Ir. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T.**

**2. Dekan Fakultas Teknik**



**Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

**NIP. 19691030 200003 1 001**

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 16 April 2026**

## LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Denny Kurniawan  
Nomor Pokok Mahasiswa : 2255011004  
Judul Skripsi : Stabilitas dan Kuat Tekan Perkerasan *Wearing Course* (WC) Menggunakan Bahan Pengikat Limbah Plastik *LDPE (Low-Density Polyethylene)*  
Jurusan : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 24 April 2026  
Pembuat Pernyataan



Denny Kurniawan

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kecamatan Kotabumi yang terletak di Lampung Utara pada tanggal 20 April 2004. Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Arie dan Ibu Lusi. Penulis merupakan 2 bersaudara dengan 1 (satu) adik laki-laki yang bernama Ridho.

Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Nurul Huda Madukoro, Lampung Utara yang diselesaikan pada tahun 2010, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Dasar di SDN 1 Madukoro, Lampung Utara yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Pertama di SMP Negeri 6 Kotabumi yang diselesaikan pada tahun 2019, dan dilanjutkan Pendidikan Menengah Atas di SMA Negeri 2 Kotabumi yang diselesaikan pada tahun 2022. Kemudian, penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SMMPTN pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung sebagai Anggota dan Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) pada periode 2023-2024 dan 2024-2025.

Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Gaya Baru V, Kecamatan Bandar Surabaya, Kabupaten Lampung Tengah, Lampung selama 40 hari, yaitu Januari – Februari 2025, Kemudian pada Juli – Oktober 2025 penulis melaksanakan Kerja Praktik pada Proyek Rekonstruksi Jalan Ruas Wates - Metro (Link. 027) di Kabupaten Lampung Tengah, Lampung. Mulai pada tahun 2025 juga, penulis melakukan penelitian yang berjudul “ Stabilitas dan Kuat Tekan Perkerasan *Wearing Course* (WC) Menggunakan Bahan Pengikat Limbah Plastik *LDPE* (*Low-Density Polyethylene*)” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

## PERSEMBAHAN

*Alhamdulillahhirabbalamin, dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji bagi Allah Swt atas limpahan rahmat, nikmat, kekuatan, dan kesempatan, kuucapkan syukur atas Karunia Mu dan dengan segala kerendahan hati. Akhirnya saya dapat menyelesaikan karya yang semoga menjadikan saya insan yang berguna, bermanfaat, dan bermartabat.*

*Skripsi ini kupersembahkan kepada kedua orangtuaku Mama dan Bapak yang selalu menuntunku dengan sabar dan penuh kasih. Terima kasih atas semua pelajaran hidup, semangat, dan doa yang kalian berikan. Aku bersyukur memiliki orangtua sekuat dan setulus kalian. Semoga karya sederhana ini bisa membuat kalian tersenyum bangga.*

*Untuk Adik saya yang selalu mensupport selama masa kuliah saya. Untuk keluarga yang selalu hadir dengan doa, semoga karya ini menjadi hadiah kecil yang membawa kebahagiaan untuk kita semua.*

*Skripsi ini kupersembahkan untuk sahabat-sahabat yang menjadi keluarga kedua bagiku. Tanpa kalian, mungkin perjalanan ini terasa lebih sulit.*

*Untuk dosen yang selalu memberikan kritik dan saran dengan sabar, terima kasih atas semua ilmu berharga yang tak ternilai.*

*Terima kasih untuk teman-teman keluarga besar Angkatan 2022 atas dukungannya dalam proses yang panjang menemanin perjalanan kuliah dari awal hingga akhir studi.*

*Skripsi ini kupersembahkan untuk diriku sendiri, yang telah berjuang keras melewati segala tantangan. Terima kasih karena tidak menyerah meski banyak rintangan menghadang. Semoga karya ini menjadi pijakan untuk masa depan yang lebih baik.*

## **MOTTO**

**“Dan Dia mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahuinya.”**

**(Q.S. Al-'Alaq:5)**

**“Semua orang adalah jenius. Tetapi jika Anda menilai seekor ikan dari kemampuannya memanjat pohon, ikan itu akan menghabiskan seluruh hidupnya dengan meyakini bahwa ia bodoh. ”**

**(Albert Einstein)**

**“Pasti doamu yang lancarkan upayaku  
Mesti doa yang meluncur dari bibirmu  
Dan yang kutahu kau takkan pernah berhenti  
Tumbuhku kini semoga sesuai yang kau impi”**

**(Perunggu – Gemilang)**

***“In the end, we arrived here.”***

## SANWACANA

Atas berkat Rahmat hidayat Allah S.W.T. dengan mengucapkan puji Syukur Alhamdulillah, penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Stabilitas dan Kuat Tekan Perkerasan *Wearing Course* (WC) Menggunakan Bahan Pengikat Limbah Plastik *LDPE (Low-Density Polyethylene)*” sebagai salah satu syarat dalam mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung. Pada penyusunan laporan ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM, ASEAN, Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil sekaligus Dosen Pembimbing Utama, yang dengan penuh kesabaran telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan banyak ilmu serta masukan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas waktu, perhatian, dan dedikasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan yang Bapak berikan dibalas dengan keberkahan dan kebaikan yang berlipat.
6. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Aleksander Purba, ST., MT., IPM. ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan selama proses penyelesaian skripsi ini. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas

perhatian, ilmu, dan motivasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Bapak senantiasa dibalas dengan keberkahan.


7. Ibu Dr. Ir. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan evaluasi, masukan yang konstruktif, serta kritik dan saran yang sangat membantu dalam penyempurnaan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kontribusi dan ilmu yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Ibu senantiasa mendapatkan keberkahan.
8. Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku dosen Pembimbing Akademik atas bimbingan dan pengarahan selama masa perkuliahan.
9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang sudah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat dalam proses pembelajaran agar lebih baik kedepannya.
10. Seluruh Staff dari Laboratorium Jalan Raya (Pak Suroto, Mas Andi, Mas Ihsan, dan Bang Kadek) yang sudah memberikan fasilitas sarana prasarana dalam menunjang penelitian serta memberikan saran, dan dukungan serta bimbingan selama kami melakukan penelitian.
11. Seluruh Staff Administrasi Jurusan Teknik Sipil yang selalu membantu dalam administrasi selama perkuliahan penulis.
12. Keluarga tercinta, Mama Lusi dan Bapak Arie serta Adik Ridho, yang senantiasa memberikan perhatian, doa, kasih sayang, serta dukungan moral, material, juga menjadi penyemangat dan motivasi terbesar penulis untuk menyelesaikan skripsi.
13. Tim Lab Jalan, Rafael Aidil Azra dan Moza Rizkyta Kayla yang sangat membantu selama proses penulisan dan memberikan warna selama proses penelitian di Lab dengan segala canda dan tingkah laku aneh yang terjadi setiap harinya. Terima kasih Tim Lab Jalan yang senantiasa sabar membantu apabila ada kesulitan.
14. APAKEK, teman – teman kuliah penulis yang selalu menemani dan memberikan dukungan kepada penulis, baik dukungan hati dan perasaan serta memberikan hiburan serta telah berkontribusi atas kesanggupan saya untuk menjalani masa-masa perkuliahan ini. Terimakasih karena dengan adanya kalian menjadi salah satu alasan saya bertahan di dunia perkuliahan ini.

15. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2022 (TEGAS) yang menemani penulis berjuang dari awal perkuliahan, memberikan semangat dan dukungan sampai penulis bisa menyelesaikan penulisan ini. terimakasih kita sudah bertahan dan menjalani kehidupan skripsi yang menyenangkan ini.
16. Kepada abang dan kakak, khususnya keluarga besar Teknik Sipil angkatan 2020, terima kasih atas bantuan, arahan, dan pengalaman yang telah diberikan selama masa perkuliahan. Kepada adik-adik angkatan 2024, terima kasih atas kebersamaan dan canda tawa yang telah diberikan. Semoga kalian semua dapat menyelesaikan studi dengan lancar dan tepat waktu.
17. Kepada seseorang yang tidak kalah penting kehadirannya, Apita Fatimah, A.Md.Kes. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup sesungguhnya yang baru dimulai ini. Telah menjadi tempat berkeluh kesah, pendamping dalam segala hal yang menemani, mendukung dan menghibur dikala sedih. Semoga Allah selalu memberi keberkahan dalam segala hal yang di lalui.
18. Dan yang terakhir, kepada diri sendiri, Denny Kurniawan, atas segala perjuangan yang telah dilalui. Terima kasih karena telah bertahan di tengah kelelahan, tetap kuat saat keraguan datang, dan terus melangkah meskipun perjalanan terasa panjang dan penuh tantangan. Setiap proses, air mata, doa, serta pengorbanan menjadi bukti bahwa tidak ada usaha yang sia-sia. Terima kasih karena tidak pernah memilih untuk menyerah hingga akhirnya mampu menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga saran dan masukan membangun diperlukan oleh penulis dikemudian hari. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna,

Bandar Lampung, 24 April 2026

Penulis,

  
Denny Kurniawan

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Perkerasan Jalan.....	5
2.2 Bahan Campuran Perkerasan .....	13
2.3 Limbah Plastik sebagai Bahan Modifikasi Aspal .....	18
2.4 Stabilitas dan Kuat Tekan.....	19
2.5 Minyak Jelantah Sebagai Pencampur Limbah Plastik LDPE .....	22
2.6 Penelitian Terdahulu .....	23
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Diagram Alir Penelitian</b> .....	<b>26</b>
3.2 Lokasi Penelitian.....	27
3.3 Bahan – Bahan Penelitian .....	27
3.4 Peralatan Penelitian.....	29
3.5 Prosedur Penelitian .....	31
3.5.1 Studi Literatur.....	31
3.5.2 Persiapan Bahan .....	32
3.5.3 Pengujian Bahan.....	32
3.5.4 Perancangan Gradasi Agregat.....	33
3.5.5 Jumlah Benda Uji .....	35
3.5.6 Pembuatan Benda Uji <i>Marshall</i> .....	35
3.5.7 Pembuatan Benda Uji Kuat Tekan .....	37
3.5.8 Pengujian Benda Uji sesuai Kondisi Pengujian dengan Alat <i>Marshall</i> .....	38

3.5.9	Pengujian Benda Uji sesuai Kondisi Pengujian dengan Alat <i>Compression Testing Machine (CTM)</i> .....	38
3.5.10	Analisis Data dan Pembahasan Hasil .....	40
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>41</b>
1.	Hasil Pengujian Agregat.....	41
2.	Hasil Pengujian <i>Marshall</i> .....	43
3.	Hasil Pengujian Kuat Tekan .....	53
4.	Hubungan Hasil Uji Marshall dan Uji Kuat Tekan.....	57
5.	Komparasi Dengan Penelitian Terdahulu .....	59
<b>V.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>61</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
	<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Plastik LDPE.....	17
3.1. Diagram alir penelitian.....	26
3.2. Diagram alir penelitian (lanjutan).....	27
3.3. Agregat Kasar.....	28
3.4. Agregat Halus.....	28
3.5. <i>Filler</i> .....	28
3.6. Plastik.....	29
3.7. Minyak Jelantah.....	29
3.8. Grafik Gradasi Campuran AC-WC.....	34
4.1. Grafik Hubungan Kadar Plastik Dengan Nilai Stabilitas.....	44
4.2. Grafik Hubungan Kadar Plastik Dengan Nilai <i>Flow</i> .....	45
4.3. Grafik Hubungan Kadar Plastik Dengan Nilai MQ.....	46
4.4. Grafik Hubungan Kadar Plastik Dengan Nilai VIM.....	49
4.5. Diagram Batang Kadar Optimum Plastik.....	52
4.6. Grafik Hubungan Kadar Plastik dengan Kuat Tekan.....	54
4.7. Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan & Stabilitas.....	58

**DAFTAR TABEL**

Tabel	Halaman
2.1. Amplop Gradasi Agregat Campuran Untuk AC-WC.....	14
2.2. Amplop Gradasi Agregat Campuran Untuk AC-WC (lanjutan) .....	15
2.3. Persyaratan Agregat Kasar Untuk AC-WC.....	15
2.4. Persyaratan Agregat Kasar Untuk AC-WC (lanjutan) .....	16
3.1. Standar Pemeriksaan Agregat .....	33
3.2. Gradasi agregat perkerasan <i>Wearing Course</i> (WC) .....	34
3.3. Jumlah Benda Uji.....	35
4.1. Hasil Pengujian Agregat.....	41
4.2. Rekapitulasi Nilai Parameter <i>Marshall</i> Dengan Campuran LDPE.....	43
4.3. Rekapitulasi Nilai Kuat Tekan Dengan Campuran LDPE. ....	54
4.4. Rekapitulasi Nilai Stabilitas dan Kuat Tekan.....	57

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang berperan penting dalam menunjang mobilitas masyarakat, distribusi barang, serta pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Ketersediaan jalan dengan kualitas yang baik tidak hanya memberikan kenyamanan dan keselamatan bagi pengguna, tetapi juga menjadi penunjang utama aktivitas sosial dan pembangunan daerah. Namun, kualitas jalan di Indonesia seringkali mengalami penurunan lebih cepat dari umur rencana akibat kerusakan dini seperti retak, alur (*rutting*), lubang, maupun deformasi plastis.

Dalam konstruksi jalan, lapisan Perkerasan *Wearing Course* adalah lapisan aus yang terletak di bagian paling atas perkerasan lentur. Lapisan ini berfungsi menerima beban lalu lintas secara langsung, melindungi lapisan di bawahnya, serta menjamin kenyamanan berkendara dengan permukaan jalan yang rata, halus, dan kedap air. Oleh karena itu, material *Wearing Course* harus memiliki stabilitas tinggi, ketahanan terhadap deformasi, serta daya ikat yang baik antara agregat dan aspal sebagai bahan pengikat (Sukirman, 1999).

Salah satu penyebabnya adalah keterbatasan aspal murni sebagai bahan pengikat, ketika bahan pengikat yang tersedia semakin sedikit sedangkan kebutuhan melebihi dari yang tersedia maka cenderung mempengaruhi kualitas perkerasan tersebut terhadap beban lalu lintas berat dan perubahan suhu ekstrem. Hal ini mendorong perlunya inovasi teknologi material untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan.

Di sisi lain, Indonesia menghadapi masalah serius terkait limbah plastik. Limbah plastik di Indonesia menurut data statistik Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) 2021, sampah plastik menempati

urutan ke-2 terbesar setelah sampah organik kuliner. Plastik sudah menjadi salah satu bahan yang paling umum digunakan dalam kehidupan kita sehari-hari, pada tahun 2021 Indonesia menghasilkan 25,95 juta ton atau 15,96% dari total sampah yang dihasilkan. Hal ini menjadi salah satu permasalahan sekaligus tantangan yang harus ditangani secara serius bagi pemerintah melalui regulasi untuk dapat mengelola limbah plastik ini secara baik, sehingga dapat meminimalisir dampak pencemaran lingkungan baik tanah, air maupun udara (Purwanto & Hikmah Perkasa, 2023). Salah satu jenis plastik yang paling banyak digunakan adalah *Low-Density Polyethylene* (LDPE), yang umumnya berasal dari kantong belanja, kemasan makanan, serta botol minuman sekali pakai. Akumulasi limbah LDPE tidak hanya menurunkan kualitas lingkungan, tetapi juga menambah beban pencemaran tanah dan perairan.

Mengacu pada hal tersebut, maka penulis ingin melakukan pengujian terhadap perkerasan *Wearing Course* yang dimodifikasi dengan menggunakan limbah plastik LDPE sebagai bahan pengikat utama.

## 1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang akan dibahas pada penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui penggunaan plastik LDPE sebagai bahan pengikat dapat meningkatkan stabilitas dan kuat tekan perkerasan *Wearing Course* dengan pengujian *Marshall Test* dan *Compression Testing Machine* (CTM).
2. Menganalisis perbandingan karakteristik aspal lapis permukaan dengan bahan pengikat utama limbah plastik LDPE dengan kadar 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, dan 15%.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengkaji stabilitas campuran perkerasan *Wearing Course* (WC) menggunakan bahan pengikat plastik LDPE.

2. Mengkaji kuat tekan campuran perkerasan *Wearing Course* (WC) menggunakan bahan pengikat plastik LDPE.

#### 1.4 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat efektif dan sesuai dengan tujuan, penelitian ini perlu dibatasi. Lingkup penelitian ini terbatas pada:

1. Perencanaan perkerasan *Wearing Course* (WC) menggunakan gradasi yang mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018.
2. Sumber bahan pengikat pada penelitian ini adalah plastik *Low-Density Polyethylene* (LDPE).
3. Penelitian ini didasarkan pada pengujian *Marshall* untuk mengetahui kinerja campuran aspal dengan limbah plastik *Low-Density Polyethylene* (LDPE), yaitu pada nilai Stabilitas, Flow, VIM dan *Marshall Quotient*.
4. Penelitian ini didasarkan pada pengujian kuat tekan untuk mengetahui kinerja campuran aspal dengan limbah plastik *Low-Density Polyethylene* (LDPE).
5. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Fakultas Teknik Universitas Lampung.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya kajian ini, diharapkan mampu memberikan manfaat bagi dunia konstruksi, khususnya konstruksi jalan raya dan menambah wawasan mengenai penggunaan plastik sebagai bahan pengikat utama campuran limbah plastik terhadap perkerasan *Wearing Course* yang ditinjau, apabila penelitian ini memberikan hasil yang positif, dapat digunakan pada konstruksi jalan raya di Indonesia sekaligus juga dapat menjadi salah satu solusi terhadap permasalahan sampah yang semakin besar di Indonesia.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

### **I. Pendahuluan**

Pada bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan dan batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

### **II. Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisikan pembahasan dari teori-teori dan rumus-rumus yang digunakan untuk menunjang penelitian yang diperoleh dari berbagai sumber.

### **III. Metodologi Penelitian**

Bab ini akan menjelaskan mengenai metode yang digunakan dalam penelitian untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan dalam proses pengolahan data.

### **IV. Hasil dan Pembahasan**

Pada bab ini berisi tentang pelaksanaan penelitian yang dilakukan mencakup hasil pengumpulan data, pengolahan data, analisis dan pembahasan data berdasarkan hasil yang diperoleh dan teori yang ada.

### **V. Kesimpulan dan Saran**

Bab ini akan berisi kesimpulan yang diambil dari penelitian ini dan saran. Pada akhir penulisan skripsi ini akan dilampirkan daftar pustaka sebagai referensi penunjang yang digunakan dan lampiran yang berisikan data-data penunjang dalam proses pengolahan data.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan suatu struktur yang dibangun di atas tanah dasar (*subgrade*) untuk menerima, menahan, dan menyebarkan beban lalu lintas ke lapisan tanah di bawahnya agar tidak terjadi kerusakan struktural. Struktur ini dirancang untuk memastikan agar tekanan yang diterima tanah dasar berada dalam batas daya dukungnya, sehingga tidak mengalami deformasi permanen. Dengan demikian, setiap lapisan perkerasan harus memiliki fungsi dan kekuatan tertentu agar dapat bekerja sebagai satu kesatuan sistem yang stabil dan tahan lama.

Kinerja perkerasan jalan sangat ditentukan oleh ketebalan, kekakuan, dan stabilitas lapisan penyusunnya. Ketebalan lapisan berfungsi untuk mengurangi tegangan yang diterima tanah dasar, sedangkan kekakuan dan stabilitas diperlukan agar perkerasan mampu menahan beban berulang tanpa mengalami kerusakan seperti retak, alur (*rutting*), maupun deformasi plastis. Menurut (Sukirman, 1999), kinerja perkerasan sangat bergantung pada kemampuan lapisan-lapisannya dalam mendistribusikan beban lalu lintas secara merata ke tanah dasar serta ketahanannya terhadap pengaruh air dan perubahan suhu.

Lebih lanjut, (Suprpto, 2004) menjelaskan bahwa struktur perkerasan harus dirancang untuk memenuhi dua tujuan utama, yaitu tujuan struktural dan tujuan fungsional. Tujuan struktural berkaitan dengan kemampuan perkerasan dalam mendukung beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan selama umur rencana, sementara tujuan fungsional menitikberatkan pada kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan, seperti kerataan permukaan, kekesatan, dan ketahanan terhadap cuaca. Lapisan permukaan yang baik akan mampu

menahan gaya gesek roda kendaraan, mencegah masuknya air ke lapisan bawah, serta mempertahankan kenyamanan berkendara.

Menurut (Bina Marga, 2020), perkerasan jalan yang baik harus memenuhi beberapa kriteria utama, yaitu kekuatan struktural yang cukup, stabilitas terhadap beban lalu lintas berat, kedap terhadap air, ketahanan terhadap perubahan suhu, serta efisiensi biaya pemeliharaan. Kombinasi dari aspek-aspek tersebut menjadikan perkerasan jalan tidak hanya kuat secara struktur, tetapi juga awet dan ekonomis dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pemilihan material, metode pelaksanaan, serta pengendalian mutu menjadi faktor penting dalam menjamin kinerja optimal dari suatu konstruksi jalan.

Perkerasan jalan pada dasarnya merupakan struktur berlapis yang dirancang untuk menahan dan menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar secara aman dan efisien. Dua komponen utamanya, yaitu kombinasi agregat atau gradasi dan bahan pengikat, memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan kekuatan, keawetan, serta kinerja perkerasan secara keseluruhan. Agregat berfungsi sebagai rangka utama yang menanggung beban, sedangkan bahan pengikat berperan menyatukan butiran agregat agar terbentuk struktur yang stabil dan padat. Secara umum, perkerasan jalan dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*) yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, dan perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang menggunakan mortar semen atau beton semen Portland (PCC) sebagai bahan pengikatnya. Masing-masing jenis memiliki karakteristik, metode pelaksanaan, serta biaya pemeliharaan yang berbeda, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kondisi lalu lintas, daya dukung tanah, serta umur rencana jalan (Sukirman, 1999).

Salah satu parameter penting dalam menilai kinerja lapisan perkerasan adalah kuat tekan. Kuat tekan menunjukkan kemampuan suatu material, seperti campuran beraspal, dalam menahan gaya tekan maksimum sebelum mengalami kerusakan. Nilai kuat tekan yang tinggi menandakan material

tersebut memiliki kekakuan dan daya dukung yang baik terhadap beban lalu lintas berulang. Dalam konteks campuran erkerasan *Wearing Course* (WC), pengujian kuat tekan biasanya dilakukan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap deformasi vertikal akibat tekanan beban kendaraan. Semakin tinggi nilai kuat tekan, maka semakin besar pula kemampuan lapisan dalam mempertahankan bentuk dan kestabilannya.

Dalam upaya meningkatkan nilai kuat tekan serta stabilitas campuran aspal, berbagai penelitian telah dilakukan dengan menambahkan bahan modifikasi, salah satunya limbah plastik jenis *Low-Density Polyethylene* (LDPE). LDPE merupakan jenis plastik termoplastik dengan densitas rendah (sekitar 0,91–0,94 g/cm<sup>3</sup>) yang memiliki sifat fleksibel, tahan air, dan resisten terhadap bahan kimia. Ketika digunakan sebagai bahan pengikat atau bahan tambahan pada campuran aspal, LDPE dapat meningkatkan ikatan antarbutir agregat, mengurangi rongga udara, serta memperbaiki elastisitas campuran.

Penelitian oleh (Afriyanto et al., 2019) dan (Didik & Purwantoro, 2023) menunjukkan bahwa penambahan LDPE dalam campuran AC–WC mampu meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* dan kuat tekan, sekaligus menurunkan nilai *flow*, yang berarti campuran menjadi lebih kuat dan tidak mudah mengalami deformasi plastis. Selanjutnya oleh (Batubara, 2024) dan (Sukowati et al., 2024) menunjukkan penambahan LDPE pada campuran AC-WC juga meningkatkan nilai stabilitas yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena LDPE berfungsi memperkuat struktur ikatan antarpartikel agregat serta meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi. Selain itu, (Basheet & Latief, 2024) juga menyatakan bahwa aspal modifikasi LDPE memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen yang lebih baik dibandingkan aspal konvensional.

Dari sisi lingkungan, penggunaan LDPE pada campuran perkerasan jalan juga memberikan manfaat besar karena dapat mengurangi volume limbah plastik

yang sulit terurai. Dengan demikian, penerapan teknologi aspal modifikasi plastik tidak hanya meningkatkan kualitas mekanis dan kuat tekan campuran aspal, tetapi juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular, yaitu memanfaatkan limbah menjadi bahan konstruksi yang bernilai guna tinggi.

Berikut merupakan fungsi-fungsi aspal lapis permukaan:

#### 1. Fungsi struktural

Lapis permukaan memiliki fungsi utama sebagai elemen struktural yang berperan langsung dalam menerima beban roda kendaraan dan menyalurkannya secara merata ke lapisan di bawahnya. Beban kendaraan yang bekerja berulang kali dapat menimbulkan tegangan tinggi dan deformasi plastis apabila lapisan ini tidak memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai. Oleh karena itu, stabilitas struktural lapisan permukaan menjadi sangat penting, terutama pada jalan dengan lalu lintas padat dan kendaraan berat seperti truk atau bus.

Stabilitas lapis permukaan dipengaruhi oleh kualitas material penyusunnya, gradasi agregat, kadar aspal, serta kekuatan ikatan antarpartikel dalam campuran. Campuran dengan stabilitas tinggi mampu menahan gaya geser akibat roda kendaraan dan mencegah terjadinya alur (*rutting*) serta retak permanen (*cracking*) pada permukaan jalan. Penambahan bahan modifikasi seperti limbah plastik LDPE (*Low-Density Polyethylene*) dapat meningkatkan kekakuan dan kuat tekan campuran, karena LDPE memiliki sifat termoplastik yang lentur dan mampu memperkuat ikatan antara aspal dan agregat (Didik & Purwantoro, 2023). Dengan demikian, lapis permukaan yang stabil dan kuat akan memperpanjang umur layanan jalan serta mengurangi kebutuhan pemeliharaan.

#### 2. Fungsi protektif

Selain berfungsi secara struktural, lapis permukaan juga berperan sebagai lapisan pelindung (protektif) yang menjaga lapisan pondasi dan tanah dasar

dari pengaruh eksternal seperti air hujan, suhu ekstrem, dan sinar ultraviolet. Sifat kedap air (*impermeable*) dari aspal berperan penting dalam mencegah infiltrasi air ke lapisan bawah. Jika air masuk ke dalam struktur perkerasan, maka tanah dasar dapat kehilangan daya dukungnya dan menyebabkan *pumping*, retak reflektif, atau penurunan lokal (*deformation*) pada badan jalan.

Selain air, fluktuasi suhu juga menjadi ancaman terhadap kinerja perkerasan. Pada siang hari, suhu permukaan jalan dapat mencapai lebih dari 60°C, sedangkan pada malam hari bisa turun drastis. Perubahan suhu ini dapat menyebabkan pemuaian dan penyusutan (*thermal cracking*) pada aspal. Penggunaan bahan pengikat modifikasi seperti LDPE terbukti mampu meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan oksidasi, karena plastik jenis ini memiliki titik leleh yang cukup tinggi ( $\pm 115^{\circ}\text{C}$ ) dan stabilitas termal yang baik (Afriyanto et al., 2019) dan (Basheet & Latief, 2024). Dengan demikian, lapis permukaan tidak hanya melindungi struktur di bawahnya dari air dan suhu ekstrem, tetapi juga mempertahankan kinerja mekanisnya dalam jangka panjang.

### 3. Fungsi fungsional

Fungsi fungsional lapis permukaan berkaitan dengan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Permukaan jalan harus rata, halus, tidak bergelombang, dan memiliki tingkat kekesatan (*skid resistance*) yang memadai. Kekesatan ini berperan penting untuk mencegah kendaraan tergelincir, terutama saat kondisi jalan basah. Permukaan jalan yang terlalu licin dapat menurunkan gesekan antara ban dan aspal, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan.

Selain keselamatan, kenyamanan berkendara juga menjadi indikator penting fungsi fungsional. Permukaan jalan yang halus akan mengurangi getaran kendaraan, meningkatkan efisiensi bahan bakar, dan memperpanjang umur ban kendaraan. Dalam konteks material, penggunaan campuran *Wearing*

*Course* dengan modifikasi LDPE dapat meningkatkan elastisitas dan ketahanan permukaan terhadap deformasi berulang. Sifat plastis LDPE membantu campuran mempertahankan bentuk permukaannya, sehingga kualitas fungsional jalan tetap terjaga meskipun mengalami beban lalu lintas berat dalam jangka panjang.

#### 4. Fungsi estetika

Selain memiliki fungsi teknis, lapis permukaan juga memberikan fungsi estetika pada infrastruktur jalan. Permukaan jalan yang mulus, rata, dan seragam warnanya tidak hanya meningkatkan kenyamanan visual bagi pengguna, tetapi juga menciptakan kesan lingkungan yang tertata dan terawat. Secara tidak langsung, hal ini dapat meningkatkan citra suatu kawasan, terutama pada area perkotaan, kawasan wisata, atau pusat pemerintahan.

Penggunaan teknologi material modern seperti aspal modifikasi LDPE juga dapat meningkatkan ketahanan warna dan tekstur permukaan terhadap cuaca, sehingga jalan tetap tampak bersih dan tidak cepat mengalami perubahan warna akibat oksidasi. Selain itu, penerapan konsep aspal ramah lingkungan dari limbah plastik LDPE turut menambah nilai estetika fungsional karena mengandung aspek keberlanjutan (*sustainability*). Dengan demikian, lapis permukaan tidak hanya memberikan manfaat struktural dan fungsional, tetapi juga berkontribusi terhadap nilai visual dan lingkungan yang lebih baik.

Agar dapat bekerja optimal, perkerasan jalan dibuat dalam beberapa lapisan:

##### a. Lapis Permukaan (*Surface Course*)

Lapis permukaan merupakan bagian teratas dari perkerasan yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan dan lingkungan sekitar. Karena posisinya yang paling atas, lapisan ini memegang peranan penting dalam memberikan kenyamanan serta keamanan berkendara.

- Fungsi utama:
  - 1) Menyediakan permukaan yang rata, tidak licin, dan nyaman dilalui kendaraan.
  - 2) Melindungi lapisan di bawahnya dari pengaruh air dan udara.
  - 3) Menahan gaya gesek akibat roda kendaraan sehingga harus tahan aus.
  - 4) Mendistribusikan beban ke lapisan pondasi di bawahnya.
- Syarat teknis: harus kedap air, stabil terhadap beban lalu lintas, serta memiliki ketahanan terhadap perubahan suhu.

b. Lapis Pondasi Atas (*Base Course*)

Lapis pondasi atas terletak tepat di bawah lapis permukaan. Fungsi lapisan ini adalah menyebarkan beban dari permukaan ke lapis pondasi bawah dan tanah dasar.

- Fungsi utama:
  - 1) Memberikan kekuatan tambahan terhadap perkerasan.
  - 2) Menjadi lapisan peralihan antara lapis permukaan dan lapis pondasi bawah.
  - 3) Mengurangi tegangan yang diterima tanah dasar.
- Syarat teknis: harus memiliki daya dukung tinggi, gradasi baik, serta mampu menahan beban berat tanpa terjadi deformasi permanen.

Bahan utama yang membedakan lapis pondasi atas (base), lapis antara (BC), dan lapis permukaan (WC) terletak pada gradasi dan ukuran agregatnya. Lapis pondasi atas menggunakan agregat kasar berukuran besar (maksimum 25–37,5 mm) untuk memberikan kekuatan struktural dan mendistribusikan beban. Lapis antara (BC) memakai gradasi menengah dengan ukuran agregat sekitar 19 mm sebagai penghubung antara base dan lapis permukaan. Sedangkan lapis permukaan (WC) menggunakan agregat halus berukuran kecil (maksimum 9,5–12,5 mm) agar menghasilkan permukaan jalan yang padat, rata, dan nyaman. Perbedaan ini bertujuan untuk menyeimbangkan kekuatan, stabilitas, dan kenyamanan dalam sistem perkerasan jalan (Bina Marga, 2020).

c. Lapis Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapis pondasi bawah adalah lapisan yang berada di antara pondasi atas dan tanah dasar. Lapisan ini biasanya dipasang untuk meningkatkan daya dukung perkerasan terutama jika tanah dasar memiliki kualitas rendah.

- Fungsi utama:
  - 1) Menyebarkan beban lebih merata ke tanah dasar.
  - 2) Melindungi tanah dasar dari kerusakan akibat air atau tekanan berlebih.
  - 3) Mencegah pencampuran antara agregat lapisan pondasi dengan tanah dasar.
  - 4) Berperan sebagai lapisan peresapan air (*drainase*) agar tidak terjadi genangan.
- Syarat teknis: harus cukup tebal, memiliki permeabilitas baik, serta mudah dipadatkan untuk mencapai kepadatan yang diinginkan.

Lapis pondasi bawah (*subbase course*) umumnya tidak menggunakan bahan pengikat, melainkan mengandalkan *interlocking* antarbutir agregat sebagai penyalur beban. Bahan yang digunakan berupa agregat granular atau sirtu dengan gradasi baik untuk mencapai kekompakan optimal. Berbeda dengan lapis pondasi atas yang dapat memakai bahan pengikat, lapis pondasi bawah berfungsi sebagai lapisan peralihan antara tanah dasar dan pondasi atas guna meningkatkan daya dukung serta mencegah rembesan air kapiler (Bina Marga, 2020).

d. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar adalah lapisan tanah asli atau tanah timbunan yang dipadatkan sebagai fondasi utama perkerasan jalan. Kondisi tanah dasar sangat menentukan tebal dan jenis lapisan perkerasan di atasnya.

- Fungsi utama:
  - 1) Menjadi tumpuan utama seluruh konstruksi jalan.
  - 2) Menahan dan menyebarkan beban yang diteruskan dari lapisan perkerasan di atasnya.

- 3) Menentukan stabilitas jangka panjang perkerasan.
- Syarat teknis:
    - 1) Memiliki daya dukung cukup (umumnya diukur dengan CBR – *California Bearing Ratio*).
    - 2) Tidak mudah mengembang atau menyusut karena perubahan kadar air.
    - 3) Dipadatkan sesuai dengan kepadatan maksimum standar *Proctor* atau *Modified Proctor*.

Perkerasan yang baik harus memenuhi syarat struktural, fungsional, keawetan, dan ekonomis. Namun, dalam praktiknya perkerasan sering mengalami kerusakan seperti retak, alur (*rutting*), gelombang, *bleeding*, hingga lubang (*potholes*). Penyebab kerusakan bisa berasal dari kualitas material, kondisi drainase, beban lalu lintas berlebih, serta pengaruh lingkungan (Sukirman, 1999). Oleh karena itu, diperlukan inovasi material baru, salah satunya pemanfaatan limbah plastik LDPE untuk meningkatkan kinerja lapisan perkerasan.

## 2.2 Bahan Campuran Perkerasan

Bahan campuran perkerasan merupakan komposisi utama yang membentuk struktur lapisan jalan, di mana setiap komponen memiliki peran penting dalam menentukan kekuatan, stabilitas, dan daya tahan perkerasan terhadap beban lalu lintas. Secara umum, campuran perkerasan terdiri atas agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan bahan pengikat. Agregat berfungsi sebagai kerangka utama yang menahan beban kendaraan, sedangkan bahan pengikat berperan menyatukan butiran agregat agar terbentuk campuran yang padat, stabil, dan kedap air. *Filler* digunakan untuk mengisi rongga antarbutir agregat dan membantu memperkuat ikatan antarpartikel dalam campuran.

### A. Agregat

Agregat adalah material granular berupa batu pecah, kerikil, pasir, maupun bahan sejenis yang berasal dari alam atau hasil olahan, dan digunakan sebagai komponen utama dalam campuran perkerasan jalan. Menurut (Sukirman, 1999), porsi agregat dalam campuran beraspal dapat mencapai 90–95% dari total berat campuran, sehingga kualitas agregat sangat menentukan kinerja perkerasan.

Kualitas agregat ditentukan oleh sifat fisik dan mekanisnya, antara lain bentuk butir, kekerasan, ketahanan aus, dan kebersihan. Agregat yang bersudut dengan permukaan kasar lebih disukai karena memberikan ikatan antarbutir yang baik, meningkatkan stabilitas, serta membantu mempertahankan kekesatan permukaan jalan (Bina Marga, 2020). Agregat menyusun 90–95% berat campuran dan berperan penting dalam kekuatan struktural. Sifat agregat yang memengaruhi kinerja campuran antara lain bentuk butir, gradasi, kekerasan, kebersihan, dan daya lekat terhadap aspal (Sukirman, 1999). Gradasi agregat menentukan kepadatan dan stabilitas campuran. Dalam penelitian ini menggunakan gradasi AC-WC batas tengah sebagai gradasi yang digunakan. Amplop gradasi agregat untuk AC-WC dapat dilihat pada tabel 2.1 dan 2.2.

Tabel 2.1. Amplop Gradasi Agregat Campuran Untuk AC-WC.

Ukuran Ayakan		Kumulatif Berat Lolos Terhadap Total Agregat (%)	
ASTM	(mm)	Batas Bawah	Batas Atas
$\frac{3}{4}$	19	100	100
$\frac{1}{2}$	12,5	90	100
$\frac{3}{8}$	9,5	77	90
No. 4	4,75	53	69
No. 8	2,36	33	53
No. 16	1,18	21	40
No. 30	0,6	14	30
No. 50	0,3	9	22

Tabel 2.2. Amplop Gradasi Agregat Campuran Untuk AC-WC (lanjutan).

No. 100	0,15	6	15
No. 200	0,075	4	9

Sumber : Spesifikasi Umum (2020)

Agregat dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu agregat kasar (butiran > 4,75 mm) yang berfungsi sebagai kerangka utama campuran, agregat halus (0,075–4,75 mm) yang mengisi rongga antar butir, serta *filler* ( $\leq 0,075$  mm). Persyaratan agregat kasar yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan 2.4 berikut:

Tabel 2.3. Persyaratan Agregat Kasar Untuk AC-WC.

Pengujian	Metoda Pengujian	Nilai
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i> (500 Putaran)	SNI 2417:2008	Maks. 30%
<i>Aggregate Impact Value</i> (AIV)	SNI 2417:2018	Maks.30%
<i>Aggregate Crushing Value</i> (ACV)	SNI 2417:2018	Min. 30%
		19 mm : 100% lolos
		12,5 mm : 90-100%
		9,5 mm : 77-90%
		4,75 mm : 54-69%
		2,36 mm : 34-48%
Analisa Saringan (Gradasi)	SNI ASTM C136:2012/SNI 03-4142:1996	1,18 mm : 23-36%
		0,6 mm : 15-27%
		0,3 mm : 9-19%
		0,15 mm : 6-13%
		0,075 mm : 4-8%

Tabel 2.4. Persyaratan Agregat Kasar Untuk AC-WC (lanjutan).

Berat Jenis dan Penyerapan Air (Agregat Kasar)	SNI 1969:2016	Berat Jenis (SSD) $\geq 2,5$ Penyerapan $\leq 3\%$
Berat Jenis dan Penyerapan Air (Agregat Halus)	SNI 1970:2016	Berat Jenis (SSD) $\geq 2,5$ Penyerapan $\leq 2\%$

Sumber: *Spesifikasi umum Bina Marga (2020)*.

Selain agregat utama, campuran perkerasan juga memerlukan *filler* atau bahan pengisi, yaitu material halus yang umumnya lolos saringan No. 200. *Filler* berfungsi untuk mengisi rongga di antara butiran agregat, meningkatkan kepadatan dan kohesi, serta membantu memperkuat ikatan antara agregat dengan bahan pengikat (seperti plastik LDPE). Jenis *filler* yang sering digunakan antara lain abu batu, semen, kapur, atau debu halus hasil pemecahan batu. Pada penelitian ini digunakan *filler* berupa semen portland (PCC). Penambahan *filler* dalam jumlah proporsional dapat meningkatkan stabilitas *Marshall* dan kuat tekan campuran, karena campuran menjadi lebih rapat dan homogen. Dengan demikian, kombinasi agregat bergradasi baik dan *filler* yang sesuai mampu menghasilkan perkerasan yang kuat, padat, dan tahan terhadap deformasi permanen.

#### B. Plastik LDPE (*Low-Density Polyethylene*)

Plastik LDPE (*Low-Density Polyethylene*) merupakan bahan termoplastik yang digunakan sebagai pengganti atau bahan pengikat alternatif dalam campuran perkerasan jalan. Termoplastik merupakan jenis polimer yang memiliki sifat dapat melunak ketika dipanaskan dan kembali mengeras saat didinginkan tanpa mengalami perubahan struktur kimia secara permanen. Sifat ini terjadi karena ikatan antar rantai molekul pada termoplastik relatif lemah (ikatan sekunder), sehingga memungkinkan rantai polimer untuk bergerak bebas saat menerima energi panas. LDPE memiliki struktur molekul bercabang dengan densitas rendah, yaitu sekitar 0,91–0,94 g/cm<sup>3</sup>, sehingga bersifat lentur, ringan, dan tahan terhadap air serta bahan kimia.

Ketika dilelehkan, LDPE dapat berfungsi seperti aspal dalam menyelimuti butiran agregat dan membentuk ikatan antarpartikel yang kuat dan elastis. Penggunaan LDPE dalam campuran perkerasan bertujuan untuk meningkatkan stabilitas, kuat tekan, dan ketahanan terhadap suhu tinggi, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap aspal berbasis minyak bumi (Afriyanto et al., 2019).



Gambar 2.1. Plastik LDPE.

Dari sisi kelebihan, LDPE memiliki beberapa karakteristik unggul. Pertama, ketahanan terhadap suhu tinggi lebih baik dibandingkan aspal konvensional karena titik lelehnya mencapai sekitar  $115^{\circ}\text{C}$ , sehingga tidak mudah mengalami pelunakan (*bleeding*). Kedua, fleksibilitasnya tinggi, sehingga mampu menahan deformasi berulang akibat beban lalu lintas tanpa mudah retak. Ketiga, tahan terhadap air dan oksidasi, membuat perkerasan lebih awet dan stabil di berbagai kondisi iklim. Selain itu, pemanfaatan LDPE juga memberikan manfaat lingkungan, karena membantu mengurangi volume limbah plastik yang sulit terurai dan mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan.

Namun, LDPE juga memiliki beberapa kekurangan. Proses pencampuran plastik dengan agregat membutuhkan pengaturan suhu yang tepat, karena suhu terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi plastik, sedangkan suhu terlalu rendah dapat membuat pencampuran tidak homogen. Selain itu, LDPE memiliki daya lekat terhadap agregat yang lebih rendah dibandingkan aspal murni, sehingga memerlukan kombinasi atau modifikasi

tertentu agar ikatannya optimal. Tantangan lainnya adalah pengendalian kualitas limbah plastik, karena variasi jenis dan tingkat kebersihan plastik dapat memengaruhi hasil akhir campuran.

Secara keseluruhan, penggunaan plastik LDPE sebagai bahan pengikat pada campuran perkerasan jalan memberikan alternatif inovatif yang meningkatkan performa mekanis dan durabilitas, sekaligus menawarkan solusi ramah lingkungan dalam mengatasi permasalahan limbah plastik (Didik & Purwantoro, 2023).

### **2.3 Limbah Plastik sebagai Bahan Modifikasi Aspal**

Pemanfaatan limbah plastik dalam campuran perkerasan merupakan salah satu inovasi penting di bidang teknik jalan yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja perkerasan sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat penumpukan limbah plastik. Plastik sebagai bahan polimer memiliki sifat mekanis yang baik, ringan, tahan lama, serta resisten terhadap degradasi alami. Sifat inilah yang membuat plastik sulit terurai di lingkungan, namun justru dapat dimanfaatkan dalam campuran perkerasan untuk meningkatkan stabilitas dan daya tahan terhadap suhu ekstrem (Xu & Zhao, 2022).

Dalam konstruksi jalan, limbah plastik seperti *Low-Density Polyethylene* (LDPE) dapat digunakan sebagai bahan pengikat utama atau bahan modifikasi dalam campuran perkerasan. LDPE memiliki kemampuan menyelimuti agregat dan membentuk ikatan antarpartikel yang kuat, sehingga mampu meningkatkan stabilitas *Marshall*, kuat tekan, dan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*). Penelitian oleh (Afriyanto et al., 2019) dan (Didik & Purwantoro, 2023) menunjukkan bahwa penggunaan LDPE dalam campuran perkerasan AC-WC menghasilkan peningkatan signifikan pada nilai stabilitas dan *Marshall Quotient* serta menurunkan nilai *flow*, menandakan campuran menjadi lebih padat dan kuat.

Secara umum, penerapan limbah plastik pada campuran perkerasan dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu *dry process* dan *wet process*. Pada *dry process*, plastik dicacah lalu dicampurkan dengan agregat panas sehingga berfungsi sebagai pengisi dan pengikat tambahan. Sedangkan pada *wet process*, plastik dilelehkan terlebih dahulu dan dicampurkan langsung dengan bahan pengikat untuk menghasilkan ikatan yang lebih homogen (Nurfadhillah & Sudisman, 2023). Kedua metode ini terbukti dapat meningkatkan kinerja mekanis perkerasan jalan dan memperpanjang umur layan konstruksi.

Selain manfaat teknis, pemanfaatan limbah plastik dalam campuran perkerasan juga memberikan keuntungan lingkungan dan ekonomi. Secara lingkungan, teknologi ini mampu mengurangi volume sampah plastik yang masuk ke TPA atau mencemari perairan, sedangkan secara ekonomi dapat mengurangi kebutuhan bahan pengikat konvensional yang harganya relatif mahal (Basheet & Latief, 2024). Dengan demikian, penerapan plastik LDPE dalam perkerasan jalan tidak hanya memperbaiki performa struktural, tetapi juga mendukung konsep pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular, yaitu mengubah limbah menjadi bahan konstruksi bernilai guna tinggi.

## 2.4 Stabilitas dan Kuat Tekan

Stabilitas dan kuat tekan merupakan dua parameter penting dalam menilai kinerja campuran beraspal panas (*Hot Mix Asphalt*), terutama untuk lapisan aus atau *Wearing Course* (WC). Kedua parameter ini berfungsi untuk menilai sejauh mana campuran mampu menahan beban lalu lintas berulang tanpa mengalami deformasi permanen atau kerusakan struktural.

Menurut (Bina Marga, 2020), stabilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk permanen, sedangkan kuat tekan menggambarkan kemampuan campuran menahan gaya tekan vertikal hingga batas maksimum sebelum hancur. Semakin tinggi nilai stabilitas dan kuat tekan, maka semakin baik kemampuan

lapisan perkerasan dalam mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan di bawahnya.

Stabilitas pada campuran aspal umumnya diuji menggunakan *Marshall Test*, sedangkan kuat tekan diuji menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). *Marshall Stability* menunjukkan ketahanan campuran terhadap gaya geser akibat beban roda kendaraan, sedangkan kuat tekan menunjukkan kemampuan campuran dalam menahan gaya tekan langsung. Hasil dari kedua pengujian ini dapat digunakan untuk menilai ketahanan campuran terhadap deformasi vertikal maupun retak akibat beban berulang (Wesli et al., 2024).

Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas dan kuat tekan antara lain:

1. Jenis dan gradasi agregat, yang menentukan kepadatan dan kekakuan kerangka campuran.
2. Kadar aspal atau bahan pengikat, yang memengaruhi viskositas dan daya lekat antarbutir agregat.
3. Temperatur pencampuran dan pemadatan, yang berpengaruh terhadap homogenitas campuran.
4. Jenis bahan modifikasi, seperti polimer atau limbah plastik LDPE, yang dapat meningkatkan elastisitas dan ketahanan terhadap deformasi.

Penambahan LDPE (*Low-Density Polyethylene*) sebagai bahan pengikat atau bahan modifikasi pada campuran AC–WC telah terbukti mampu meningkatkan nilai stabilitas dan kuat tekan. Hal ini dikarenakan LDPE memiliki sifat termoplastik dengan struktur molekul bercabang yang memungkinkan campuran menjadi lebih kuat, elastis, dan tahan terhadap suhu tinggi (Afriyanto et al., 2019). Penelitian oleh (Didik & Purwantoro, 2023) menunjukkan bahwa penambahan LDPE sebanyak 6% terhadap berat aspal dapat meningkatkan nilai stabilitas Marshall hingga lebih dari 20% dibandingkan aspal konvensional.

Selain itu, penelitian (Basheet & Latief, 2024) menegaskan bahwa campuran aspal yang dimodifikasi dengan LDPE menunjukkan peningkatan signifikan pada ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting resistance*) dan penurunan nilai *flow*, yang berarti campuran lebih kaku namun tetap memiliki fleksibilitas yang cukup untuk menahan beban dinamis. Karakteristik ini menjadikan LDPE sebagai bahan alternatif yang ideal untuk campuran Perkerasan *Wearing Course* pada daerah dengan suhu tinggi dan beban lalu lintas berat.

Dari sisi mekanisme, penambahan LDPE pada campuran beraspal berperan dalam memperkuat matriks pengikat antara aspal dan agregat, mengurangi rongga udara (*voids*), serta meningkatkan densitas campuran. Hal ini berakibat pada meningkatnya kuat tekan karena beban dapat disalurkan secara lebih merata antarpartikel agregat. Selain itu, LDPE juga meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi plastis akibat gaya tekan vertikal berulang, sehingga lapisan jalan menjadi lebih stabil dan tidak mudah mengalami alur (*rutting*) atau retak.

Dalam konteks keberlanjutan, peningkatan nilai stabilitas dan kuat tekan dengan memanfaatkan limbah plastik LDPE tidak hanya berdampak pada peningkatan kualitas struktural jalan, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan. Pemanfaatan LDPE membantu mengurangi volume limbah plastik yang sulit terurai, mendukung konsep ekonomi sirkular, serta menekan biaya penggunaan aspal murni berbasis minyak bumi (Ghani et al., 2022).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa stabilitas dan kuat tekan merupakan indikator utama dalam mengevaluasi kinerja campuran AC-WC yang dimodifikasi LDPE, di mana peningkatan kedua parameter tersebut menunjukkan peningkatan kualitas struktural, fungsional, dan durabilitas perkerasan jalan.

## 2.5 Minyak Jelantah Sebagai Pencampur Limbah Plastik LDPE

Minyak jelantah atau limbah minyak goreng bekas penyajian merupakan limbah rumah tangga yang jumlahnya besar dan potensial untuk dimanfaatkan dalam teknologi konstruksi jalan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa minyak jelantah (*waste cooking oil*, WCO) dapat digunakan sebagai bahan modifikasi atau pencampur dalam campuran perkerasan untuk meningkatkan sifat fleksibilitas, mengurangi viskositas bahan pengikat, dan mendukung penggunaan limbah lain seperti plastik *Low-Density Polyethylene* (LDPE) sebagai modifikasi atau pengganti sebagian bahan pengikat. Misalnya, studi oleh (Luo & Zhang, 2023) mencatat bahwa penggunaan WCO dan LDPE dalam campuran aspal dapat memperbaiki sifat aliran (*ductility*) dan viskositas aspal yang diperbarui.

Dalam aplikasi praktisnya, minyak jelantah berfungsi sebagai pelarut alami yang membantu menghambat kekakuan berlebihan yang mungkin ditimbulkan oleh plastik LDPE dalam campuran. Dengan kata lain, minyak jelantah dapat membantu plastisitas campuran, memperbaiki pencampuran, dan memungkinkan LDPE yang bersifat termoplastik dapat lebih homogen menyelimuti agregat. Studi (Rodrigues et al., 2020) menemukan bahwa kombinasi WCO dan LDPE dalam campuran aspal menunjukkan kinerja lebih baik dalam hal deformasi permanen (*rutting*) dan retak lelah (*fatigue*) dibandingkan campuran konvensional.

Namun demikian, penelitian tersebut juga mencatat tantangan penggunaan WCO cenderung menurunkan resistensi deformasi plastis pada suhu tinggi jika dosisnya terlalu besar atau tidak diimbangi dengan modifikasi lain. Selain itu, kualitas minyak jelantah (termasuk kandungan air, asam lemak bebas, dan kontaminan) dapat mempengaruhi kinerja campuran secara negatif jika tidak diproses terlebih dahulu. Dengan demikian, pemanfaatan minyak jelantah bersama LDPE dalam campuran perkerasan jalan merupakan solusi inovatif yang menjanjikan menggabungkan peningkatan kinerja mekanis serta aspek

keberlanjutan lingkungan namun memerlukan pengendalian mutu yang baik dan desain campuran yang tepat agar manfaatnya maksimal.

## 2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang campuran aspal yang menggunakan sampah plastik sebagai bahan substitusi aspal sudah banyak dilakukan namun tentang campuran aspal yang menggunakan plastik sebagai bahan pengikat utamanya di Indonesia masih belum ada. Penelitian mengenai aspal sebagai bahan substitusi tersebut dilakukan dengan menggunakan variasi persentase plastik ataupun jenis plastik yang berbeda dan dengan menggunakan campuran aspal yang berbeda juga. Jenis campuran aspal yang digunakan dalam beberapa penelitian antara lain AC-WC dan AC-BC dengan variasi persentase plastik yang berbeda.

Beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan antara lain:

1. (Afriyanto et al., 2019)

Penelitian ini meneliti pengaruh penambahan limbah plastik LDPE terhadap karakteristik dasar aspal. Berdasarkan hasil uji laboratorium, penambahan LDPE berpengaruh pada sifat fisik aspal seperti nilai penetrasi, titik lembek, dan daktilitas. Nilai penetrasi menurun seiring peningkatan kadar LDPE, sedangkan titik lembek meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa aspal menjadi lebih keras dan tahan terhadap suhu tinggi, namun tetap memiliki fleksibilitas yang cukup. Penelitian ini memberikan gambaran awal bahwa LDPE dapat digunakan sebagai bahan modifikasi aspal dalam campuran beraspal untuk meningkatkan daya tahan perkerasan terhadap perubahan suhu.

2. (Didik & Purwantoro, 2023)

Melakukan penelitian terhadap karakteristik Marshall pada campuran AC-WC dengan penambahan limbah plastik LDPE. Hasil penelitian memperlihatkan adanya peningkatan nilai stabilitas *Marshall* dan *Marshall Quotient*, serta penurunan *flow*. Temuan ini membuktikan bahwa LDPE

dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen, sehingga lebih sesuai untuk menahan beban lalu lintas berat.

3. (Wesli et al., 2024)

Meneliti pemanfaatan plastik LDPE dan arang tempurung kelapa sebagai substitusi sebagian aspal pada campuran AC-WC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan tersebut meningkatkan stabilitas campuran, menurunkan nilai *flow*, serta menghasilkan campuran yang lebih padat. Penelitian ini mengindikasikan bahwa LDPE dapat digunakan bersama material lain untuk menghasilkan aspal modifikasi dengan performa lebih baik.

4. (Nurfadhillah & Sudisman, 2023)

Penelitian dengan judul “*The Effect of Low Density Polyethylene Asphalt Additives on the Properties of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*”. Penelitian ini menggunakan metode *wet process*, dengan varian kadar LDPE antara 5% hingga 8% terhadap aspal panas. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan LDPE sebesar 7,5% dapat meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* hingga dua kali lipat dibanding tanpa plastik, dan juga dapat mengurangi konsumsi aspal hingga sekitar 7 %.

5. (Sitorus, 2018)

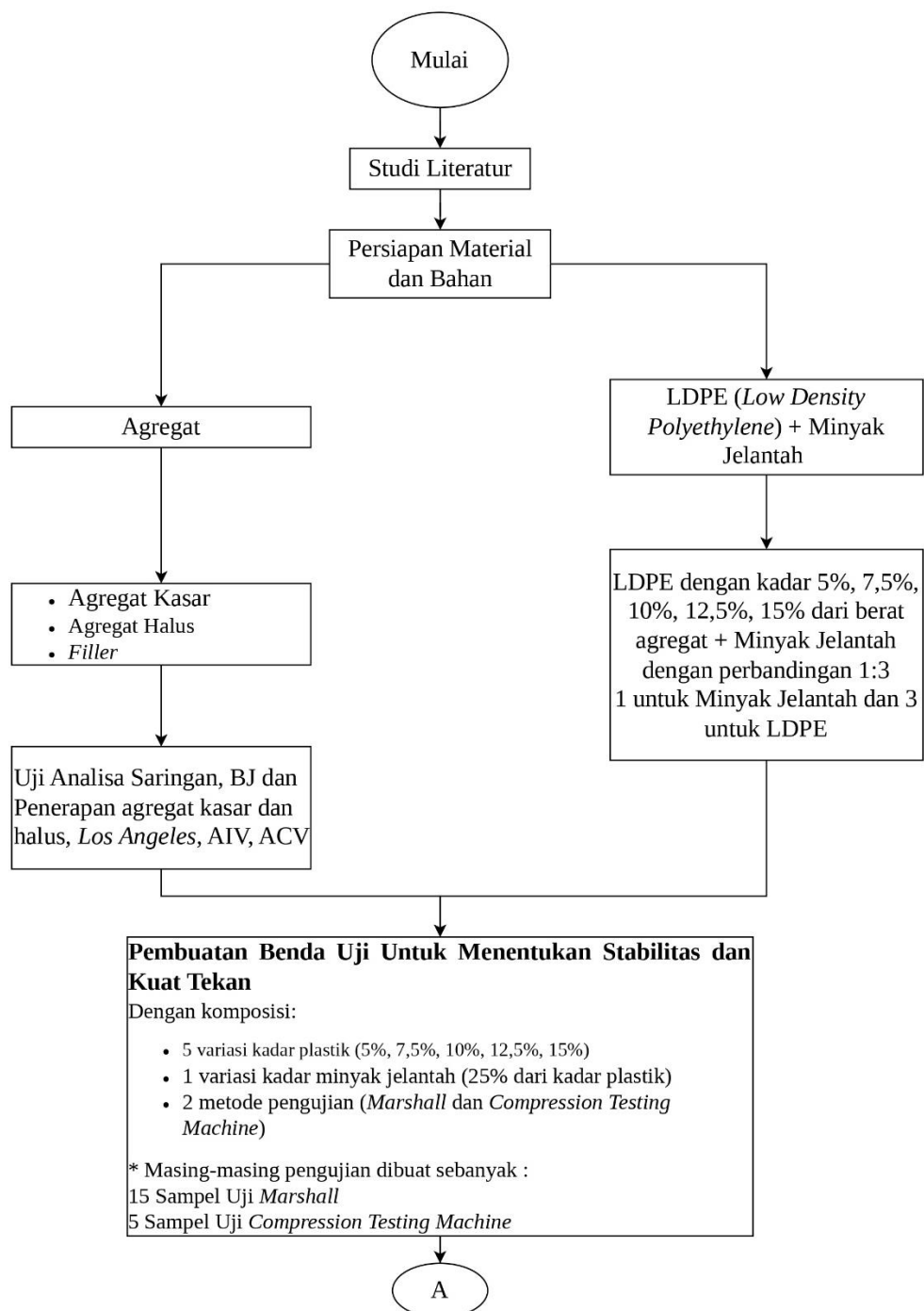
Penelitian *Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Tambah Campuran Aspal Pada Perkerasan Jalan AC-WC* dari Universitas Medan Area. Penelitian ini menambahkan LDPE sebagai bahan tambah (*filler* atau substitusi sebagian aspal) dengan variasi 0 %, 4 %, dan 6 %. Hasil uji *Marshall* menunjukkan bahwa penambahan 4 % LDPE meningkatkan stabilitas dari rata-rata 4004,316 kg menjadi 4637,348 kg, serta menurunkan pelelehan (*flow*). Namun pada 6 % LDPE, pelelehan terus menurun dan perubahan stabilitas tidak signifikan dibanding 4 %.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penelitian ini difokuskan pada peningkatan stabilitas dan kuat tekan perkerasan *Wearing Course* dengan memanfaatkan limbah plastik LDPE sebagai bahan pengikat. Tujuan utama penelitian ini adalah menghasilkan campuran beraspal yang memiliki daya tahan lebih baik terhadap suhu tinggi serta beban lalu lintas berat, sehingga mengurangi risiko pelemahan struktur perkerasan jalan. Pada penelitian ini digunakan variasi kadar LDPE sebesar 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, dan 15% untuk melihat pengaruhnya terhadap parameter *Marshall*, khususnya stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*, serta terhadap nilai kuat tekan campuran.

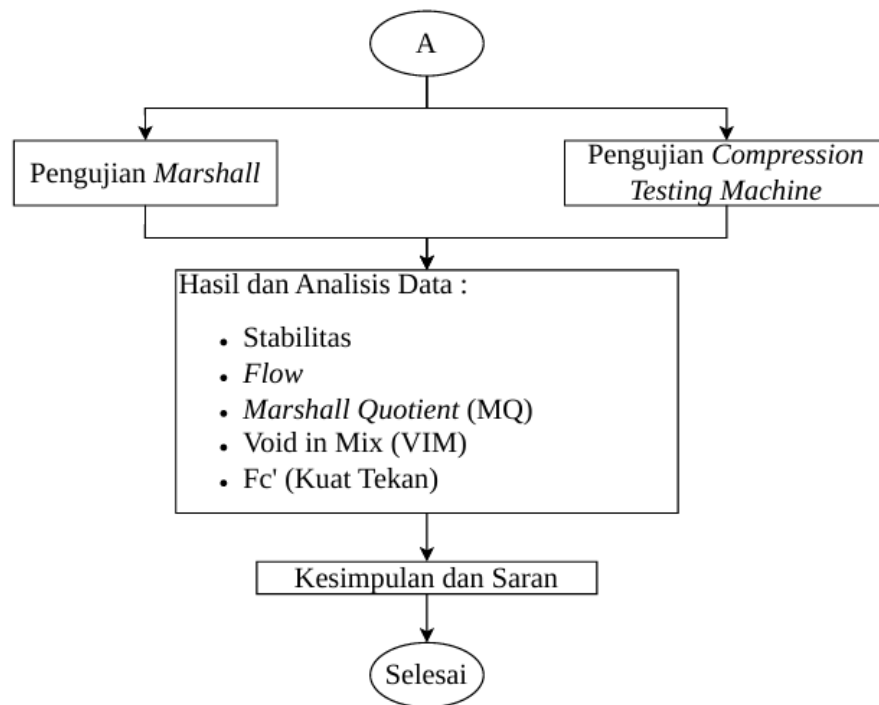
Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif inovatif dalam pemanfaatan limbah plastik LDPE sebagai bahan modifikasi aspal, sekaligus berkontribusi dalam pengurangan timbulan sampah plastik. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya meningkatkan kualitas teknis perkerasan jalan, tetapi juga mendukung upaya pembangunan berkelanjutan di bidang infrastruktur.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian (lanjutan).

### 3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Laboratorium Jalan Raya Teknik Sipil Universitas Lampung.

### 3.3 Bahan – Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan yaitu agregat yang tertahan ayakan No. 8 (2,36 mm).



Gambar 3.3. Agregat Kasar.

## 2. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan yaitu terdiri dari pasir atau hasil pengayakan batu pecah dan agregat yang lolos ayakan No.8 (2,36 mm).



Gambar 3.4. Agregat Halus.

## 3. Filler

*Filler* yang digunakan yaitu material yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) berupa semen portland (PCC).



Gambar 3.5. *Filler*.

#### 4. Plastik

Plastik yang digunakan yaitu Plastik *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang sudah dicacah supaya memudahkan pelelehan plastik tersebut.



Gambar 3.6. Plastik.

#### 5. Minyak Jelantah

Minyak jelantah yang digunakan yaitu minyak goreng bekas pakai yang sudah digunakan berulang kali untuk menggoreng makanan.



Gambar 3.7. Minyak Jelantah.

### 3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Satu Set Saringan/Ayakan (*Sieve*)

Satu set saringan tersebut digunakan untuk memisahkan agregat berdasarkan gradasi agregat menurut ukurannya.

#### 2. Alat Uji Pemeriksaan Agregat

Peralatan yang digunakan dalam pengujian agregat antara lain:

- a. Alat uji berat jenis untuk mengetahui berat jenis agregat
- b. Alat uji AIV dan ACV untuk mengetahui kekuatan agregat
- c. Mesin *Los Angeles* dalam melakukan uji abrasi untuk mengetahui keausan agregat
- d. Alat-alat penunjang yang meliputi oven, timbangan, *container*.

### 3. Alat Uji *Marshall*

Alat uji yang digunakan dalam metode *Marshall* antara lain:

- a. Mesin tekan *Marshall* yang terdiri dari kepala penekan berbentuk lengkung, cincin penguji yang berkapasitas 2500 kg dengan ketelitian 12,5 kg, dan dilengkapi dengan arloji tekan dengan ketelitian 0,25 mm beserta perlengkapannya.
- b. Cetakan benda uji berbentuk silinder yang berdiameter 4 inchi (10,16 cm) dan tinggi 3 inchi (7,62 cm) dengan pelat alas dan leher sambung.
- c. Alat *Marshall Automatic Compactor* yang digunakan untuk pemadatan campuran sebanyak 75 kali tumbukan untuk tiap sisi (atas dan bawah).
- d. Alat pengeluar benda uji yang sudah dipadatkan dari dalam cetakan berupa sebuah *ejector (extruder)*.
- e. Bak perendam (*water bath*) yang dilengkapi dengan pengatur suhu.
- f. Alat-alat penunjang yang meliputi *container*, oven, wajan penggorengan, sendok pengaduk, kompor, sarung tangan anti panas, termometer, timbangan, jangka sorong, *tipe-x* untuk menandai benda uji, dan sebagainya.

### 4. Alat Uji *Compression Testing Machine (CTM)*

Alat uji yang digunakan dalam metode uji kuat tekan antara lain:

- a. Mesin Uji Tekan (*Compression Testing Machine/CTM*), yaitu mesin yang digunakan untuk memberikan beban tekan secara bertahap pada benda uji hingga benda uji mengalami kerusakan. Mesin ini dilengkapi dengan sistem hidrolis dan manometer digital/analog untuk menunjukkan besar beban yang diterima benda uji dengan kapasitas umumnya 1000–2000 kN serta ketelitian  $\pm 1$  kN.

- b. Cetakan benda uji berbentuk segi enam, umumnya dengan ukuran tiap sisi 8 cm dan tinggi 6 cm, digunakan sebagai alternatif bentuk benda uji *paving block* untuk pengujian kuat tekan . Cetakan ini biasanya terbuat dari baja yang dilengkapi baut pengikat agar hasil cetakan rapat dan presisi.
- c. Pelat tekan (*bearing plates*), yaitu pelat baja berbentuk datar yang ditempatkan di atas dan di bawah benda uji pada saat pengujian. Fungsinya adalah untuk mendistribusikan beban tekan secara merata pada permukaan benda uji sehingga hasil pengujian lebih akurat.
- d. Alat perata beban (*spherically seated head*), yaitu kepala penekan berbentuk setengah bola yang dapat bergerak menyesuaikan posisi benda uji. Fungsinya agar beban terdistribusi merata dan mengurangi konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan hasil tidak akurat.
- e. Alat pengukur deformasi (*dial gauge* atau LVDT), yang digunakan untuk mengukur perubahan bentuk atau deformasi benda uji saat menerima beban tekan, dengan ketelitian hingga 0,01 mm.
- f. Peralatan pendukung, meliputi oven untuk pengeringan benda uji, timbangan digital, mistar ukur/jangka sorong untuk mengukur dimensi benda uji, wadah penyimpanan benda uji, serta sarung tangan pelindung untuk keselamatan kerja.

### **3.5 Prosedur Penelitian**

Prosedur penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut:

#### **3.5.1 Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan untuk mencari referensi teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Referensi pada penelitian ini didapatkan dari buku, jurnal, artikel, dan laporan penelitian.

### 3.5.2 Persiapan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu agregat kasar, agregat halus, *filler*, serta plastik LDPE ditambah minyak jelantah. Bahan-bahan tersebut diperoleh melalui proses berikut:

1. Agregat Kasar, Agregat Halus, dan *Filler*
  - a. Susun saringan secara berurutan dari ukuran yang paling besar di atas hingga yang paling kecil di bawah.
  - b. Masukkan agregat ke dalam saringan lalu ayak agregat.
  - c. Setelah di ayak, ambil masing-masing agregat yang tertahan di setiap saringan, dan pisahkan agregat berdasarkan ukuran saringan.
  - d. Lakukan kembali langkah a,b, dan c sampai banyaknya agregat sesuai kebutuhan.
2. Jenis Plastik yang digunakan yaitu plastik LDPE yang didapatkan dari *e-commerce*, kemudian plastik tersebut ditempatkan di Laboratorium Inti Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung untuk dilakukan pengujian dan penelitian. Persentase antara plastik dan minyak jelantah digunakan 1:3 berdasarkan eksperimental peneliti, perbandingan 1 untuk minyak jelantah dan 3 untuk plastik berdasarkan eksperimental peneliti.

### 3.5.3 Pengujian Bahan

Untuk mengetahui karakteristik dari bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini memenuhi standar spesifikasi yang telah ditentukan atau tidak, maka harus dilakukan pengujian terlebih dahulu.

#### 1. Pengujian Agregat

Untuk menggunakan agregat sebagai bahan pengisi pada campuran perkerasan *Wearing Course* (WC), maka harus dilakukan pengujian terlebih dahulu dengan komposisi gradasi yang sesuai dan gradasi yang digunakan telah memenuhi spesifikasi. Dalam penelitian ini,

pengujian agregat yang dilakukan yaitu pengujian analisa saringan, pengujian berat jenis dan penyerapan, pengujian AIV dan ACV, serta pengujian *Los Angeles*. Metode pengujian ini didasarkan pada Spesifikasi Umum 2018 dari Peraturan Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia.

Tabel 3.1 Standar Pemeriksaan Agregat.

No.	Jenis Pengujian	Standar Uji
1	Analisa Saringan	SNI ASTM C136:2012
2	Berat Jenis (berat jenis <i>bulk</i> , berat jenis SSD, dan berat jenis semu) dan Penyerapan Agregat Halus	SNI 1970:2016
3	Berat Jenis (berat jenis <i>bulk</i> , berat jenis SSD, dan berat jenis semu) dan Penyerapan Agregat Kasar	SNI 1969:2016
4	<i>Los Angeles Test</i>	SNI 2417:2008
5	<i>Aggregate Impact Value Test</i> (AIV)	SNI 2417:2018
6	<i>Aggregate Crushing Value Test</i> (ACV)	SNI 2417:2018

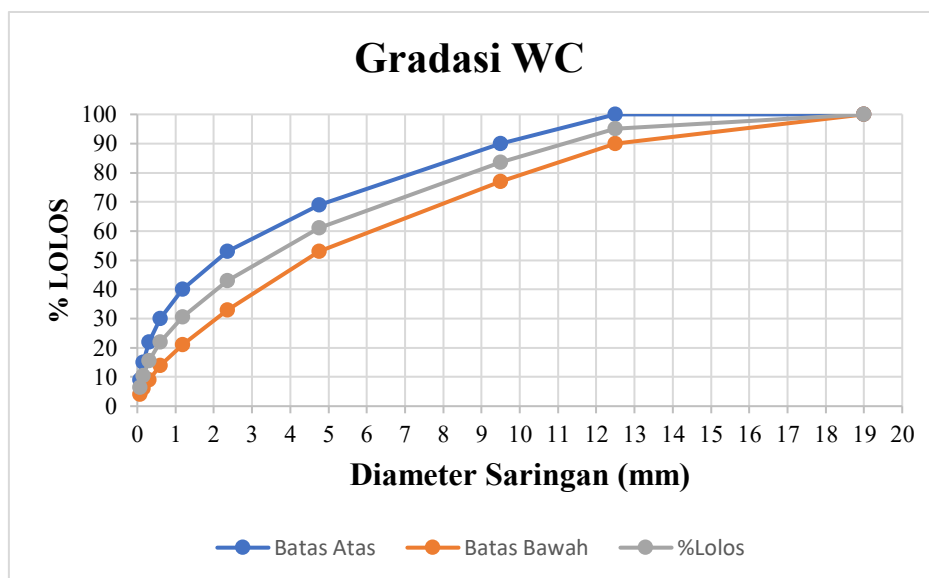
*Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga (2020)*

#### 3.5.4 Perancangan Gradasi Agregat

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) Revisi 2, maka untuk gradasi agregat yang digunakan pada Perkerasan *Wearing Course* (WC) dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.2 Gradasi Agregat Perkerasan *Wearing Course* (WC).

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos Terhadap Total Agregat	% Berat yang Lolos	% Berat yang Tertahan
ASTM	(mm)			
3/4"	19	100	100	0
1/2"	12,5	90-100	95	5
3/8"	9,5	77-90	83,5	11,5
No. 4	4,75	53-69	61	22,5
No. 8	2,36	33-53	43	18
No. 16	1,18	21-40	30,5	12,5
No. 30	0,6	14-30	22	8,5
No. 50	0,3	9-22	15,5	6,5
No. 100	0,15	6-15	10,5	5
No. 200	0,075	4-9	6,5	4
Pan		-	-	6,5
Total				100



Gambar 3.8. Grafik Gradasi Campuran AC-WC.

### 3.5.5 Jumlah Benda Uji

Dalam penelitian ini, terdapat 5 variasi kadar plastik untuk menguji stabilitas plastik LDPE. Tiap masing-masing variasi kadar plastik tersebut dibuat sebanyak 3 sampel. Lalu 5 variasi kadar plastik untuk menguji kuat tekan plastik LDPE. Tiap masing-masing variasi kadar plastik tersebut dibuat sebanyak 1 sampel. Sehingga, jumlah benda uji yang dibutuhkan dalam penelitian ini sebanyak  $5 \times 3 = 15$  sampel untuk pengujian *Marshall* dan  $5 \times 1 = 5$  sampel untuk pengujian kuat tekan, seperti terlihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.3 Jumlah Benda Uji.

Variasi Kadar Plastik dan Jenis Pengujian	Jumlah Benda Uji
<i>Marshall</i> 5 %	3
<i>Marshall</i> 7,5 %	3
<i>Marshall</i> 10 %	3
<i>Marshall</i> 12,5 %	3
<i>Marshall</i> 15 %	3
Kuat Tekan 5 %	1
Kuat Tekan 7,5 %	1
Kuat Tekan 10 %	1
Kuat Tekan 12,5 %	1
Kuat Tekan 15 %	1
<b>Total</b>	20

### 3.5.6 Pembuatan Benda Uji *Marshall*

Langkah-langkah pembuatan benda uji adalah sebagai berikut :

- a. Timbang agregat sesuai persentase campuran agregat yang telah dihitung untuk setiap benda uji.

- b. Keringkan dan panaskan agregat di oven hingga suhu  $\pm 150^{\circ}\text{C}$ . Apabila menggunakan bahan pengikat cair pemanasan sampai  $\pm 140^{\circ}\text{C}$  di atas suhu pencampuran.
- c. Tuangkan minyak jelantah ke wajan hingga memanass, lalu tuangkan plastik dan panaskan plastik di wajan hingga mencair dan homogen.
- d. Tuangkan agregat yang sudah dipanaskan sesuai kebutuhan ke dalam plastik yang sudah dicairkan tersebut sambil diaduk sampai agregat terselimuti plastik secara merata dengan suhu  $\pm 145^{\circ}\text{C}$ .
- e. Bersihkan perlengkapan cetakan benda uji serta bagian muka penumbuk. Cetakan yang digunakan berbentuk silinder dengan tinggi standar 6,35 cm dan berdiameter 10,16 cm.
- f. Letakkan cetakan di atas landasan pematat, tahan dengan pemegang cetakan. Lalu, letakkan selebar kertas saring atau kertas penghisap yang sudah digunting menurut ukuran cetakan ke dalam dasar cetakan.
- g. Masukkan campuran tersebut ke dalam cetakan dan tusuk-tusuk campuran keras-keras dengan spatula yang dipanaskan sebanyak 15 kali di sekeliling pinggirannya dan 10 kali di bagian tengahnya.
- h. Lakukan pemadatan dengan alat penumbuk sebanyak 75 kali pada setiap sisi (atas dan bawah) benda uji dengan tinggi jatuh 457,2 mm, serta selama pemadatan harus diperhatikan agar sumbu palu pematat selalu tegak lurus pada alas cetakan.
- i. Sesudah pemadatan, lepaskan keping alas dan keluarkan benda uji dari cetakan serta diberi tanda pada setiap sampel. Lalu, biarkan selama kira-kira 24 jam pada suhu ruang.
- j. Bersihkan benda uji dari kotoran terutama pada bagian bawah dan ukur tinggi benda uji menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm di ketiga sisi benda uji. Lalu, timbang benda uji dengan ketelitian 0,1 gram untuk mendapatkan berat kering
- k. Rendam benda uji dalam bak air selama 30 menit untuk mengetahui kadar penyerapan airnya. Lalu, timbang benda uji dalam air untuk mendapatkan berat jenuh.

1. Keringkan permukaan luar benda uji dengan kain lap, lalu timbang benda uji untuk mendapatkan berat kering permukaan jenuh atau SSD (*Saturated Surface Dry*).

### 3.5.7 Pembuatan Benda Uji Kuat Tekan

Langkah-langkah pembuatan benda uji adalah sebagai berikut :

- a. Timbang agregat sesuai persentase campuran agregat yang telah dihitung untuk setiap benda uji.
- b. Keringkan dan panaskan agregat di oven hingga suhu  $\pm 150^{\circ}\text{C}$ . Apabila menggunakan bahan pengikat cair pemanasan sampai  $\pm 140^{\circ}\text{C}$  di atas suhu pencampuran.
- c. Tuangkan minyak jelantah ke wajan hingga memanass, lalu tuangkan plastik dan panaskan plastik di wajan hingga mencair dan homogen.
- d. Tuangkan agregat yang sudah dipanaskan sesuai kebutuhan ke dalam plastik yang sudah dicairkan tersebut sambil diaduk sampai agregat terselimuti plastik secara merata dengan suhu  $\pm 145^{\circ}\text{C}$ .
- e. Bersihkan perlengkapan cetakan benda uji serta bagian muka penumbuk. Cetakan yang digunakan berbentuk hexagon atau segi enam dengan ukuran tiap sisi 8 cm dan tinggi 6 cm.
- f. Letakkan cetakan di atas landasan pematat, tahan dengan pemegang cetakan. Lalu, letakkan selebar kertas saring atau kertas penghisap yang sudah digunting menurut ukuran cetakan ke dalam dasar cetakan.
- g. Masukkan campuran tersebut ke dalam cetakan dan tusuk-tusuk campuran keras-keras dengan spatula yang dipanaskan sebanyak 15 kali di sekeliling pinggirannya dan 10 kali di bagian tengahnya.
- h. Lakukan pemadatan dengan alat dongkrak hingga padat.
- i. Sesudah pemadatan, lepaskan keping alas dan keluarkan benda uji dari cetakan serta diberi tanda pada setiap sampel. Lalu, biarkan selama kira-kira 24 jam pada suhu ruang.

- j. Bersihkan benda uji dari kotoran dan ukur tinggi benda uji menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm di ketiga sisi benda uji. Lalu, timbang benda uji dengan ketelitian 0,1 gram untuk mendapatkan berat kering

### **3.5.8 Pengujian Benda Uji sesuai Kondisi Pengujian dengan Alat *Marshall***

Langkah-langkah pengujian benda uji adalah sebagai berikut:

- a. Rendamlah benda uji dalam bak perendam (*water bath*) selama 30 menit dengan suhu tetap 60°C.
- b. Keluarkan benda uji dari bak perendam atau ambil benda uji dari luar dan letakkan ke dalam segmen bawah kepala penekan.
- c. Pasang segmen atas di atas benda uji, dan letakkan keseluruhannya dalam mesin penguji.
- d. Pasang arloji pengukur alir (*flow*) pada kedudukannya di atas salah satu batang penuntun dan atur kedudukan jarum penunjuk pada angka nol, sementara selubung tangkai arloji (*sleeve*) dipegang teguh terhadap segmen atas kepala penekan.
- e. Sebelum pembebanan diberikan, kepala penekan beserta benda ujinya dinaikkan sehingga menyentuh alas cincin penguji.
- f. Atur jarum arloji tekan pada kedudukan angka nol.
- g. Berikan pembebanan pada benda uji dengan kecepatan tetap  $\pm 50$  mm per menit sampai pembebanan maksimum tercapai atau pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh jarum arloji tekan dan catat pembebanan maksimum (*stability*) yang dicapai.
- h. Catat nilai alir (*flow*) yang ditunjukkan oleh jarum arloji pengukur alir pada saat pembebanan maksimum tercapai.

### **3.5.9 Pengujian Benda Uji sesuai Kondisi Pengujian dengan Alat *Compression Testing Machine (CTM)***

Dilakukan pengujian ini untuk mengetahui kuat tekan dari sampel segi enam untuk *paving block*.

Langkah-langkah pengujian benda uji adalah sebagai berikut:

- a. Siapkan benda uji berbentuk segi enam dengan ukuran tiap sisi 8 cm dan tinggi 6 cm yang telah didiamkan selama 24 jam setelah proses pemadatan. Pastikan permukaan benda uji bersih dari kotoran atau sisa material agar tidak memengaruhi hasil pengujian.
- b. Letakkan benda uji di tengah pelat tekan bawah pada alat *Compression Testing Machine* (CTM) dalam posisi tegak lurus terhadap arah gaya tekan.
- c. Pasang pelat tekan atas pada posisi sejajar di atas benda uji sehingga gaya tekan dapat terdistribusi secara merata.
- d. Pastikan posisi benda uji dan pelat tekan sejajar, lalu atur jarum pengukur beban (*pressure gauge*) pada posisi nol.
- e. Naikkan pelat tekan secara perlahan hingga menyentuh permukaan benda uji, memastikan tidak ada celah antara pelat tekan dan benda uji.
- f. Berikan beban tekan secara bertahap dan konstan hingga benda uji menunjukkan retak awal atau hancur.
- g. Catat beban maksimum (P) yang terbaca pada alat uji sebelum benda uji rusak, sebagai dasar perhitungan kuat tekan campuran.
- h. Hitung nilai kuat tekan ( $f_c$ ) menggunakan rumus:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

dengan keterangan:

$f_c$  = kuat tekan (Mpa)

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm<sup>2</sup>)

- i. Ulangi pengujian untuk setiap variasi kadar limbah plastik LDPE (tiap kadar plastik %) dengan tiga benda uji pada masing-masing variasi.

### 3.5.10 Analisis Data dan Pembahasan Hasil

Berdasarkan data yang telah didapatkan pada saat penelitian di Laboratorium, akan dilakukan analisa pengolahan serta perhitungan karakteristik *Marshall* campuran perkerasan *Wearing Course* (WC) dengan menggunakan bahan pengikat limbah plastik LDPE (*Low-Density Polyethylene*). Hasil penelitian juga diperoleh nilai karakteristik *Marshall* terhadap campuran perkerasan *Wearing Course* (WC) akibat variasi bahan pengikat limbah plastik LDPE (*Low-Density Polyethylene*). Analisa pada penelitian ini menggunakan parameter nilai, stabilitas, kelelahan (*flow*), *Void in Mix* (VIM), *Marshall Quotient* (MQ) dan kuat tekan.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

#### 1. Kadar Optimum pada Campuran AC-WC

Berdasarkan analisis parameter Marshall berupa stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ), variasi kadar plastik LDPE menunjukkan pengaruh terhadap performa campuran AC-WC. Peningkatan stabilitas dan MQ serta nilai *flow* yang masih moderat menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan deformasi campuran, sehingga kadar plastik LDPE sebesar 7,5% ditetapkan sebagai kadar optimum dalam penelitian ini dengan nilai stabilitas 2934,05 kg, nilai *flow* 2,07 mm dan nilai *Marshall Quotient* (MQ) 1432 kg/mm.

#### 2. Pengaruh terhadap Kuat Tekan *Paving Block*

Pada pengujian kuat tekan *paving block* segi enam, nilai kuat tekan meningkat seiring penambahan kadar plastik hingga mencapai nilai maksimum pada kadar 12,5%. Nilai kuat tekan tertinggi berada pada kisaran 10,90 MPa. Klasifikasi Berdasarkan SNI 03-0691-1996, *paving block* hasil penelitian ini pada kadar 12,5% termasuk dalam Mutu D ( $\geq 10$  MPa).

### B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

- a. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi komposisi minyak jelantah yang lebih kecil untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan kekakuan dan kuat tekan.

- b. Disarankan melakukan pengujian tambahan seperti:
  - Uji ketahanan terhadap air (*water absorption*) pada paving block
  - Uji durabilitas atau ketahanan terhadap suhu tinggi
  - Uji keausan (*abrasion resistance*) agar diperoleh gambaran kinerja jangka panjang material.
  
- c. Untuk campuran AC-WC, perlu dilakukan pengujian lanjutan seperti uji *Indirect Tensile Strength* (ITS), uji untuk menentukan viskositas bahan pengikat tersebut, uji rutting, atau uji kelelahan (*fatigue test*) guna mengetahui performa terhadap deformasi permanen dan retak akibat beban berulang.
  
- d. Pengembangan metode pencampuran dan pemadatan perlu ditingkatkan agar distribusi plastik lebih homogen sehingga potensi peningkatan kuat tekan dapat lebih maksimal.
  
- e. Penelitian selanjutnya dapat membandingkan penggunaan LDPE murni dengan campuran LDPE dan bahan aditif lain untuk meningkatkan performa mekanis agar dapat mencapai mutu *paving* yang lebih tinggi (Mutu C atau B).

## DAFTAR PUSTAKA

- Afriyanto, B., Indriyati, E. W., & Hardini, P. (2019). Pengaruh Limbah Plastik Low Density Polyethylene Terhadap Karakteristik Dasar Aspal. *Jurnal Transportasi*, 19(1), 59–66. <https://doi.org/10.26593/jt.v19i1.3263.59-66>
- Basheet, S. H., & Latief, R. H. (2024). Assessment of the properties of asphalt mixtures modified with LDPE and HDPE polymers. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 21(5), 1–11. [https://doi.org/10.6703/IJASE.202412\\_21\(5\).007](https://doi.org/10.6703/IJASE.202412_21(5).007)
- Batubara, I. (2024). *Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Terhadap Stabilitas Campuran Aspal Lapis Permukaan, Tugas Akhir, Prodi SI-Teknik Sipil (Tidak Dipublikasikan)*.
- Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). *Ministry of Public Works and Housing*.
- Didik, A., & Purwantoro, S. (2023). Karakteristik Marshall AC-WC Dengan Penambahan Limbah Plastik Jenis Low Density Polyethelene (LDPE). *Asrul Saputra 4 JURNAL SLUMP TeS*, 2(2), 1–7.
- Ghani, U., Zamin, B., Tariq Bashir, M., Ahmad, M., Sabri, M. M. S., & Keawsawasvong, S. (2022). Comprehensive Study on the Performance of Waste HDPE and LDPE Modified Asphalt Binders for Construction of Asphalt Pavements Application. *Polymers*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/polym14173673>
- Luo, Y., & Zhang, K. (2023). Review on Performance of Asphalt and Asphalt Mixture with Waste Cooking Oil. *Materials*, 16(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ma16041341>
- Nurfadhilah, W., & Sudisman, R. (2023). The Effect of Low Density Polyethylene Asphalt Additives on the Properties of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC), *Proceedings of the International Conference on Sustainable Engineering, Infrastructure and Development, ICO-SEID 2022, 23-24 November 2022, Jakarta, Indonesia*. <https://doi.org/10.4108/eai.23-11-2022.2338875>
- Purwanto, S., & Hikmah Perkasa, D. (2023). Pemanfaatan Limbah Plastik Menjadi Biji Plastik Yang Bernilai Tambah Ekonomi Di Kelurahan Dadap Tangerang. *Dedikasi : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 171–181. <https://doi.org/10.53276/dedikasi.v2i1.42>
- Rodrigues, C., Capitão, S., Picado-Santos, L., & Almeida, A. (2020). Full recycling of asphalt concrete with waste cooking oil as rejuvenator and LDPE from urban waste as binder modifier. *Sustainability (Switzerland)*,

12(19). <https://doi.org/10.3390/su12198222>

- Sitorus, F. H. (2018). Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Tambah Campuran Aspal pada Perkerasan Jalan AC-WC terhadap Nilai Marshall. *Tugas Akhir, Prodi S1-Teknik Sipil, Universitas Medan Area*, 1–64.
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Jalan Lentur*, Bandung: Penerbit Nova.
- Sukowati, D. G., Rusmin, M., & Desembardi, F. (2024). Pengaruh Pemanfaatan Limbah Plastik LDPE Terhadap Karakteristik Campuran AC-WC Menggunakan Metode Marshall. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi) Volume. 6. No 2. Desember 2024*.
- Suprpto. (2004). *Suprpto. Bahan Dan Struktur Jalan Raya*, Jakarta: Biro Penerbitan KMTS FT UGM.
- Wesli, Syahputra, M. A., Akbar, S. J., & Muthmainnah. (2024). Pemanfaatan Plastik Low Density Polyethylene (LDPE) dan Arang Tempurung Kelapa Sebagai Substitusi Sebagian Aspal Pada Lapisan AC-WC. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 485–496. <https://doi.org/10.29103/tj.v14i2.1149>
- Xu, F., & Zhao, Y. (2022). Using Waste Plastics as Asphalt Modifier : A Review, *Materials 2022 Volume. 15. No 110*. <https://doi.org/10.3390/ma15010110>.