

**ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN FLY ASH
SEBAGAI BAHAN FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN
EMISI CO₂ CAMPURAN BERASPAL**

*Analysis Of The Relationship Between The Content Of Stone Dust
And Fly Ash Content As Filler Materials With Marshall Stability And
CO₂ Emissions Of Asphalt Mixtures*



IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA

D012231028

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024



**“ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN FLY ASH
SEBAGAI BAHAN FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN
EMISI CO₂ CAMPURAN BERASPAL”**

**IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA
D012231028**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PERNYATAAN PENGAJUAN TESIS

**ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN FLY ASH
SEBAGAI BAHAN FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN
EMISI CO₂ CAMPURAN BERASPAL**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA

D012231028

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS

ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN EMISI CO2 CAMPURAN BERASPAL

IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA

D012231028

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

pada tanggal 26 November 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr.Eng.M. Akbar Caronge ST.,M.Eng
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping



Prof.Dr.Ir.H.Muh.Wihardi Tjaronge ST.,M.Eng
NIP. 196805292002121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., AER
NIP. 19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng, PM, IPM
NIP.19730306 199802 1001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertandatangan dibawah ini

Nama : lin Fitrianty Suaib Cangara
Nomor Induk Mahasiswa : D012231028
Program Studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisa Hubungan Kandungan Abu Batu Dan Fly Ash Sebagai Bahan Filler Dengan Stabilitas Marshall Dan Emiksi CO₂ Campuran Beraspal” adalah benar Karya saya dengan Arahan dari Komisi Pembimbing Prof.Dr.Ir.H.Muh.Wihardi Tjaronge, ST.,M.Eng dan Dr.Eng.M.Akbar Caronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *International Journal of Pavement Research and Technology* dengan status *under review* sebagai artikel dengan judul (“*Experimental Study of the Effect of Using Stone Dust and Fly Ash as Filler on Marshall Stability and Ultrasonic Pulse Velocity of Hot Mix Asphalt*”)

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 29 November 2024
Yang menyatakan,



lin Fitrianty Suaib Cangara

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan penuh kerendahan hati penulis panjatkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan susunan Tesis ini yang merupakan salah satu persyaratan akademik guna menyelesaikan studi magistes pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam tulisan ini penulis menyajikan pokok bahasan menyangkut masalah dibidang transportasi, dengan judul : **“ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN FLYASH SEBAGAI BAHAN FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN EMISI CO₂ CAMPURAN BERASPAL”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi Magister pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Kami menyampaikan penghargaan sangat tinggi dan mendalam kepada berbagai pihak yang telah membantu melewati semua proses penyusunan Tesis ini, terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawati. ST, MT, Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM, selaku penguji.
6. Serta seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman-teman Eco Material 2023-1 yang selalu menemani dalam penyelesaian penulisan tesis ini
8. Orang Tua Tercinta Drs Muh. Suaib dan Ir. Satriawati Cangara., M.Sp yang selalu memberi motivasi dan bantuan baik moril maupun materil serta adik tersayang Irma Febrianty Suaib Cangara, S.E.
9. Rahmansyah, S.T. dan Queensha Nur Medina selaku suami tercinta dan anak tersayang penulis.

Gowa, 29 November 2024

Penyusun

Iin Fitrianty Suaib Cangara

ABSTRAK

IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA. **Analisa Hubungan Kandungan Abu Batu Dan Flyash Sebagai Bahan Filler Dengan Stabilitas Marshall Dan Emisi CO₂ Campuran Beraspal** (dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara penggunaan abu batu (stone dust/SD) dan fly ash (FA) sebagai bahan pengisi (filler) pada campuran beraspal panas (HMA) AC-BC dengan stabilitas Marshall, emisi CO₂, dan tingkat kebisingan. Penelitian ini menggunakan filler SD dan FA serta aspal 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, dan 7% . Pengujian meliputi karakteristik Marshall, kecepatan pulsa ultrasonik (UPV), dan analisis dampak lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan FA sebagai filler menghasilkan stabilitas Marshall yang lebih tinggi, mengurangi dampak lingkungan (ADP, GWP, AP, dan EP), dan meningkatkan tingkat kebisingan dibandingkan dengan penggunaan SD. Kadar aspal optimum untuk campuran dengan filler SD dan FA adalah 6%. Pada kadar aspal optimum, campuran dengan filler FA menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi. UPV dapat digunakan untuk memprediksi stabilitas Marshall. Nilai EFR yang lebih rendah pada campuran dengan filler SD menunjukkan efektivitasnya dalam meredam kebisingan. Secara keseluruhan, penggunaan FA sebagai filler pada campuran beraspal panas AC-BC merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan meningkatkan stabilitas, meskipun perlu diperhatikan dampaknya terhadap tingkat kebisingan.

Kata Kunci: Beton Aspal, Abu Batu, Fly ash, Stabilitas Campuran, Dampak lingkungan

ABSTRACT

IIN FITRIANTY SUAIB CANGARA. **Analysis Of The Relationship Between The Content Of Stone Dust And Fly Ash Content As Filler Materials With Marshall Stability And CO₂ Emissions Of Asphalt Mixtures** (guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

This research aims to analyze the relationship between the use of stone dust (SD) and fly ash (FA) as filler materials in hot mix asphalt (HMA) AC-BC with respect to Marshall stability, CO₂ emissions, and noise levels. This study used fillers SD and FA along with aspal 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, and 7%. The tests include Marshall characteristics, ultrasonic pulse velocity (UPV), and environmental impact analysis. The research results indicate that the use of FA as a filler results in higher Marshall stability, reduces environmental impact (ADP, GWP, AP, and EP), and increases noise levels compared to the use of SD. The optimum asphalt content for mixtures with SD and FA fillers is 6%. At the optimum asphalt content, mixtures with FA filler demonstrate higher stability. UPV can be used to predict Marshall stability. A lower EFR value in the mixture with SD filler indicates its effectiveness in dampening noise. Overall, the use of FA as a filler in hot mix asphalt AC-BC is a more environmentally friendly alternative that enhances stability, although attention must be paid to its impact on noise levels.

Keywords: Asphalt Concrete, Stone Dust, Fly Ash, Stability, environmental impact.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
PERNYATAAN PENGAJUAN TESIS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	v
UCAPAN TERIMAKASIH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	16
1.1. Latar Belakang	16
1.1.1 Rumusan Masalah.....	18
1.1.2 Tujuan Penelitian	18
1.1.3 Manfaat Penelitian	18
1.1.4 Batasan Masalah	18
1.2. Teori	19
1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya	19
1.2.2 Perkerasan Lentur	19
1.2.3 Agregat	20
1.2.3.1 Klasifikasi Agregat.....	21
1.2.3.2 Gradasi	21
1.2.4 Bahan Pengisi (Filler).....	23
1.2.5 Spesifikasi Bahan Pengikat.....	23
1.2.6 Karakteristik Campuran Beton Aspal.....	24
1.2.6.1 Stabilitas	24
1.2.6.2 Durabilitas	25
1.2.6.3 Workability.....	25

1.2.7 Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal Yang Telah di Padatkan.....	26
1.2.8 Jenis Beton Aspal	26
1.2.9 Rancangan Campuran Beton Aspal	27
1.2.10 Abu Terbang Batu Bara (Fly Ash).....	29
1.2.11 Marshall.....	30
1.2.12 Ultrasonik Pulse Velocity (UPV)	31
1.2.13 Parameter Dampak Lingkungan.....	32
1.2.14 Desain Konseptual.....	34
1.2.15 Penelitian Terdahulu	35
BAB II METODE PENELITIAN.....	38
2.1 Bagan Alir Penelitian	38
2.2 Lokasi Material	39
2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	40
2.4 Teknik Pengumpulan Data	40
2.5 Persiapan Peralatan dan Pengambilan Sampel.....	40
2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji	41
2.7 Perhitungan Perkiraan Bitumen	41
2.8 Pengujian UPV	42
2.9 Pengujian Marshall	43
2.10 Environment Performance dari Campuran Aspal Panas.....	44
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
3.1 Karakteristik Material.....	46
3.2 Analisa Rancangan Campuran	47
3.3 Kurva Hubungan Stabilitas, Kadar Aspal dan Flow.....	48
3.3.1 Hubungan Stabilitas Maksimal, Kadar Aspal dan VIM.....	52
3.3.2 Hubungan Stabilitas Maksimal, Kadar Aspal, dan VMA.....	53
3.3.3 Hubungan Stabilitas Maksimal, Kadar Aspal dan VFB	54
3.4 Ultrasonic Pulse Velocity	55

3.4.1	<i>Pola Gelombang Ultrasonik</i>	55
3.4.2	Hubungan UPV, Kadar Aspal dan Stabilitas Maksimal	57
3.4.3	Hubungan UPV, Kadar Aspal dan VMA	58
3.4.4	EFR (Effective Flow Resistivity)	59
3.5	Dampak Lingkungan	60
BAB IV KESIMPULAN		62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN.		69

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC.....	22
Tabel 2. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC).....	28
Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA	34
Tabel 4. Metode Pengujian Karakteristik.....	40
Tabel 5. Perhitungan Benda Uji	41
Tabel 6. Karakteristik Agregat Kasar, Agregat Halus dan Filler	46
Tabel 7. Karakteristik Aspal	46
Tabel 8. Gradasi Fly Ash	47
Tabel 9. Rancangan Campuran Aspal Panas Lapisan AC-BC	48
Tabel 10. Meringkas nilai stabilitas dan flow pada masing – masing tahap campuran yang menggunakan Abu Batu sebagai bahan pengisi.....	49
Tabel 11. Meringkas nilai stabilitas dan flow pada masing – masing tahap campuran yang menggunakan Fly Ash sebagai bahan pengisi	50
Tabel 12. Rasio Hubungan Stabilitas dan UPV Campuran Aspal dengan SD dan FA Sebagai Bahan Pengisi.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur	20
Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat.....	22
Gambar 3. Universal Testing Mechine	31
Gambar 4. Alat UPV.....	32
Gambar 5. Kerangka Konseptual.....	35
Gambar 6. Diagram Alir Penelitian.....	39
Gambar 7. Ilustrasi Pengujian UPV	42
Gambar 8. Pengujian UPV.....	44
Gambar 9. Gradasi Agregat	47
Gambar 10. Grafik menggambarkan korelasi antara stabilitas dan flow campuran SD	51
Gambar 11. Grafik menggambarkan korelasi antara stabilitas dan flow campuran FA.....	51
Gambar 12. Hubungan Stabilitas dan VIM Campuran Filler a. SD; b. FA	53
Gambar 13. Hubungan Stabilitas dan VMA Campuran Filler a. SD; b. FA.....	54
Gambar 14. Hubungan Stabilitas dan VFB Campuran Filler a. SD; b. FA	55
Gambar 15. Gelombang UPV Campuran Filler a. SD; b. FA.....	57
Gambar 16. Hubungan Stabilitas dan UPV Campuran Filler a. SD; b. FA	57
Gambar 17. Hubungan UPV dan VMA Campuran Filler a. SD; b. FA	59
Gambar 18. Pengaruh SD dan FA sebagai filler pada EFR.....	60
Gambar 19. Dampak Lingkungan Filler SD	61
Gambar 20. Dampak Lingkungan Filler FA.....	61

DAFTAR NOTASI

Singkatan / Simbol	Arti dan Keterangan
	American Assotiation Of State Highway Transportation
AASHTO	= Officials
AC-WC	= Asphalt Concrete Wearing Course
AC-BC	= Asphalt Concrete Bearing Course
AC-Base	= Asphalt Concrete Base Course
ADP	= Abiotic Depletion Potential
AP	= Acidification Potential
ASTM	= American Soecety for Testing and Materials
Bulk	= berat jenis kering
CA	= Course Agregat
cgs Rayls	= centimetre gram second resististansi aliran energi suara
CO2	= karbon dioksida
d	= jarak
dB	= desibel suara
E	= Dampak Lingkunhan
EP	= Eutrophication Potential
EFR	= Effectivie Flow Resistivity
F	= Filler lolos saringan no 200
FA	= Fly Ash
GWP	= Global Warming Potential
HMA	= Hot Mix Asphalt
K	= konstanta
kN	= kilo Newton
Laston	= Lapis aspal beton
Lataston	= lapis tipis aspal pasir
LVDT	= Linear Variabel Differential Transformer
mm	= mili meter
NDT	= Non Destruktif Test
Ni	= Standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i
Nox	= Nitrogen oksida
SD	= Abu Batu
SMA	= Stone Matrix Asphalt
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SO2	= Sulfur dioksida
SSD	= Berat jenis permukaan jenuh
t	= waktu tempuh

PB	=	Perkiraan Bitumen
UPV	=	Ultrasonic Pulse Velocity
V	=	kecepatan Gelombang
VIM	=	Void In The Mix
VMA	=	Void In Mineral Aggregate
VFB	=	Void Filled With Bitumen
Wi	=	Berat kategori ke-i
Z	=	Impedance

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Untuk meningkatkan perekonomian nasional, inisiatif untuk mendorong mobilitas orang, produk, atau layanan harus menyertakan jalan sebagai komponen utama infrastruktur transportasi mendefinisikan transportasi sebagai proses pemindahan sesuatu, biasanya orang atau barang, dari satu lokasi, yang dikenal sebagai asal, ke lokasi lain, yang dikenal sebagai tujuan, untuk tujuan tertentu, dengan menggunakan instrumen tertentu (G. Chen, Yu, and Nielsen 2019). Untuk mencapai tujuan tersebut, penyediaan material untuk pembangunan jalan tidak dapat dipisahkan dari penyediaan infrastruktur transportasi darat. Saat ini, metode konstruksi perkerasan jalan di Indonesia meliputi konstruksi perkerasan kaku dan konstruksi perkerasan lentur. Lapisan perkerasan lentur biasanya terbuat dari bahan pengisi, agregat halus dan kasar, dan aspal sebagai elemen pengikat. Konservasi energi dan sumber daya alam, pengurangan sampah, dan pelestarian agregat alami hanyalah beberapa keuntungan penggunaan bahan daur ulang dalam konstruksi transportasi (Zvonarić, Barišić, and Dokšanović 2024). Untuk secara efektif mengurangi penggunaan sumber daya baru seperti bahan bangunan, para profesional transportasi dan lingkungan harus terus menerapkan teknologi daur ulang dan penggunaan kembali.

Salah satu jenis lapisan perkerasan lentur yang digunakan dalam pembangunan perkerasan adalah aspal beton. Di Indonesia, penggunaan konstruksi perkerasan kaku dan lentur sudah umum dilakukan. Secara umum, kombinasi bahan pengisi, agregat halus dan kasar, dan aspal sebagai pengikat membentuk perkerasan lentur. Struktur perkerasan lentur ini biasanya terdiri dari lapisan atas, tengah, dan bawah yang terbuat dari beton aspal (Singh and Sahoo 2021). Campuran aspal sering menggunakan abu batu (SD) sebagai bahan pengisi (Di Schino and Corradi 2020). Abu batu berasal dari pecahan batu alami dan sangat kurang produksinya apalagi jenis stone crusher sudah tua selain kurang dan mahal harganya. Mengingat hal ini, abu terbang dan fly ash digunakan dalam penelitian ini sebagai bahan pengisi dalam campuran panas AC-BC.

Departemen Pekerjaan Umum saat ini menggunakan AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course)/Asphalt Concrete Wearing Course sebagai salah satu produk campuran aspal panas dalam skala besar. Salah satu dari tiga jenis campuran lapisan aspal beton adalah AC-BC yang lainnya adalah AC-WC, AC-BC, dan AC-Base. Bina Marga dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan telah menyempurnakan tiga bentuk Laston, yang merupakan spesifikasi untuk campuran aspal. Persyaratan baru tersebut direncanakan dengan menggunakan metode kepadatan absolut. AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course) mengacu pada lapisan aspal beton (laston) yang digunakan sebagai bahan pengikat. Lapisan yang memiliki

gradasi agregat padat ini dan biasanya digunakan untuk jalan dengan beban lalu lintas yang cukup berat, merupakan bagian dari lapisan permukaan yang berada di antara lapisan pondasi atas (Base Course) dan lapisan aus (Wearing Course). Selain itu lapisan AC-BC ini menciptakan struktur yang kuat dan stabil, mampu menahan beban berat, mencegah deformasi, dan mendistribusikan beban lalu lintas secara merata ke lapisan di bawahnya

Menurut (Paul, Suresh, and Pal 2021) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan Fly Ash dan serbuk kaca sebagai filler pada campuran aspal. Penelitian ini mengamati pengaruh penggunaan Fly Ash dan serbuk kaca sebagai filler atau bahan pengisi sebagai pengganti agregat alam terhadap kinerja campuran aspal. Temuan penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kaca, yang memiliki kandungan silika lebih tinggi dan nilai stabilitas menurun saat terkena kelembaban, juga dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal saat menggunakan fly ash sebagai bahan pengisi. Flyash merupakan bahan abu yang memiliki ukuran butiran yang halus berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batu bara yang digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga uap yang dominan di gunakan di Indonesia (Wardani, 2008). Bahan pengisi mineral digunakan dalam campuran beton aspal untuk meningkatkan stabilitas campuran, meningkatkan daya ikat beton aspal, dan mengisi rongga apa pun dalam campuran.

Penggunaan material yang lebih ramah lingkungan, seperti filler yang menggunakan fly ash batu bara sebagai pengganti material konstruksi, merupakan salah satu cara untuk mengurangi emisi CO₂ dari proses pembangunan. Salah satu metode untuk menangani sejumlah besar abu yang tertinggal setelah pembakaran batu bara adalah dengan menggunakan fly ash. Meskipun nilai ekonominya rendah, penggunaan ini setidaknya dapat menurunkan biaya penanganan limbah (Hou et al. 2024). Meskipun tumpukan abu dapat mencemari air tanah, dampak pembuangan dan penimbunan abu batu bara serupa, yakni bersifat lokal dan terwujud sebagai partikulat yang mencemari udara dan curah hujan. Fly ash juga dapat mengurangi penggunaan bahan baku seperti semen sehingga mampu menghemat biaya produksi dan juga mengurangi dampak buruk dari penambangan bahan baku. Selain itu penggunaan fly ash dapat membantu mengurangi emisi gas berbahaya karbon dioksida. Hal ini disebabkan oleh pengurangan semen, yang merupakan salah satu sumber utama emisi karbon di industri konstruksi. Untuk mengurangi dampak tersebut memanfaatkan abu batubara menjadi produk lain, misalnya untuk bahan baku semen, bahan bangunan, bahan pengisi pada campuran perkerasan jalan dan lain-lain. Kami mengantisipasi bahwa penerapan Fly Ash akan meningkatkan ketahanan lapisan beton aspal terhadap cuaca dan beban kendaraan yang lewat. Raja Mistry dkk. dan Min ju Choi dkk. telah menemukan bahwa penggunaan Fly Ash dapat meningkatkan kinerja campuran aspal (Mistry, Karmakar, and Kumar Roy 2019)(Choi et al. 2020).

Karena jalan aspal yang sudah lama dan temuan penelitian sebelumnya, pengujian laboratorium diperlukan untuk menentukan efek penggunaan abu batu dan Fly Ash sebagai bahan pengisi dan bagaimana keduanya mengubah sifat campuran aspal. Desain campuran penelitian ini didasarkan pada tipe kombinasi AC-BC

Laston. Lapisan AC-BC memiliki peran penting untuk konstruksi dan fungsionalitas perkerasan jalan, terutama untuk jalan raya dengan volume lalu lintas tinggi. Lapisan AC-BC menghubungkan lapisan pondasi dengan lapisan aus, mendistribusikan beban lalu lintas secara merata dan melindungi lapisan di bawahnya, sehingga secara langsung mempengaruhi ketahanan dan keawetan perkerasan. Dari uraian tersebut diatas menjadi latar belakang untuk mengadakan penelitian di laboratorium dan menuliskannya dalam bentuk tulisan dengan judul : **“Analisa Hubungan Kandungan Abu Batu Dan Flyash Sebagai Bahan Filler Dengan Stabilitas Marshall Dan Emisi CO₂ Campuran Beraspal”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka, permasalahan yang ingin diselesaikan dirumuskan sebagai berikut: parameter dampak lingkungan

- Membandingkan nilai stabilitas campuran lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan fly ash
- Berapa besar pengaruh dampak lingkungan yang dihasilkan oleh setiap campuran lapisan AC-BC yang menggunakan abu batu dan fly ash sebagai filler

1.1.2 Tujuan Penelitian

- Untuk menentukan perbandingan nilai stabilitas campuran beraspal lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan fly ash
- Memperoleh perbandingan informasi tentang dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap campuran yang menggunakan abu batu dan fly ash

1.1.3 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan mampu memberikan wawasan yang lebih luas tentang penggunaan limbah sebagai Filler pada campuran aspal AC-BC yang ditinjau terhadap nilai stabilitas. Penelitian ini juga diharapkan dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi, khususnya konstruksi jalan raya. Apabila penelitian ini mendapatkan hasil yang positif, semoga dapat digunakan pada konstruksi jalan raya di Indonesia.

1.1.4 Batasan Masalah

Penulisan tesis ini dibatasi pada hal-hal berikut :

- Jenis aspal yang digunakan yaitu aspal minyak dengan penetrasi 60/70
- Lapisan yang diuji lapisan aspal AC-BC
- Filler yang digunakan adalah abu batu dan fly ash
- Fly Ash yang didatangkan dari PLTU Kabupaten Barru Sulawesi Selatan

- Dampak lingkungan diperhitungkan dari setiap campuran yang dipersiapkan dalam penelitian ini.
- Gradasi campuran mengikuti spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6.
- Pengujian material yang dilakukan mengacu pada standar SNI.

1.2. Teori

1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

Jalan merupakan prasarana yang sangat penting dalam sistem transportasi, yang memperlancar hubungan antarlokasi untuk memenuhi kebutuhan ekonomi, sosial, budaya, pertahanan, dan keamanan suatu negara. Kondisi jalan yang optimal sangat penting untuk kelancaran pelaksanaan kegiatan transportasi, sehingga dapat memperlancar mobilisasi orang, barang, atau jasa secara cepat, aman, dan nyaman.

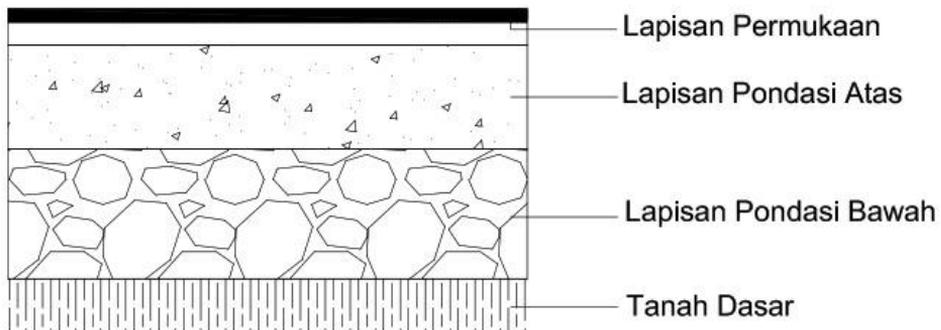
Permukaan jalan yang direkayasa pasti akan mengalami penurunan kualitas seiring berjalannya waktu karena berbagai faktor. Konstruksi perkerasan jalan memiliki masa pakai tertentu, di mana kinerja dan kualitasnya akan menurun secara bertahap. Kerusakan jalan tidak dapat dihindari. (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 19/PRT/M/2011 2011).

Perkembangan konstruksi jalan yang digunakan oleh seluruh dunia diawali oleh temuan Thomas Telford (1757-1834) dan Jhon London Mac Adam (1756- 1836). Konstruksi ini diberi lapisan aus menggunakan aspal sebagai bahan pengikatnya dan seluruh dunia menggunakan teknologi ini sebagai konstruksi jalan. Perkembangan selanjutnya adalah konstruksi perkerasan jalan menggunakan aspal panas (Hot Mix). Jenis perkerasan ini dinamakan perkerasan lentur (Robert 2020)

1.2.2 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur biasanya cocok untuk jalan yang menampung beban lalu lintas ringan hingga sedang, termasuk jalan perkotaan, jalan dengan sistem utilitas di bawahnya, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan yang dibangun secara bertahap. (Krisdiyanto, Dewi, and Wijayanto 2022). Aspal itu sendiri adalah material berwarna hitam atau coklat tua, pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat. Jika aspal dipanaskan sampai suatu temperatur tertentu, aspal dapat menjadi lunak / cair sehingga dapat membungkus partikel agregat pada waktu pembuatan aspal beton. Jika temperatur mulai turun, aspal akan mengeras dan mengikat agregat pada tempatnya (sifat termoplastis). Sifat aspal berubah akibat panas dan umur, aspal akan menjadi kaku dan rapuh sehingga daya adhesinya terhadap partikel agregat akan berkurang. Perubahan ini dapat diatasi / dikurangi jika sifat-sifat aspal dikuasai dan dilakukan langkah-langkah yang baik dalam proses pelaksanaan.

Konstruksi perkerasan lentur melibatkan pemasangan lapisan-lapisan pada tanah dasar yang dipadatkan. Lapisan-lapisan ini menyerap beban lalu lintas dan memindahkannya ke lapisan-lapisan di bawahnya, memastikan bahwa beban tanah dasar lebih rendah daripada beban lapisan permukaan dan tetap berada dalam daya dukungnya. Konstruksi perkerasan lentur meliputi:



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

1.2.3 Agregat

Agregat secara umum didefinisikan sebagai formasi kerak bumi yang keras dan padat, dalam bentuk massa atau fragmen yang besar. Agregat/batuan merupakan komponen utama perkerasan jalan, yang mengandung 90–95% agregat berdasarkan persentase berat atau 75–85% agregat berdasarkan persentase volume. Dengan demikian, daya dukung, keawetan, dan kualitas perkerasan jalan juga ditentukan oleh sifat agregat dan hasil pencampuran agregat dengan material lain.

Agregat didefinisikan oleh American Society for Testing and Materials (ASTM) sebagai material yang terdiri dari mineral padat yang terdapat dalam massa atau fragmen besar. Agregat adalah agregat granular yang terdiri dari mineral seperti pasir, kerikil, batu pecah, atau unsur mineral lainnya, tersedia sebagai barang alami atau buatan, yang berfungsi sebagai material utama untuk pembangunan jalan.

Komposisi agregat merupakan aspek krusial dalam kapasitas perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas dan menahan kondisi cuaca. Karakteristik agregat menentukan kualitasnya sebagai material perkerasan jalan, sehingga diperlukan pemeriksaan atribut fisik material tersebut. Dalam hal ini, penting untuk menilai gradasi, kebersihan, kekerasan, daya tahan agregat, bentuk butiran, tekstur permukaan, porositas, kapasitas penyerapan air, berat jenis, dan daya rekat terhadap aspal.

1.2.3.1 Klasifikasi Agregat

Berdasarkan ukuran partikel-partikel agregat, agregat dapat dibedakan atas:

1. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah material yang tertinggal pada saringan No. 8. Agregat harus terdiri dari batu pecah atau kerikil dalam keadaan kering, bebas dari tanah liat, kotoran, zat organik, atau komponen lain yang tidak diinginkan, dan sesuai dengan gradasi yang ditentukan.

2. Agregat Halus

Agregat halus adalah zat yang pada prinsipnya melewati saringan nomor 8 dan disimpan di saringan nomor 200. Agregat halus dapat terdiri dari pasir, batu pecah, atau kombinasi keduanya. Fungsi utama agregat halus adalah untuk meningkatkan stabilitas dan meminimalkan deformasi permanen campuran dengan memfasilitasi saling mengunci dan gesekan antar partikel.

1.2.3.2 Gradasi

Seluruh spesifikasi perkerasan mensyaratkan bahwa partikel agregat harus berada dalam rentang ukuran tertentu dan untuk masing-masing ukuran partikel harus dalam proporsi tertentu. Distribusi dan variasi ukuran butir agregat ini disebut gradasi agregat. Gradasi agregat dapat ditentukan oleh analisa saringan, dimana contoh agregat harus lolos pada saringan tertentu. Gambar 2 memperlihatkan macam-macam gradasi pada campuran aspal.

Pada table 1 menunjukkan spesifikasi gradasi campuran AC-BC. Gradasi agregat dinyatakan dalam persentase berat masing-masing contoh yang lolos pada saringan tertentu dan di tentukan dengan menimbang agregat yang lolos atau tertahan di masing-masing saringan. Menurut silvia (1990) Gradasi agregat terbagi atas tiga yaitu ; gradasi seragam (uniform graded), gradasi rapat (dense graded) dan gradasi senjang (gap graded).

1. Gradasi Seragam (Uniform Graded)

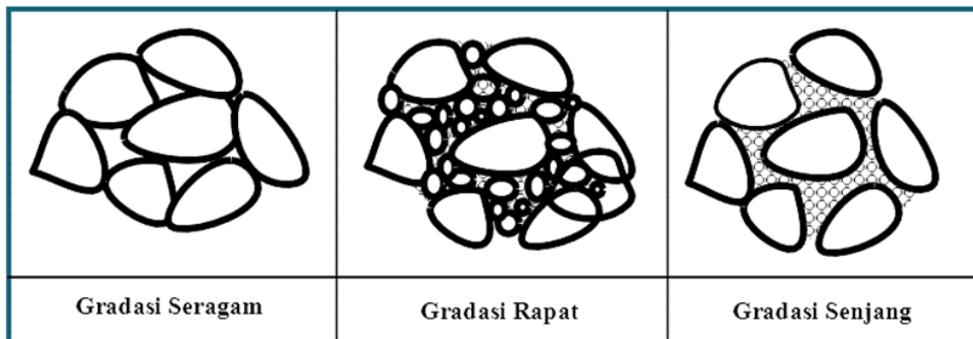
Gradasi seragam (uniform graded) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama, gradasi ini juga dikenal sebagai gradasi terbuka karena kandungan agregat halusnya yang sedikit, sehingga menghasilkan banyak rongga di antara agregat. Campuran komposit dengan gradasi ini menunjukkan permeabilitas tinggi, stabilitas rendah, dan densitas massal yang berkurang.

2. Gradasi Rapat (Dense Graded)

Gradasi rapat (dense graded) merupakan gradasi padat mengacu pada gradasi agregat yang mencakup berbagai ukuran partikel dari kasar hingga halus, sehingga disebut juga gradasi kontinu atau gradasi baik. Kombinasi dengan gradasi ini menunjukkan stabilitas yang baik dan relatif kedap air.

3. Gradasi Senjang (Gap Graded)

Gradasi senjang adalah jenis gradasi agregat di mana beberapa fraksi agregat hilang atau memiliki ukuran yang tidak lengkap. Fraksi-fraksi ini mungkin ada dalam jumlah yang sangat kecil.



Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC

Ayakan		Gradasi
No Saringan	Ukuran Saringan (mm)	AC-BC
1 ½"	3,750	-
1"	25,000	100
¾"	9,500	90 - 100
½"	4,750	75 - 90
⅜"	4,750	66 - 82
No. 4	4,750	46 - 64
No. 8	2,360	30 - 49
No. 16	1,180	18 - 38
No. 30	0,600	12 - 28
No. 50	0,300	7 - 20
No. 100	0,150	5 - 13
No. 200	0,075	4 - 8

1.2.4 Bahan Pengisi (Filler)

Bahan-bahan yang menyusun filler adalah bahan-bahan yang dapat lolos saringan no. 200 (0,075 mm), yaitu meliputi abu terbang, semen portland, dan kapur terhidrasi. Filler memiliki kemampuan untuk menurunkan sensitivitas suhu dan jumlah rongga udara dalam campuran, tetapi penggunaannya harus dibatasi pada tingkat yang bermanfaat. Bila filler dalam campuran terlalu banyak, maka campuran akan menjadi getas dan mudah pecah karena beban lalu lintas. Sebaliknya, pada suhu yang sangat tinggi, campuran akan menjadi lunak bila konsentrasi filler terlalu rendah. Bila menggunakan filler selain semen, kisaran idealnya adalah antara 1% sampai 3%. Ini disebut juga Dust Proportion, yaitu perbandingan antara kadar filler dengan kadar aspal dalam campuran.

Dalam campuran aspal, filler memiliki dua fungsi. Pertama, filler mengubah gradasi pasir, meningkatkan kepadatan campuran dengan menciptakan lebih banyak titik kontak antara butiran partikel. Hal ini mengurangi jumlah aspal yang dibutuhkan untuk mengisi rongga yang tersisa pada campuran. Sifat mortar ini bergantung pada kualitas pasir, dosis campuran aspal, dan binder. Sebaliknya, fungsi kedua secara efektif memengaruhi kinerja filler dengan memastikan komposisi agregat halus, filler, dan aspal yang baik dalam mortar.

Menurut Sukirman (2003), bahan pengisi (filler) juga harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- a. Gradasi agregat AASHTO T27 – 82
- b. Berat jenis curah (Bulk) AASHTO T84 – 88 minimum 2,5
- c. Penyerapan air maksimum 3%.

1.2.5 Spesifikasi Bahan Pengikat

Bitumen, yang sering dikenal sebagai aspal, adalah zat termoplastik yang, jika dipanaskan hingga suhu tertentu, akan meleleh dan membeku lagi (Hot Mix Asphalt Pavement Manual, Buku 1, Petunjuk Umum). Warnanya hitam kecokelatan. Aspal merupakan bagian yang sangat kecil dari konstruksi perkerasan lentur biasanya hanya 4–10% berdasarkan persentase berat atau 10-15% tergantung volume tetapi merupakan bagian yang mahal dari proses tersebut. Saat ini, orang-orang paling sering memanfaatkan aspal dari proses penyulingan minyak bumi, selain aspal alam dari Pulau Buton.

Jenis jalan yang disebut beton aspal terbuat dari aspal dan agregat, baik dengan atau tanpa bahan tambahan. Instalasi pencampuran (AMP) menggabungkan bahan-bahan untuk beton aspal pada suhu tertentu, memindahkannya ke lokasi yang diinginkan, menyebarkannya, dan memadatkannya. Jenis aspal yang akan digunakan menentukan suhu pencampuran. Beton aspal campuran panas dibuat dengan mencampur semen aspal pada suhu antara 145°C dan 155°C. Campuran panas adalah sebutan lain untuk campuran ini.

Berdasarkan gradasinya campuran beraspal panas dapat dibedakan dalam tiga jenis campuran yaitu campuran beraspal bergradasi rapat, senjang dan terbuka.

Tebal minimum penghamparan masing-masing campuran sangat tergantung pada ukuran maksimum agregat yang digunakan. Tebal padat campuran beraspal harus lebih dari dua kali ukuran butir agregat maksimum yang digunakan.

Ada beberapa jenis beton aspal campuran panas, namun dalam penelitian ini jenis beton aspal yang ditinjau adalah AC-BC (Asphalt Concrete-Bearing Course). Salah satu produk campuran aspal panas yang kini banyak digunakan oleh Departemen Pekerjaan Umum adalah AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course)/Lapis Aus Aspal Beton. AC-BC adalah salah satu dari tiga macam campuran lapis aspal beton yaitu AC-WC, AC-BC, dan AC-Base. Ketiga jenis Laston tersebut merupakan konsep spesifikasi campuran beraspal yang telah disempurnakan oleh Bina Marga bersama dengan Pusat Litbang Jalan. Dalam perencanaan spesifikasi baru tersebut menggunakan pendekatan kepadatan mutlak. Lapis aspal beton (laston) sebagai bahan pengikat, dikenal dengan nama AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course). Lapisan ini merupakan bagian dari lapis permukaan diantara lapis pondasi atas (Base Course) dengan lapis aus (Wearing Course) yang bergradasi agregat gabungan rapat / menerus, umumnya digunakan untuk jalan- jalan dengan beban lalu lintas yang cukup berat.

Penggunaan AC-BC yaitu digunakan sebagai lapisan antara dalam perkerasan dan mencegah rembesan air dari atas masuk ke lapis pondasi. Pada campuran aspal panas AC-BC memiliki ukuran maksimum agregat sebesar 25,4 mm, tebal lapisan padat minimum 6,0 cm dengan toleransi tebal tiap lapisan campuran beraspal tidak lebih dari 4,0 mm. Hal tersebut menyebabkan campuran AC-BC peka terhadap variasi dalam proporsi campuran.

1.2.6 Karakteristik Campuran Beton Aspal

1.2.6.1 Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan untuk menahan tekanan lalu lintas tanpa mengalami deformasi jangka panjang, seperti bleeding, buckling, atau rutting. Jumlah lalu lintas dan berat kendaraan di jalan menentukan seberapa stabil situasi tersebut. Dibandingkan dengan jalan raya dengan volume lalu lintas yang sebagian besar terdiri dari mobil penumpang, jalan raya dengan volume lalu lintas tinggi, yang sebagian besar merupakan kendaraan besar, memerlukan stabilitas yang lebih baik.

Stabilitas yang berlebihan mengakibatkan lapisan aspal rendah, kaku, dan mudah retak karena volume antar batu tidak mencukupi. Hal ini menyebabkan terbentuknya lapisan aspal tipis dan memudahkan melonggarnya ikatan aspal, sehingga mengurangi daya tahannya.

Stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan mengusahakan penggunaan:

- Agregat dengan gradasi yang rapat (dense graded)
- Agregat dengan permukaan yang kasar
- Aspal dengan penetrasi rendah
- Aspal dengan jumlah yang mencukupi untuk ikatan antar butir.

Agregat mineral (VMA) memiliki rongga-rongga kecil yang terbentuk oleh agregat yang bergradasi baik. Kondisi ini menghasilkan stabilitas yang tinggi, tetapi memerlukan konsentrasi aspal yang minimal untuk mengikat agregat. VMA kecil menghasilkan aspal yang dapat melapisi agregat dan membentuk lapisan aspal tipis yang mudah dilepas, sehingga lapisan tersebut kurang kedap air, sehingga lebih mudah terjadi oksidasi, dan menyebabkan kerusakan pada lapisan perkerasan.

Penggunaan aspal yang berlebihan mengurangi sifat kedap airnya, mempercepat oksidasi, dan meningkatkan kemungkinan kerusakan pada lapisan perkerasan. Karena VMA kecil dan menciptakan ruang yang sangat kecil dalam campuran, penggunaan aspal yang berlebihan menyebabkan aspal tidak lagi dapat menutupi agregat secara memadai (VIM).

1.2.6.2 Durabilitas

Kemampuan beton aspal untuk menahan dampak cuaca dan iklim, seperti fluktuasi udara, air, atau suhu, serta beban lalu lintas berulang, seperti berat kendaraan dan gesekan antara roda dan permukaan jalan, dikenal sebagai daya tahan.

Faktor- faktor yang mempengaruhi durabilitas lapisan aspal beton adalah :

- lapisan atau film aspal. Meskipun berisiko tinggi mengalami kebocoran, lapisan aspal tebal dapat menghasilkan lapisan beton aspal yang sangat tahan lama.
- VIM kecil untuk mencegah udara dan lapisan kedap air menembus campuran, yang dapat menyebabkan oksidasi dan membuat aspal menjadi getas.
- VMA yang besar diperlukan untuk memungkinkan penebalan lapisan aspal. Pendarahan yang besar dapat terjadi jika kadar aspal tinggi dan VMA serta VIM rendah. Kami menggunakan agregat bergradasi celah untuk mencapai VMA yang tinggi ini. Karena VMA yang kecil dan ruang yang kecil yang diciptakannya dalam campuran, aspal tidak lagi mampu menutupi agregat (VIM) secara memadai.

1.2.6.3 Workability

Kemudahan pengerjaan, atau kemudahan penerapan, mengacu pada seberapa mudahnya mendistribusikan dan memadatkan campuran. Variabel-variabel berikut memengaruhi kesederhanaan (kemudahan pengerjaan):

1. Gradasi agregat.
2. Temperatur campuran.
3. Kandungan bahan pengisi (filler) yang tinggi menyebabkan pelaksanaan lebih sukar.

1.2.7 Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal Yang Telah di Padatkan

Secara analitis, dapat ditentukan sifat volumetrik dari beton aspal padat, baik yang dipadatkan dilaboratorium, maupun dilapangan.

Parameter yang biasa digunakan adalah:

- VIM merupakan Volume ruang pori yang tersisa setelah pemadatan campuran aspal beton. Beban lalu lintas yang berat, pergeseran butiran agregat, atau pelunakan aspal akibat peningkatan suhu mengharuskan penggunaan VIM ini. Volume lelehan besi volatil (VIM) yang terlalu besar dapat mempercepat penuaan aspal dan menurunkan daya tahannya dengan membuat beton aspal padat kurang kedap air. Jika suhu meningkat, VIM yang terlalu kecil akan menyebabkan perkerasan bocor.
- VMA merupakan lapisan aspal yang dihilangkan seluruhnya, volume pori beton aspal padat. VMA tidak memperhitungkan volume pori setiap partikel agregat. Jika agregat bergradasi terbuka atau permukaan aspal lebih tebal, VMA akan meningkat.
- VFB merupakan volume pori beton aspal padat yang terisi oleh aspal, atau volume film/selimut aspal.

1.2.8 Jenis Beton Aspal

Jenis beton aspal yang ada di Indonesia saat ini adalah :

1. Laston (Lapisan Aspal Beton), adalah beton bitumen bergradasi rapat yang sering digunakan untuk jalan yang menerima lalu lintas bervolume tinggi. AC (Asphalt Concrete) adalah nama lain untuk Laston. Atribut paling signifikan dari beton aspal dalam campuran ini adalah stabilitasnya. Menurut tujuan penggunaannya, ketebalan nominal minimal Laston adalah 4-6 cm. Pada Laston, ada tiga kategori campuran yang berbeda::

- Laston sebagai lapis aus, dikenal dengan nama AC-WC. Tebal nominal minimum AC-WC adalah 4 cm.
- Laston sebagai lapis pengikat, dikenal dengan nama AC-BC. Tebal nominal minimum AC-BC adalah 5 cm.
- Laston sebagai lapis pondasi, dikenal dengan nama AC-Base. Tebal minimum AC-Base adalah 6 cm.

2. Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton), adalah beton aspal bergradasi senjang. Lataston juga dikenal sebagai HRS (Hot Rolled Sheet). Dalam formulasi ini, atribut terpenting beton aspal adalah daya tahan dan kemampuan beradaptasi. Ada dua kategori campuran dalam Lataston, yang dikategorikan berdasarkan fungsinya:

- Lataston sebagai lapisan aus, dikenal dengan nama HRS-WC (Hot Rolled Sheet-Wearing Coarse). Tebal nominal minimum HRS-WC adalah 3 cm.

- Lataston sebagai lapisan pondasi, dikenal dengan nama HRS-Base (Hot Rolled Sheet-Base). Tebal nominal minimum HRS-Base adalah 3,5 cm.

3. Latasir (Lapisan Tipis Aspal Pasir), merupakan aspal beton yang sangat cocok untuk jalan dengan lalu lintas rendah, terutama jalan yang tidak memiliki agregat kasar atau sulit diperoleh. Lapisan ini sangat rentan terhadap alur. Oleh karena itu, kami melarang penerapannya di daerah dengan volume lalu lintas tinggi atau tanjakan. Latasir juga dikenal sebagai SS (Sand Sheet) atau HRSS (Hot Rolled Sand Sheet). Sesuai gradasi agregatnya, campuran latasir dapat dibedakan atas:

- Latasir kelas A, dikenal dengan nama HRSS-A atau SS-A. Tebal nominal HRSS-A adalah 1,5 cm
- Latasir kelas B, dikenal dengan nama HRSS-A atau SS-A. Tebal nominal HRSS-A adalah 2 cm. Gradasi agregat HRSS-B lebih kasar.

4. Lapis perata Beton aspal digunakan sebagai lapisan pengatur dan membentuk penampang melintang pada permukaan jalan lama. Setiap campuran beton aspal diberi awalan huruf L untuk membedakannya dari campuran untuk lapisan perkerasan jalan baru. Namun, semua jenis campuran beton aspal dapat digunakan. Oleh karena itu, ada tiga jenis campuran AC-WC (L), AC-BC (L), dan AC-Base (L).

5. SMA (Split Mastic Asphalt) adalah beton aspal yang memiliki lapisan aspal padat dan bergradasi terbuka. Material tambahan, seperti serat selulosa, digunakan untuk menstabilkan kandungan bitumen yang tinggi pada material ini. Lapisan ini terutama digunakan untuk jalan dengan volume lalu lintas tinggi. Ada 3 jenis SMA, yaitu:

- SMA 0/5 dengan tebal perkerasan 1,5 – 3 cm
- SMA 0/8 dengan tebal perkerasan 2 – 4 cm
- SMA 0/11 dengan tebal perkerasan 3 – 5 cm

6. HSMA (High Stiffness Modulus Asphalt) adalah jenis aspal beton yang menggunakan aspal dengan penetrasi rendah, khususnya 30/40. Jalan raya dengan volume lalu lintas tinggi terutama menggunakan lapisan ini.

1.2.9 Rancangan Campuran Beton Aspal

Campuran aspal beton merupakan gabungan aspal dan agregat, dengan atau tanpa bahan tambahan. Sumber utama agregat adalah lokasi terdekat dengan tujuan penggunaan. Alat Marshall saat ini merupakan metode perancangan campuran yang paling efektif di Indonesia, sebagaimana dibuktikan oleh pengujian empiris.

Pengujian empiris menjadi dasar dari metodologi perancangan empat tahap:

1. Mengevaluasi sifat agregat dan bitumen yang akan berfungsi sebagai komponen dasar campuran.

2. Laboratorium membuat formula campuran rancangan menggunakan metode rancangan campuran. DMF (Design Mix Formula) adalah akronim untuk formula campuran rancangan ini. Pastikan hasil rancangan campuran sesuai dengan instalasi pencampuran yang dipilih.
3. Instalasi pencampuran melakukan uji coba produksi, mendistribusikan dan memadatkan hasil campuran uji coba sesuai dengan temuan dua tahap sebelumnya.

Tabel 2. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-Sifat Campuran		Laston		
		AC-WC	AC-BC	AC-Base
Jumlah tumbukan per bidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal	Min.		1	
	Maks.		1.4	
Rongga dalam campuran (%)	Min.		3	
	Maks.		5	
Rongga dalam Agregat (VMA)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.		65	
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800		1800
Pelelehan (mm)	Min.		2	3
	Maks		4	6
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.		90	
Rongga dalam campuran (%)	Min.		2	

Sumber : Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Tahun 2018 (Revisi 2 Divisi 6 hal. 45-46)

1.2.10 Abu Terbang Batu Bara (Fly Ash)

Residu anorganik yang tersisa dari pembakaran batu bara, abu terbang batu bara, terbentuk ketika bahan mineral mengalami modifikasi sebagai akibat dari proses pembakaran. Abu terbang (Fly Ash) dan abu dasar (Bottom ash) adalah dua jenis abu yang dihasilkan ketika batu bara dibakar di pembangkit listrik. Gas buang membawa abu terbang batu bara, sementara abu dasar terkumpul dari dasar tungku dan tertinggal. Terak adalah istilah untuk sebagian abu dasar yang telah meleleh.

Fly ash batubara merupakan limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan terdiri dari partikel yang halus. Gradasi dan kehalusan fly ash batubara dapat memenuhi persyaratan gradasi AASTHO M17 untuk mineral filler. Penggunaan mineral filler dalam campuran aspal beton adalah untuk mengisi rongga dalam campuran, untuk meningkatkan daya ikat aspal beton, dan untuk meningkatkan stabilitas dari campuran. Abu terbang (FA) merupakan sebagian besar dari limbah industri Produk Pembakaran Batubara. Jika dibuang secara tidak benar, bahan-bahan tersebut dapat menyebabkan masalah besar seperti polusi tanah, air, dan paru-paru serta mengganggu siklus alam. Tergantung pada wilayahnya, abu terbang dari pembakaran batu bara digunakan sebanyak 3% hingga 90%. Telah ditemukan bahwa 90% abu terbang digunakan kembali di UE, 60% di Tiongkok dan India, dan 50% di AS. Dengan demikian, jelas bahwa sejumlah besar abu terbang masih dibuang ke tempat pembuangan sampah, kolam abu, dan laguna, sehingga menghabiskan banyak ruang. Namun, penggunaan fly ash yang efektif akan memberikan manfaat bagi lingkungan dan perekonomian.

Dengan demikian, jelas bahwa sejumlah besar abu terbang masih dibuang ke tempat pembuangan sampah, kolam abu, dan laguna, sehingga menghabiskan banyak ruang. Namun, penggunaan fly ash yang efektif akan memberikan manfaat bagi lingkungan dan perekonomian. Pertama, pembangkit listrik akan terhindar dari biaya tambahan untuk pembuangan limbah abu terbang. Lebih jauh lagi, abu terbang dapat berfungsi sebagai pengganti berbagai sumber daya alam. Oleh karena itu, teknologi industri baru perlu dikembangkan untuk memaksimalkan pemanfaatan fly ash. Pembuatan bahan bangunan, stabilisasi tanah, pembangunan jalan], pembuangan lubang bor penambangan, penyerapan CO₂, dan sintesis zeolit hanyalah beberapa kegunaannya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fly ash juga dapat dimanfaatkan seperti semen.

Proporsi Debu, atau rasio filler terhadap kandungan aspal dalam campuran, adalah kisaran optimal untuk filler selain semen, dan biasanya antara 1 dan 3%. Dalam campuran aspal, filler memiliki dua tujuan. Pertama, ia memodifikasi gradasi pasir, meningkatkan kepadatan campuran dengan menciptakan lebih banyak titik kontak antara butiran partikel. Ini mengurangi jumlah aspal yang dibutuhkan untuk mengisi rongga campuran yang tersisa. Sifat-sifat mortar ini dipengaruhi oleh karakteristik awal pasir, jumlah dosis dalam campuran aspal, dan viskositas pasta atau binder yang digunakan. Namun, peran kedua memainkan peran penting dalam memengaruhi kinerja filler dengan mempertimbangkan proporsi agregat halus, filler, dan aspal yang menguntungkan dalam mortar. Penelitian yang berjudul

"Penambahan Bahan Pengisi Fly Ash pada Campuran Aspal Beton Lapisan Aus" tersebut menggunakan bahan pengisi pada campuran dengan persentase 1%, 1,5%, dan 2%, sebagaimana ditetapkan oleh Bina Marga. PLTU Suralaya di Merak-Banten menghasilkan fly ash ini dengan membakar batu bara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua atribut nilai Marshall KAO telah memenuhi persyaratan Bina Marga. Penelitian tersebut menyarankan untuk menambahkan fly ash pada campuran aspal beton sebagai bahan pengisi lapisan aus. (Al Qurny, Hagni Puspito, and Tinumbia 2022).

Pemanfaatan Limbah Abu Batubara sebagai Filler pada Campuran Laston merupakan penelitian yang mengamati 15 benda uji dengan kadar aspal berkisar antara 5 sampai 7%. Benda uji direndam dalam air bersuhu 60 C selama 30 sampai 40 menit. Tujuan dari proses perendaman ini adalah untuk memperoleh kadar aspal yang ideal. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan filler abu batubara tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan campuran. Bahkan kadar aspal ideal yang diperoleh dengan filler abu batubara hanya 6,55% lebih tinggi dibandingkan kadar aspal yang dihasilkan dengan filler yang lebih banyak digunakan. (Sugeha, Eti, and Rudi 2018).

1.2.11 Marshall

Untuk menentukan apakah beton aspal memenuhi kriteria mutu, diperlukan uji Marshall. Uji Marshall (juga dikenal sebagai uji stabilitas Marshall atau uji stabilitas statis) akan menentukan, dalam hal persentase kandungan aspal, seberapa banyak gradasi batuan yang diperlukan untuk menghasilkan kekuatan tekan terbaik. Informasi ini dinyatakan dalam kilogram (kg) silinder beton aspal (objek uji), yang telah direndam selama satu jam pada suhu 60 °C.

Salah satu metode untuk membuat desain yang berhasil adalah uji Marshall. Metode uji Marshall adalah teknik laboratorium yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal panas. Dengan menggunakan alat uji Marshall, prosedur ini mengukur pelelehan dan stabilitas campuran (Azizah, Andry, and Pradana 2024). Metode ini diciptakan pada tahun 1940-an oleh Bruce Marshall dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi dan distandarisasi dalam ASTM D 1559-89. Stabilitas dan flow diuji pada beberapa benda uji dengan kadar aspal yang bervariasi. Tulisan ini mengutip SNI 06-2489-1991 yang membahas tentang teknik pengujian campuran aspal dengan menggunakan alat Marshall. Sebelum dilakukan pengujian Marshall, benda uji terlebih dahulu direndam dalam penangas air yang dipanaskan hingga mencapai suhu 60 °C selama kurang lebih 30 menit (Bina Marga 2003).

Uji Marshall mengukur flow (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, yang menunjukkan seberapa baik benda tersebut dapat menahan beban (Shah et al. 2020). Stabilitas kering dan stabilitas basah adalah dua jenis stabilitas yang berbeda, yang merupakan kapasitas benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas basah mengukur ketahanan benda uji terhadap beban dalam lingkungan jenuh air, sedangkan stabilitas kering mengukur ketahanan

benda terhadap tegangan dalam lingkungan kering. Parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB, selain stabilitas dan flow. Instrumen pengujian yang dikenal sebagai Mesin Uji Universal digambarkan dalam Gambar 3. Alat ini mampu mengukur flow dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara presisi.



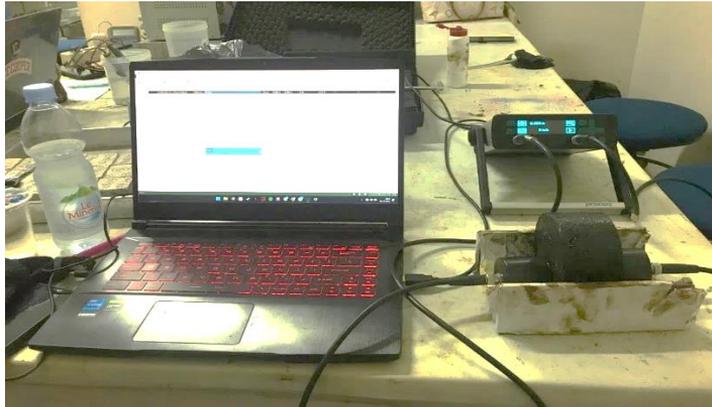
Gambar 3. Universal Testing Machine

1.2.12 Ultrasonik Pulse Velocity (UPV)

Penerapan Pengujian Non-Destruktif (NDT) merupakan hal yang baru dan menarik. Pengujian ini dapat menilai kondisi struktural dengan cara yang tidak merusak. NDT didefinisikan sebagai teknik yang digunakan untuk mengevaluasi proyek, material, atau sistem tanpa mengorbankan fungsionalitas subjek pengujian. Ini merupakan keuntungan utama dari pendekatan NDT. penggunaan metode ini untuk menilai perubahan dalam struktur, kerataan, deformasi, dan faktor-faktor lainnya.

Pengujian gelombang ultrasonik merupakan salah satu instrumen yang memudahkan penerapan prosedur NDT. Ultrasonic Pulse Velocity, disingkat UPV, merupakan metode pengujian non-destruktif (NDT) yang digunakan untuk menilai parameter campuran aspal dengan mengukur kecepatan gelombang ultrasonik. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), metode pengujian non-destruktif (NDT), menggunakan pulsa ultrasonik untuk menilai durasi perambatan gelombang. Kami menggunakan perangkat UPV dengan pengatur waktu untuk mencatat waktu tempuh gelombang untuk pengukuran ini. Dari pengujian kemudian memperoleh kecepatan gelombang dari hasil eksperimen. Sesuai standar ASTM C597-02 (2003) ((Arabani,

Kheiry, and Ferdosi 2009), teknik UPV ini sesuai. Penerapan UPV sebagian besar dilakukan untuk mempelajari lebih lanjut tentang struktur material tanpa membahayakan area yang sedang diteliti. Gambar 4 menunjukkan setup pengujian UPV dalam penelitian ini.



Gambar 4. Alat UPV

1.2.13 Parameter Dampak Lingkungan

Salah satu sumber utama emisi CO₂ di sektor transportasi jalan raya adalah konsumsi bahan baku dan bahan bakar dalam kegiatan pemeliharaan dalam menjaga perkerasan jalan yang rusak. Disisi lain instansi jalan raya seringkali dihadapkan pada anggaran yang tidak memadai untuk pemeliharaan perkerasan jalan, sehingga mengharuskan penerapan hemat biaya ke dalam jadwal pemeliharaan jangka panjang

Metrik standar untuk menilai dampak lingkungan mencakup Potensi Pemanasan Global (GWP), Potensi Depleksi Abiotik (ADP), Potensi Pengasaman (AP), dan Potensi Eutrofikasi (EP). Potensi Pemanasan Global (GWP) berkaitan dengan semua gas rumah kaca, termasuk emisi karbon dioksida dan metana, yang dapat menyebabkan peningkatan suhu global dan berdampak buruk pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim mengacu pada variasi suhu global yang disebabkan oleh efek rumah kaca. "Gas rumah kaca" seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang diperoleh dari matahari. Peningkatan suhu global ini berpotensi menimbulkan gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Kesepakatan ilmiah yang substansial menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki dampak yang signifikan terhadap iklim.

Kategori ADP menggambarkan pengurangan jumlah global bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Kategori dampak ini terkait dengan ekstraksi material abiotik murni, misalnya ekstraksi agregat, bijih logam, mineral, tanah, dll. Ekstraksi zat-zat tersebut dapat berarti bahwa kapasitas alami bumi terlampaui dan

membuatnya tidak tersedia untuk digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan unsur yang dipertimbangkan.

Dampak AP diakibatkan oleh pengendapan polutan asam, termasuk sulfur dan nitrogen, ke tanah, air, organisme, ekosistem, dan material. Gas asam, termasuk sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), yang dipancarkan selama pembakaran bahan bakar, berinteraksi dengan air di tanah atau atmosfer, sehingga mengakibatkan terbentuknya "hujan asam." Asam adalah zat yang menghasilkan ion hidrogen (H⁺, yang biasa disebut 'proton') saat berinteraksi dengan air. Ion hidrogen memiliki reaktivitas yang tinggi, yang menyebabkan perubahan komposisi dan sifat fisik zat lain. Akibatnya, pengendapan asam dapat merusak ekosistem dan merusak material.

Kategori EP ini mencakup semua dampak dari tingkat lingkungan yang tinggi dari makronutrien (fosfor dan nitrogen) yang memicu produksi biomassa tinggi di ekosistem akuatik dan darat. Contohnya, polutan udara, air limbah, dll. Nitrat dan fosfat penting untuk kehidupan, tetapi peningkatan konsentrasi mereka dalam air memicu eutrofikasi (over-nutrifikasi) yang dapat mendorong pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi oksigen dalam air, dan merusak ekosistem. Sumbernya termasuk pupuk dan emisi nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bahan bakar fosil. (Walach et al. 2019) untuk menestimasi nilai dari parameter dampak lingkungan, digunakan persamaan 1 :

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \times w_i \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

E = dampak lingkungan

N_i = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

w_i = berat kategori ke-i (kg/m³)

Pembangunan jalan, khususnya yang menggunakan metode campuran aspal panas, dianggap memiliki dampak lingkungan yang paling signifikan. Energi yang diperlukan untuk memproses campuran aspal panas meningkat karena persyaratan agar material dipertahankan pada suhu tinggi (melebihi 100°C). Energi ini terutama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Seperti diuraikan oleh (Fadholah, Setyawan, and Suryoto 2017) Lima langkah pemanfaatan material perkerasan jalan meliputi ekstraksi, produksi, konstruksi, pemeliharaan, dan daur ulang. Studi ini berfokus pada analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂) yang secara khusus terkait dengan kegiatan konstruksi perkerasan jalan, termasuk tahap produksi campuran, pengangkutan campuran, dan proses penyebaran dan pemadatan (Fadholah, Setyawan, and Suryoto 2017).

Penilaian parameter lingkungan ADP, GWP, AP, dan EP dilakukan melalui pemeriksaan literatur ilmiah yang kredibel. Tabel 3 menyajikan nilai ADP, GWP, AP, dan EP untuk agregat kasar, agregat halus, abu batu, FA, dan material aspal yang digunakan dalam penelitian ini, sebagaimana diperoleh dari literatur.

Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA

Sources	Material	ADP	GWP	AP	EP
		(kgSbeq)	(kgCO ₂ eq)	(kgSO ₂ eq)	(kgPO ₄ eq)
(C. Chen et al. 2010)	Fly Ash	3.37.E-04	8.77.E-03	5.53.E-05	8.23.E-06
(Challenge 2019)	Asphalt	6.38.E-01	6.38.E-01	6.38.E-01	6.38.E-01
(Silva et al. 2023)	Stone dust	4.88.E-03	4.88.E-03	4.88.E-03	4.88.E-03
(Majhi, Padhy, and Nayak 2021) (Kurda, Silvestre, and de Brito 2018)	Coarse Agregat	1.09.E-09	2.44.E-02	1.44.E-04	3.18.E-05

1.2.14 Desain Konseptual

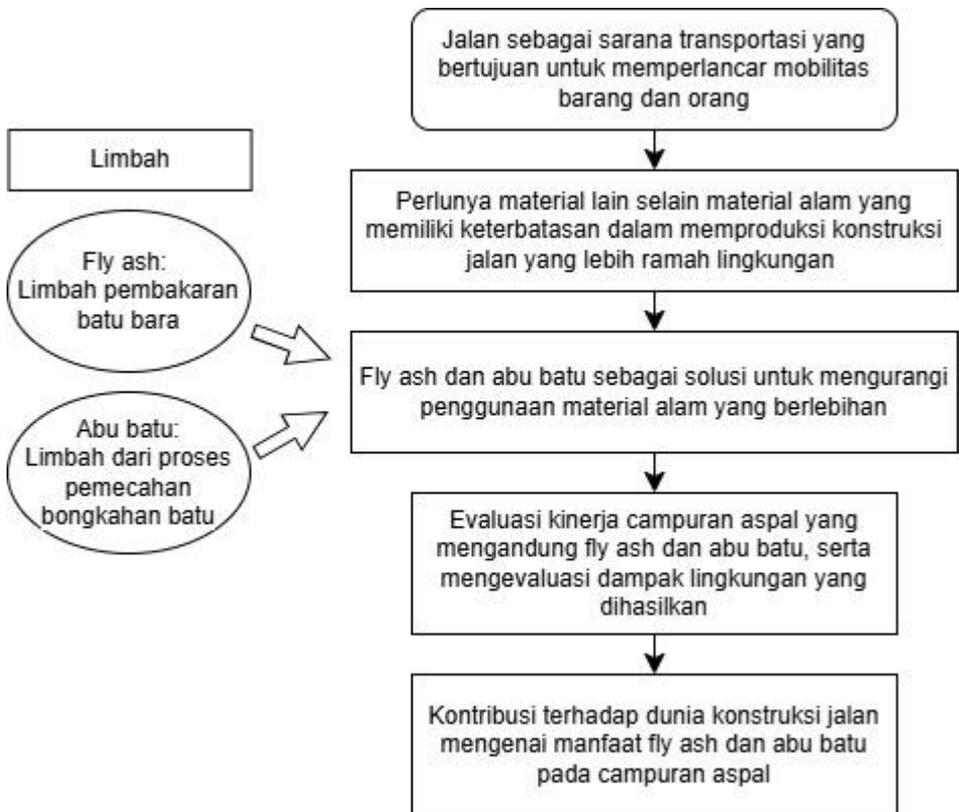
Konsep penelitian ini berfokus untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan infrastruktur jalan di Indonesia dengan memanfaatkan bahan daur ulang dalam campuran perkerasan aspal, khususnya pada lapisan AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course). Studi ini menekankan kesulitan dalam menyediakan bahan konstruksi yang berkelanjutan dan tahan lama, mengingat pentingnya jalan sebagai infrastruktur transportasi untuk mobilitas produk dan individu. Salah satu pendekatan yang diusulkan adalah penggabungan abu terbang sebagai pengisi dalam campuran aspal, yang berupaya untuk meningkatkan stabilitas campuran sekaligus mengurangi masalah lingkungan.

Inovasi dalam teknologi konstruksi jalan, yang dapat menggabungkan produk sampingan industri seperti abu terbang (fly ash) dari pembakaran batu bara, mendorong penelitian ini. Abu terbang dapat berfungsi sebagai alternatif pengisi agregat alami dalam campuran aspal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa fly ash dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal; namun, kita juga harus mengevaluasi dampak lingkungan dari penerapannya. Penelitian ini bertujuan untuk menilai nilai stabilitas komparatif dan konsekuensi lingkungan dari penggunaan fly ash dalam kombinasi AC-BC.

Salah satu masalah utama yang dihadapi dalam penggunaan fly ash dan abu batu adalah potensi dampaknya terhadap stabilitas jalan dan lingkungan. Penelitian ini akan mengukur stabilitas campuran beraspal menggunakan Marshall Stability Test untuk menentukan seberapa besar pengaruh kedua filler ini terhadap kekuatan dan daya tahan jalan. Selain itu, penelitian ini juga akan mengevaluasi dampak lingkungan, termasuk emisi CO₂ yang dihasilkan dari campuran aspal yang berbeda.

Akhirnya, penelitian ini memiliki tujuan jangka panjang untuk memberikan kontribusi pada dunia konstruksi jalan raya di Indonesia dengan menyediakan data empiris mengenai manfaat penggunaan limbah industri sebagai bahan konstruksi.

Jika penelitian ini berhasil membuahkan hasil positif, lebih banyak orang akan dapat menggunakan abu terbang (FA) dan abu batu sebagai bahan pengisi dalam campuran aspal, yang akan membantu mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam, mengurangi emisi karbon dioksida, dan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.



Gambar 5. Kerangka Konseptual

1.2.15 Penelitian Terdahulu

(Paul, Suresh, and Pal 2021) melakukan penelitian tentang penggunaan abu terbang (FA) dan bubuk kaca sebagai bahan tambahan dalam campuran aspal. Penelitian ini menyelidiki dampak penggunaan abu terbang dan bubuk kaca sebagai bahan pengisi atau pengganti agregat alami terhadap kinerja campuran aspal. Menurut rancangan Marshall, abu terbang merupakan 60% dan bubuk Optimum Glass merupakan 30% sebagai pengganti abu batu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang FA sebagai bahan pengisi meningkatkan stabilitas campuran aspal, sedangkan penambahan bubuk kaca mengurangi stabilitas akibat kelembapan, yang disebabkan oleh konsentrasi silika dalam bubuk kaca.

(Mistry, Karmakar, and Kumar Roy 2019) melakukan studi tentang pemanfaatan Fly Ash sebagai material pengisi. Studi ini melibatkan sampel dengan kadar aspal bervariasi mulai dari 3,5% hingga 6,5%, dengan penambahan 0,5%. Kombinasi standar meliputi 2% kapur dan persentase FA bervariasi dari 2% hingga 8%. Kadar aspal optimal kemudian ditetapkan untuk semua campuran dalam desain campuran aspal, yang mengungkapkan bahwa hasil uji coba menunjukkan nilai stabilitas yang lebih unggul untuk campuran yang menggabungkan abu terbang dibandingkan dengan yang menggunakan kapur sebagai pengisi. Studi ini mengkaji kelayakan penggunaan abu terbang sebagai pengisi pengganti kapur dalam campuran beton aspal sambil mematuhi persyaratan konvensional.

(Likitlersuang and Chompoorat 2016) melakukan studi tentang dampak bahan pengisi pada sifat volumetrik dan mekanis beton aspal. Studi ini melibatkan peneliti yang memanfaatkan aspal penetrasi 60/70 untuk membandingkan campuran yang menggabungkan semen dan Fly Ash sebagai bahan pengisi. Studi ini menilai 11 spesimen uji dengan konsentrasi semen dan fly ash yang berbeda, yang menggabungkan komponen aspal sebesar 5%. Hasil studi menunjukkan bahwa bahan pengisi berfungsi untuk meningkatkan kepadatan kombinasi, dengan fly ash menawarkan atribut kepadatan yang lebih unggul dibandingkan dengan semen karena luas permukaan spesifiknya yang lebih besar. Semakin tinggi spesifikitasnya, semakin kuat aspal melekat pada setiap permukaan campuran. Nilai stabilitas semen dan abu terbang meningkat, yang menunjukkan bahwa kombinasi keduanya dapat berfungsi sebagai opsi bahan pengisi yang ideal.

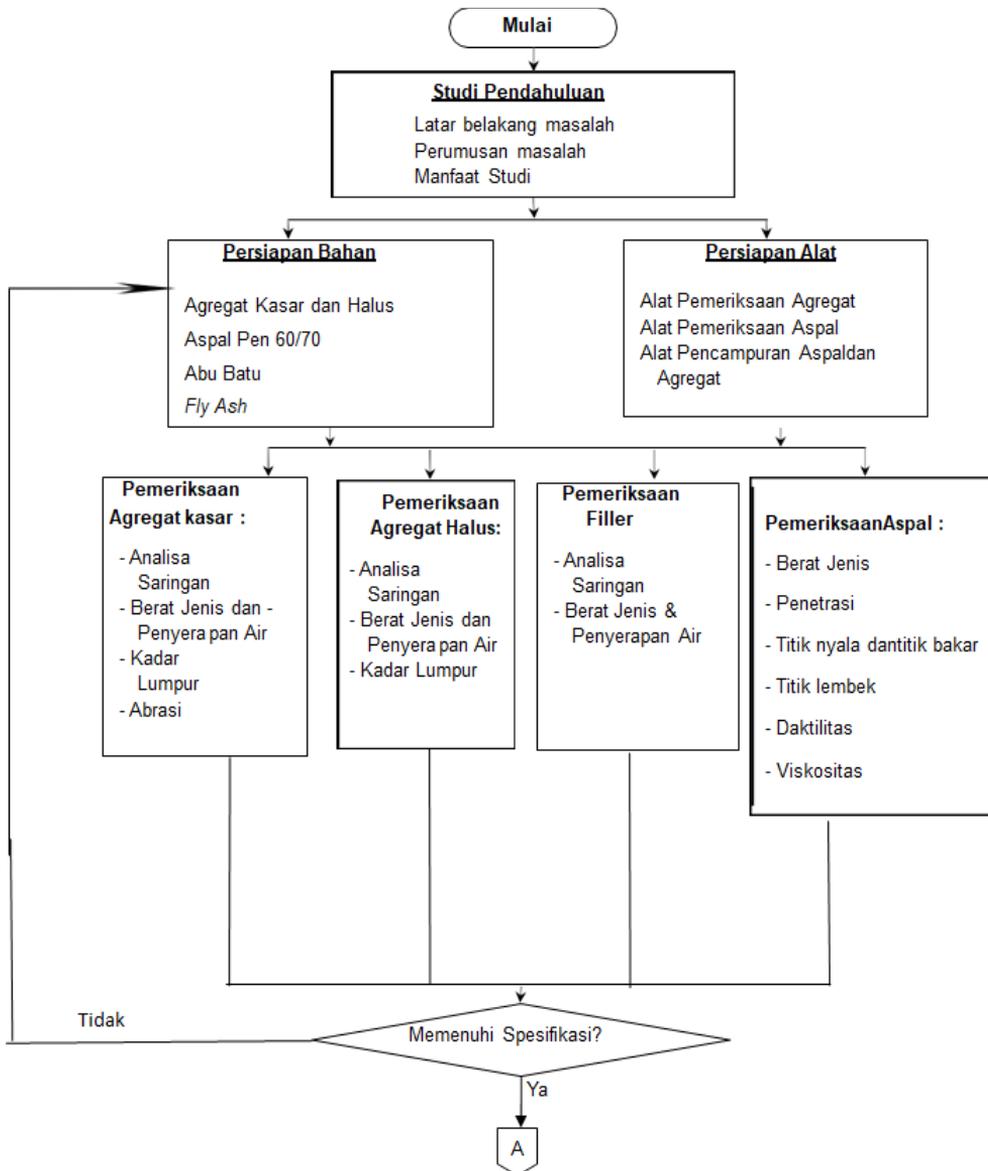
(Peng et al. 2015) Studi ini difokuskan pada dampak karbon dioksida dalam industri konstruksi jalan raya. Studi ini menyoroti masalah kritis perubahan iklim global dan pengurangan emisi karbon, yang telah muncul di sektor konstruksi jalan raya tetapi masih belum terselesaikan. Akibatnya, penelitian ini berupaya menerapkan model konstruksi jalan raya rendah karbon dioksida. Studi ini mengkategorikan konstruksi perkerasan aspal menjadi dua fase: produksi campuran aspal dan konstruksi campuran aspal. Yang pertama mencakup proses produksi aspal, yang meliputi penumpukan agregat, penyediaan agregat, pemanasan aspal, dan pencampuran aspal. Yang terakhir melibatkan tahapan seperti pengerasan campuran, pengangkutan, dan pemadatan aspal. Studi ini meneliti 1 ton campuran sebagai subjek pembandingan. Penelitian pemanasan agregat, pemanasan aspal, dan proses pencampuran masing-masing berkontribusi 67%, 14%, dan 12% terhadap keseluruhan emisi karbon.

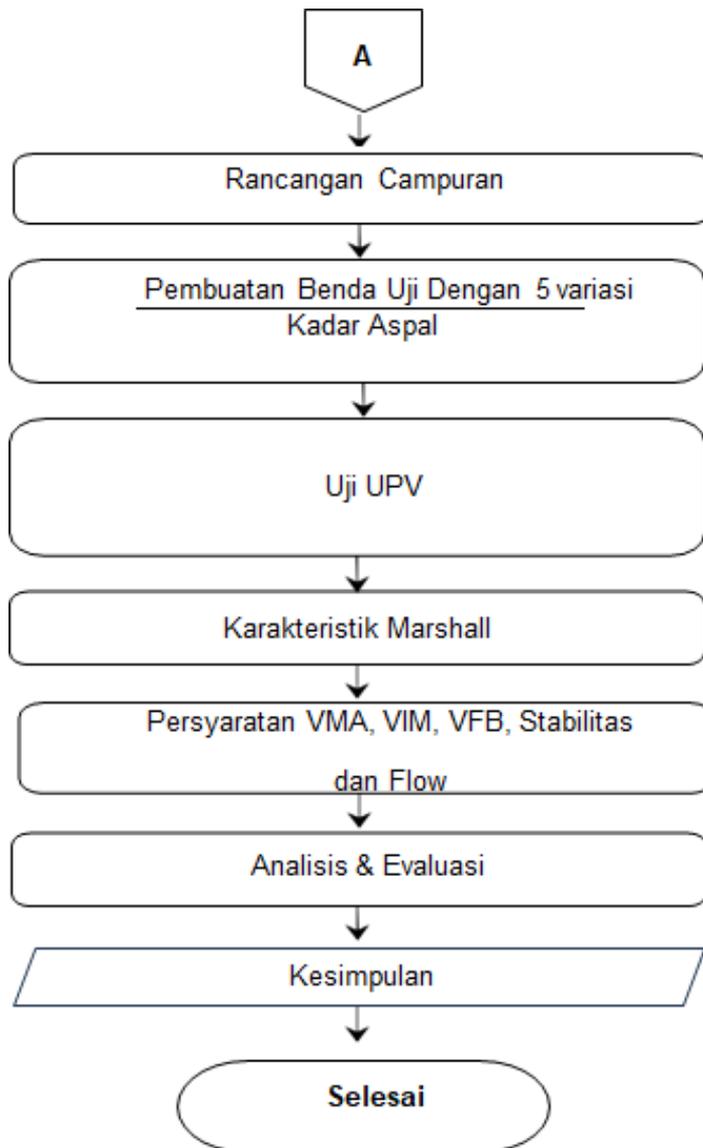
(Thives and Ghisi 2017) Melakukan penelitian mengenai emisi karbon pada konstruksi jalan raya dengan membandingkan emisi karbon pada proses pencampuran antara beton semen Portland dan campuran aspal panas. Pada penelitian ini menjelaskan mengenai bahan bakar yang digunakan selama memanaskan dan mengeringkan agregat merupakan sumber utama penghasil emisi selain itu kadar air agregat juga merupakan hal yang mempengaruhi konsumsi energi. Disisi lain konsumsi energi dan emisi untuk memproduksi campuran beton semen Portland berkaitan dengan proses produksi semen. Hasil dari penelitian ini menjelaskan mengenai perkerasan beton semen Portland mengeluarkan lebih

banyak karbon dibandingkan campuran aspal panas, namun teknologi campuran aspal hangat dapat menghemat 20-70% konsumsi energi jika di bandingkan dengan campuran aspal panas terutama karena penurunan suhu dalam proses campuran hangat.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian





Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

2.2 Lokasi Material

Penelitian ini menggunakan batu pecah ukuran 2-3, 1-2, dan 0,5-1. Bahan baku berupa abu batu diperoleh dari PT. Putra Jaya Moncongloe Kabupaten Maros, sedangkan fly ash diperoleh dari PLTU Kabupaten Barru.

2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Penelitian Eco Material, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, selama dua bulan dimulai pada bulan Februari 2024.

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Untuk memperoleh data sebagai bahan utama dalam penelitian ini maka digunakan dua metode pengumpulan data yaitu:

- a. Tinjauan pustaka menghimpun data sekunder dengan menganalisis sejumlah besar buku, jurnal, dan artikel ilmiah, yang membangun kerangka teoritis untuk kemajuan penelitian ini.
- b. Laboratorium melakukan pemeriksaan sampel untuk memperoleh data primer guna menganalisis temuan penelitian.

2.5 Persiapan Peralatan dan Pengambilan Sampel

Pada pemeriksaan ini penulis menggunakan metode persyaratan yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderall Bina Marga, yaitu Manual Pemeriksaan Bahan Jalan (MPBJ).

Tabel 4. Metode Pengujian Karakteristik

No	Pengujian	Metode Pengujian	
		Agregat Kasar	Agregat Halus
1	Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990	
2	Berat Jenis dan Penyerapan Agregat	SNI 03-1969-2008	SNI 03-1970-2008
3	Lolos saringan 200	SNI ASTM C136:2012	
4	Abrasi	SNI 2417-2008	
5	Indeks Kepipihan	SNI 03-4137-1996	
6	Berat Jenis Aspal	SNI 06-2441-1991	
7	Rancangan Campuran Aspal	Spesifikasi Umum 2018 Revisi 3	
8	Uji Marshall	SNI 06-2489-1991	

2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji

Tabel 5 menampilkan jumlah benda uji yang dibuat untuk kebutuhan penelitian ini.

Tabel 5. Perhitungan Benda Uji

Penentuan Kadar Aspal Optimum (Filler: Abu Batu)	
Variasi Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
7	3
Penentuan Kadar Aspal Optimum (Filler: Fly ash)	
Variasi Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
7	3

2.7 Perhitungan Perkiraan Bitumen

Dalam penelitian ini, metode coba-coba digunakan untuk menentukan komposisi agregat campuran aspal panas AC-BC. Pendekatan ini terlebih dahulu menghitung persentase masing-masing jenis agregat. Selanjutnya, hasil perkalian diperoleh dengan mengalikan persentase dengan fraksi masing-masing agregat yang lolos. Formulasi optimal campuran aspal panas AC-BC diperoleh dengan menjumlahkan produk masing-masing jenis agregat. Berdasarkan persamaan 2, rumus untuk menentukan estimasi awal kadar aspal (P_b) optimal dalam campuran adalah sebagai berikut:

$$P_b = 0.035 (\%CA) + 0.045 (\%FA) + 0.18 (\%F) + \text{Konstanta.} \quad (2)$$

Dimana :

P_b = Perkiraan bitumen (kadar aspal)

CA = Gradasi penggabungan saringan no 1 dikurang saringan no 4

FA = Gradasi penggabungan saringan no 4 dikurang saringan no 200

F = Agregat halus yang lolos saringan No. 200

K = Nilai konstanta 0.5 – 1.0

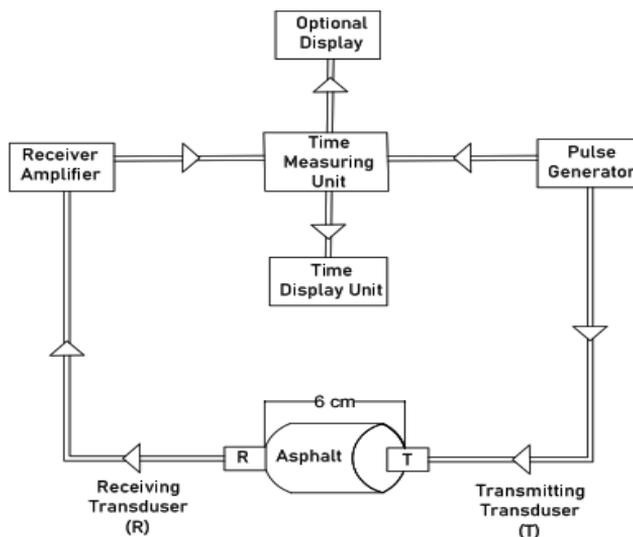
2.8 Pengujian UPV

Kecepatan Pulsa Ultrasonik (UPV), metode Pengujian Tak Merusak (NDT), menggunakan pulsa ultrasonik untuk menilai durasi perambatan gelombang. Perangkat UPV yang dilengkapi dengan pengatur waktu digunakan untuk mencatat waktu tempuh gelombang untuk pengukuran ini. Kecepatan gelombang selanjutnya diperoleh dari hasil eksperimen. Pendekatan UPV dianggap tepat menurut standar ASTM C597-02 (2003) (Arabani, Kheiry, and Ferdosi 2009). Pemanfaatan UPV terutama bertujuan untuk meningkatkan pemahaman struktur material tanpa mengorbankan wilayah yang diperiksa.

Gelombang tersebut memerlukan alat untuk mengukur kecepatan pulsa ultrasonik (Δt) terhadap waktu. Dengan demikian, dengan persamaan 3, kecepatan gelombang dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V = d/t \quad (3)$$

Misalkan V merupakan kecepatan gelombang ultrasonik (m/s), d merupakan jarak antara transduser pemancar dan penerima (m), dan t merupakan waktu tempuh gelombang ultrasonik (s). Gambar 7 mengilustrasikan metodologi kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Ilustrasi Pengujian UPV

Kemampuan suatu material untuk meredam kebisingan, dinyatakan dengan effective flow resistivity (EFR). Penelitian penelitian menggunakan UPV untuk mengukur EFR pada aspal beton (Biligiri and Kaloush, 2009) dan pervious concrete (Singh et al., 2023). Pengukuran nilai EFR dicoba setelah laju pulsa ditetapkan. Persamaan (4) digunakan untuk menghitung impedansi SD dan FA, yang diberikan dalam satuan N.s/m³. Impedansi mekanis per satuan luas material, atau EFR adalah impedansi, yang dihitung sebagai hasil kali densitas dan UPV. Penting untuk menyadari bahwa EFR mengukur impedansi tipikal material dan bukan impedansi

akustik spesifiknya. (Singh et al., 2023) Impedance dinyatakan dalam Newton-detik per meter kubik. Impedance yang dihitung dari hasil perkalian antara densitas dan UPV ini merupakan representasi dari impedance mekanis suatu material per satuan luas, yang juga disebut sebagai EFR (Biligiri and Kaloush, 2009; Biligiri and Way, 2014). Perlu dicatat bahwa EFR adalah ukuran impedance karakteristik material dan bukan impedance akustik spesifik. Oleh karena itu, impedance yang diperoleh untuk berbagai campuran dan dapat juga digunakan sebagai input langsung dalam model kebisingan lalu lintas Administrasi Jalan Raya Federal untuk investigasi yang berkaitan dengan desain pengendalian kebisingan (ANSI/ASA S1.18-2010). EFR juga dapat dikonversi menjadi cgs Rayls dengan mengalikan hasil Persamaan 4 sebesar 0,10.

$$Z = \rho \times v \quad (4)$$

Dimana Z adalah impedance dalam satuan (N.s/m³), ρ adalah nilai kepadatan material dalam satuan (kg/m³), v adalah kecepatan gelombang yang melalui material dalam satuan (m/s). Dalam konteks EFR (Effective Flow Resistivity), CGS Rayl digunakan untuk mengukur resistansi aliran udara melalui material berpori seperti perkerasan jalan. CGS Rayl adalah satuan impedansi akustik dalam sistem sentimeter-gram-detik (CGS), Istilah "Rayl" mengacu pada ketahanan terhadap suara. Impedansi akustik mengukur resistansi suatu medium terhadap gelombang suara.

2.9 Pengujian Marshall

Uji Marshall merupakan metode untuk mencapai desain yang efektif. Metode uji Marshall merupakan prosedur laboratorium untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal panas. Metode ini menggunakan alat uji Marshall untuk menilai stabilitas dan flow campuran (Azizah, Andry, and Pradana 2024). Metode ini diciptakan pada tahun 1940-an oleh Bruce Marshall dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi dan distandarisasi dalam ASTM D 1559-89. Stabilitas dan flow diuji pada beberapa benda uji dengan kadar aspal yang bervariasi. Pengujian ini mengikuti SNI 06-2489-1991, yang menguraikan metodologi pengujian campuran aspal menggunakan alat Marshall. Sebelum melakukan pengujian Marshall, pertama-tama rendam benda uji dalam penangas air pada suhu 60°C selama kurang lebih 30 menit. (Bina Marga 2003).

Uji Marshall mengukur nilai flow (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, yang menunjukkan seberapa baik benda tersebut dapat menahan beban (Shah et al. 2020). Stabilitas kering dan stabilitas basah adalah dua jenis stabilitas yang berbeda, yang merupakan kapasitas benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas basah mengukur ketahanan benda uji terhadap beban dalam lingkungan jenuh air, sedangkan stabilitas kering mengukur ketahanan benda terhadap tegangan dalam lingkungan kering. Parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB, selain stabilitas dan flow. Instrumen pengujian yang dikenal sebagai Mesin Uji Universal digambarkan dalam Gambar 8. Alat ini mampu

mengukur flow dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur perpindahan atau deformasi vertical benda uji selama pengujian yang menghasilkan nilai flow yang menunjukkan besarnya deformasi plastis pada campuran aspal saat diberi beban dan Load cell digunakan sebagai pembacaan nilai stabilitas yang berfungsi memberikan beban yang di terapkan pada benda uji selama pengujian marshall.

Stabilitas mengacu pada kapasitas campuran aspal untuk menahan beban dan menahan deformasi terus-menerus yang disebabkan oleh lalu lintas. Nilai stabilitas menunjukkan kapasitas campuran aspal untuk menahan beban vertikal tanpa mengalami deformasi yang substansial. Stabilitas yang tinggi menandakan bahwa campuran aspal kuat dan tahan terhadap deformasi, sehingga mencegah kerusakan seperti alur dan sobekan. Flow mengukur deformasi plastik campuran aspal selama uji Marshall. Nilai flow menunjukkan sejauh mana campuran aspal mengalami deformasi di bawah beban sebelum mencapai stabilitas maksimum. Nilai flow yang rendah menandakan bahwa campuran aspal kaku dan kurang lentur, sedangkan nilai flow yang tinggi menunjukkan bahwa campuran aspal lebih lentur dan mudah mengalami deformasi.



Gambar 8. Pengujian UPV

2.10 Environment Performance dari Campuran Aspal Panas

Sebuah analisis efek fly ash (FA) pada konsumsi energi yang dibutuhkan untuk membuat campuran aspal sebagai filler serta GWP, ADP,EP dan AP dilakukan. Untuk memprediksi kriteria penerimaan FA sebagai filler, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan dengan komposisi campuran pada HMA.

Selanjutnya faktor-faktor dampak lingkungan dari setiap raw materia dikalikan dengan jumlahnya pembentuk CB untuk mempelajari dampak lingkungan dengan functional 1 m³ (campuran CB). Dalam bagian ini ditentukan GWP_{mix},ADP_{mix},ODP_{mix},POCP_{mix},AP_{mix}, dan EP_{mix}.

Dimana:

GWP_{mix} = GWP diperoleh dari proporsi campuran (F_u 1m³) dengan satuan (kgCO₂)

ADP_{mix} = ADP diperoleh dari proporsi campuran (F_u 1m³) dengan satuan (kgSb)

AP_{mix} = AP diperoleh dari proporsi campuran (F_u 1m³) dengan satuan (kgSO₂)

EP_{mix} = EP diperoleh dari proporsi campuran (F_u 1m³) dengan satuan (kgPO₄)