

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

*Analyze The Relationship Between The Content Stone Dust And
Rice Husk As Fillers With The Marshall Stability And CO2
Emissions Of Asphalt Mixtures*



AZWAR ABBAS

D012231026



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

TESIS

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

*Analyze The Relationship Between The Content Of Stone Dust
And Rice Husk Ash As Filler With The Marshall Stability And CO₂
Emissions Of Asphalt Mixtures*

Disusun dan diajukan oleh

AZWAR ABBAS

D012231026



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

DEPARTMENT TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

GOWA

2024

PENGAJUAN TESIS

**ANALISA HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN ABU
SEKAM SEBAGAI 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

AZWAR ABBAS

D0122310026

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

DEPARTEMENT TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS

ANALISIS HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN ABU SEKAM SEBAGAI FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN EMISI CO2 CAMPURAN BERASPAL

AZWAR ABBAS
D0122310026

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. 19860409 201904 3001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Muh. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 19680529 200212 1002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



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

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



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

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Azwar Abbas
Nomor mahasiswa : D0122310026
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul "Analisis Hubungan Kandungan Abu Batu Dan Abu Sekam Sebagai Filler Dengan Stabilitas Marshall Dan Emisi 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 apa pun 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 Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions of Civil Engineering status under review (revise) sebagai artikel dengan judul "*Influence of Stone Dust and Rice Husk Ash as Filler on Marshall Stability and Ultrasonic Pulse Velocity of Asphalt Mixtures*".

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

Gowa, 29 November 2024

Yang menyatakan,


AZWAR ABBAS

UCAPAN TERIMA KASIH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Kami bersyukur kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas karunia dan rahmat yang telah memungkinkan penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Puji dan syukur layak disampaikan kepada-Nya. Semoga Allah terus melimpahkan berkah dan ketenangan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarganya, para sahabatnya, dan semua pengikutnya.

Tesis ini berjudul “**ANALISIS HUBUNGAN KANDUNGAN ABU BATU DAN ABU SEKAM SEBAGAI FILLER DENGAN STABILITAS MARSHALL DAN EMISI CO2 CAMPURAN BERASPAL**” disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Magister pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada :

1. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. **Prof. Dr. Eng. Ir. M. 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. **Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM**, dan **Dr. Eng. Bambang Bakri., ST., MT** selaku penguji.
6. Serta seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Kepada orang tuaku tercinta, yang telah memberikan kasih sayang, doa, dedikasi, dan seluruh saudara-saudari yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan tanpa henti, baik secara materi maupun moral.
8. **Nursharfina Sy, Afar Abqary dan Auzan Alkhalifi**, selaku istri dan anak saya yang sayangi serta senantiasa mendoakan kami selalu beri kesehatan, kesabaran dan kekuatan dalam penyusunan tesis ini.
9. Teman-teman **Laboratorium Riset Eco Material 2023-1** yang selalu menemani dan membantu dalam penyusunan tesis ini.

Gowa, 29 November 2024

Penyusun

AZWAR ABBAS

ABSTRAK

AZWAR ABBAS. **Analisa Hubungan Kandungan Abu Batu Dan Abu Sekam 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.

Jalan merupakan elemen penting dari sistem infrastruktur transportasi yang memungkinkan transportasi individu, komoditas, dan jasa, sehingga mendorong pembangunan ekonomi. Bahan pengisi ini memegang peranan penting dalam pembuatan campuran aspal panas (HMA) . Debu batu, produk sampingan dari pengolahan batu pecah di daerah yang kaya akan sumber daya batuan, digunakan sebagai bahan pengisi di HMA. Penelitian ini menyelidiki pemanfaatan abu batu (SD) dan abu sekam (RHA) sebagai filler pada HMA . Tujuan utama mengidentifikasi kombinasi SD dan RHA yang efektif untuk mencapai kadar aspal maksimum dan menganalisis dampaknya terhadap stabilitas, rendemen, dan karakteristik volumetrik campuran aspal. Kadar aspal dari lima campuran aspal 5%-7% dievaluasi menggunakan pengujian stabilitas Marshall , kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) dan emisi CO2. Temuan menunjukkan bahwa campuran SD mencapai stabilitas optimal ketika kadar aspalnya 6%. Pemanfaatan RHA sebagai filler menghasilkan nilai stabilitas yang sedikit lebih rendah dibandingkan RHA, namun masih memenuhi kriteria yang dipersyaratkan. Penelitian EFR menunjukkan bahwa RHA lebih unggul daripada SD dalam kemampuannya mengurangi kebisingan. analisis emisi CO2 dampak lingkungan terhadap indikator (ADP, GWP, AP, dan EP), menunjukkan bahwa penggunaan RHA sebagai filler dapat menghasilkan stabilitas Marshall yang memadai dan bahkan mengurangi emisi CO2 dibandingkan dengan penggunaan SD terutama dalam hal potensi pemanasan global dan potensi pengasaman .Temuan penelitian menunjukkan bahwa RHA memiliki kemampuan untuk berfungsi sebagai filler pengganti campuran aspal yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Substitusi ini berpotensi membantu pengurangan limbah dan pelestarian sumber daya alam. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan SD dan RHA dalam campuran aspal tidak hanya mendorong pembangunan berkelanjutan namun juga meningkatkan kualitas kinerja infrastruktur jalan dan mengurangi dampak lingkungan.

Kata Kunci : Penetrasi 60/70, Abu Batu, Abu Sekam, Marshall, Ultrasonic Pulse Velocity, Emisi CO2

ABSTRACT

AZWAR ABBAS. Analysis of the Relationship Between Stone Dust and Rice Husk 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, and Prof. Dr. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng

Roads are an important element of the transportation infrastructure system that enables the transportation of individuals, commodities, and services, thereby driving economic development. This filler material plays an important role in the production of hot mix asphalt (HMA). Stone dust, a byproduct of crushed stone processing in areas rich in rock resources, is used as a filler in HMA. This study investigates the utilization of stone dust (SD) and rice husk ash (RHA) as fillers in HMA. The main objective is to identify effective combinations of SD and RHA to achieve maximum asphalt content and analyze their impact on the stability, yield, and volumetric characteristics of the asphalt mixture. The asphalt content of five asphalt mixtures, ranging from 5% to 7%, was evaluated using Marshall stability tests, ultrasonic pulse velocity (UPV), and CO2 emissions. The findings indicate that the SD mixture achieves optimal stability when the asphalt content is 6%. The use of RHA as a filler results in slightly lower stability values compared to SD, but still meets the required criteria. EFR research shows that RHA is superior to SD in its ability to reduce noise. CO2 emission analysis of environmental impact on indicators (ADP, GWP, AP, and EP) shows that the use of RHA as a filler can produce adequate Marshall stability and even reduce CO2 emissions compared to the use of SD, especially in terms of global warming potential and acidification potential. Research findings indicate that RHA has the ability to function as a filler substitute in sustainable and environmentally friendly asphalt mixtures. This substitution has the potential to help reduce waste and preserve natural resources. These findings suggest that the use of SD and RHA in asphalt mixtures not only promotes sustainable development but also enhances the performance quality of road infrastructure and reduces environmental impact.

Keywords: Penetration 60/70, Stone Dust, Rice Husk Ash, Marshall, Ultrasonic Pulse Velocity, CO2 Emissions

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iiiv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR SIMBOL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Teori	4
1.2.1. Perkerasan.....	4
1.2.2. Perkerasan Lentur	4
1.2.3. Agregat.....	5
1.2.4. Klasifikasi Agregat	5
1.2.5. Gradasi.....	6
1.2.6. Filler	7
1.2.7. Abu Sekam	8
1.2.8. Karakteristik Campuran Beton Aspal	9
1.2.9. Marshall	13
1.2.10. UPV	14
1.2.11. Parameter Dampak Lingkungan	15
1.3. Desain Konseptual	16
1.4. Penelitian Terdahulu	17
BAB II METODE PENELITIAN.....	19
2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	19
2.1.1. Waktu dan Lokasi	19

2.1.2.	Material	19
2.2.	Prosedur Penelitian.....	19
2.2.1.	Bagan Penelitian.....	19
2.2.2.	Teknik Pengumpulan Data.....	20
2.3.	Analisis dan Perhitungan.....	20
2.3.1.	Metode Pengujian Karakteristik.....	20
2.3.2.	Penentuan Jumlah Benda Uji.....	20
2.3.3.	Perhitungan Perkiraan Bitumen.....	20
2.4.	Pengujian UPV.....	23
2.4.	Pengujian Marshall.....	23
2.5.	Parameter Dampak Lingkungan dari Campuran Aspal Panas ...	24
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN.....		26
3.1	Karakteristik Material	26
3.2.	Analisis Campuran Aspal AC-BC	27
3.3.	Hubungan Antara Stabilitas Dan Flow Dengan Kadar Aspal Pada Campuran Beraspal.....	28
3.4.	Analisa Korelasi Antara Stabilitas Puncak, Parameter Volumetrik, dan Kadar Aspal Pada Campuran Beraspal.....	32
3.4.1.	Hubungan Stabilitas Puncak Dan VMA	32
3.4.2.	Hubungan Stabilitas Puncak dan VIM	33
3.4.3.	Hubungan Stabilitas Puncak dan VFB.....	34
3.5.	Kecepatan Pulsa Ultrasonik (UPV)	35
3.5.1.	Pola Gelombang Ultrasonik Terhadap Kadar Aspal.	35
3.5.2.	Hubungan Antara UPV, Stabilitas Puncak, Dan Kadar Aspal Pada Campuran Beraspal	36
3.5.3.	Hubungan UPV Dan VMA Pada Campuran Beraspal.....	38
3.5.4.	Hubungan Antara EFR Terhadap Kadar Aspal.	39
3.6.	Analisa Hubungan Parameter Dampak Lingkungan Pada Campuran Beraspal.....	40
BAB IV KESIMPULAN.....		43
DAFTAR PUSTAKA.....		44
L A M P I R A N.....		51

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC	6
Tabel 2. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Laston (AC).....	12
Tabel 3. Metode Pengujian Karakteristik	21
Tabel 4. Perhitungan Benda Uji AC-BC	21
Tabel 5. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA	25
Tabel 6. Karakteristik Agregat Kasar Dan Halus.	26
Tabel 7. Karakteristik Fisik Aspal	26
Tabel 8. Hasil Gradasi RHA.....	27
Tabel 9. Desain Campuran Aspal AC-BC	27
Tabel 10. Stabilitas Dan Flow Pada Setiap Tahap Campuran Filler SD	29
Tabel 11. Stabilitas Dan Flow Pada Setiap Tahap Campuran Filler RHA	29
Tabel 12. Rasio Stabilitas Puncak Dan UPV Campuran Aspal Filler SD Dan RHA 37	
Tabel 13. Rasio Indikator Dampak Lingkungan Campuran Aspal Filler	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur	5
Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat	7
Gambar 3. Abu Sekam	8
Gambar 4. Universal Testing Mechine	14
Gambar 5. Ultrasonik Pulse Velocity	15
Gambar 6. Desain Kerangka Konseptual	17
Gambar 7. Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 8. Skema UPV	24
Gambar 9. Alat Pengujian Marshall	24
Gambar 10. Gradasi Agregat	28
Gambar 11. Grafik Stabilitas, Flow, Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler SD.	30
Gambar 12. Grafik Stabilitas, Flow, Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler RHA	31
Gambar 13. Grafik Stabilitas Puncak, Kadar Aspal, Dan VMA Dalam Campuran Filler (a) SD, (b) RHA.	33
Gambar 14. Grafik Stabilitas Puncak, Kadar Aspal, Dan VIM Dalam Campuran Filler (a) SD, (b) RHA.	34
Gambar 15. Grafik Stabilitas Puncak, Kadar Aspal, Dan VFB Dalam Campuran Filler (a) SD, (b) RHA.	35
Gambar 16. Gelombang UPV Dalam Campuran Filler (a) SD, (b).RHA.....	36
Gambar 17. Grafik UPV, Stabilitas Puncak Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler (a). SD, (b).RHA	38
Gambar 18. Grafik UPV, VMA Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler (a). SD, (b).RHA.....	39
Gambar 19. Grafik EFR Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler SD dan RHA...	40
Gambar 20. Grafik Indikator Dampak Lingkungan Dan Kadar Aspal Dalam Campuran Filler (a). SD, (b).RHA.....	42

DAFTAR SIMBOL

Singkatan / Simbol	Arti dan Keterangan
SD	= Stone Dust / Abu Batu
RHA	= Rice Husk Ash / Abu Sekam
AASHTO	= American Assotiation Of State Highway Transportation Officials
AC	= Asphalt Concrete
AC-WC	= Asphalt Concrete Wearing Course
AC-BC	= Asphalt Concrete Bearing Cource
AC-Base	= Asphalt Concrete Base Course
ASTM	= American Soecety For Testing And Materials
VIM	= Void In The Mix
VMA	= Void In Mineral Aggregate
VFB	= Void Filled With Bitumen
HMA	= Hot Mix Asphalt
K	= Konstanta
CA	= Course Aggregate
FA	= Fine Aggregate
F	= Filler
kN	= Kilo Newton
F	= Filler Lolos Saringan No 200
Laston	= Lapis Aspal Beton
Lataston	= Lapis Tipis Aspal Pasir
LVDT	= Linear Variabel Differential Transformer
mm	= Mili Meter
SSD	= Berat Jenis Permukaan Jenuh
t	= Waktu Tempuh
PB	= Perkiraan Bitumen
UPV	= Ultrasonic Pulse Velocity
NDT	= Non Destruktif Test
V	= Kecepatan Gelombang
Wi	= Berat Kategori Ke-I
d	= Jarak
Z	= Impedance
EFR	= Effectivie Flow Resistivity
F	= Filler Lolos Saringan No 200
EFR	= Effectivie Flow Resistivity

dB	=	Desibel Suara
Bulk	=	Berat Jenis Kering
cgs Rayls	=	Centimetre Gram Second Resististansi Aliran Energi Suara
CO2	=	Karbon Dioksida
GWP	=	Global Warming Potential
ADP	=	Abiotic Depletion Potential
AP	=	Acidification Potential
EP	=	Eutrophication Potential
Ni	=	Standar Dampak Lingkungan Untuk Kategori Ke-I
Nox	=	Nitrogen Oksida
SMA	=	Stone Matrix Asphalt
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
SO2	=	Sulfur Dioksida

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	52
Lampiran 2	53
Lampiran 3	54
Lampiran 4	55

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jalan adalah bagian penting dari jaringan infrastruktur transportasi darat yang memungkinkan pergerakan orang, barang, dan layanan, sehingga mendorong perkembangan ekonomi. Ini dicapai dengan memfasilitasi perdagangan, investasi, dan kegiatan ekonomi lainnya dengan menghubungkan berbagai wilayah (G. Chen et al., 2019). Perkerasan jalan mencakup pemasangan berbagai jenis konstruksi, seperti fleksibel, kaku, dan hibrida, untuk mengakomodasi tuntutan yang terkait dengan pergerakan perkotaan. Desain perkerasan lentur dan penerapan perkerasan yang efektif di lapangan memerlukan sejumlah besar pengetahuan ilmiah dan teknik mengenai keterkaitan antara beberapa sifat mekanik penting dari campuran yang dipadatkan dalam hal volumetrik, stabilitas dan aliran. Hal ini penting untuk memastikan bahwa standar teknis yang ditetapkan dipenuhi. Untuk menjamin efisiensi pengoperasian transportasi darat, penting untuk mempertimbangkan ketersediaan bahan konstruksi untuk pembangunan jalan.

Penggunaan bahan daur ulang dalam konstruksi transportasi memiliki banyak keuntungan, termasuk efisiensi energi, pemanfaatan sumber daya yang efisien, dan manfaat lingkungan seperti pengurangan limbah dan pelestarian sumber daya alam (Zvonarić et al., 2024). Insinyur dan lingkungan harus terus berkomitmen agar dapat menerapkan teknologi daur ulang dan penggunaan kembali secara efektif. Hal ini diperlukan untuk mengurangi penggunaan sumber daya alam baru sebagai bahan konstruksi (Inyim et al., 2016). Aspal beton merupakan salah satu bentuk konstruksi perkerasan lentur. Di Indonesia, baik konstruksi perkerasan kaku maupun fleksibel umum digunakan. Penggabungan bahan pengisi, agregat halus dan kasar, serta aspal sebagai pengikat membentuk perkerasan fleksibel. Komposisi dari perkerasan lentur ini biasanya terdiri dari lapisan atas, tengah, dan bawah yang dibangun dari beton aspal (A. K. Singh & Sahoo, 2021).

Bahan pengisi sangat penting untuk meningkatkan stabilitas aspal. Tujuan dari bahan pengisi adalah untuk mengurangi permeabilitas air, meningkatkan kekakuan campuran aspal, dan mengisi celah antar agregat (Kandhal et al., 1998). Campuran aspal tradisional sering kali menggunakan abu batu sebagai bahan pengisi (Choudhary et al., 2020). Namun demikian, beberapa daerah mempunyai cadangan batuan yang tidak mencukupi sehingga memerlukan impor debu batuan. Hal ini menyebabkan peningkatan biaya konstruksi, yang pada akhirnya menghambat pengaturan dan pemeliharaan jaringan transportasi. Studi ini menggunakan SD dan RHA sebagai komponen pengisi dalam campuran aspal panas AC-BC.

Dinas Pekerjaan Umum secara luas menggunakan produk aspal campuran panas seperti AC-BC (Lapisan Pengikat Aspal Beton) dan Lapisan Permukaan AC. AC-BC adalah salah satu dari tiga kategori campuran beton aspal: AC-WC, AC-BC,

dan AC-Base. Bina Marga, bekerja sama dengan Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan, menciptakan konsep spesifikasi yang lebih baik yang menghasilkan tiga klasifikasi lapisan aspal. Perencanaan spesifikasi yang direvisi menggunakan metodologi kepadatan absolut. Pengikat beton aspal (Laston), yang disebut sebagai AC-BC (Lapisan Pengikat Beton Aspal), berfungsi sebagai agen pengikat. Lapisan ini merupakan lapisan perantara yang terletak di antara lapisan dasar atas dan lapisan permukaan, yang ditandai dengan gradien agregat yang tebal dan kontinu. Orang-orang biasanya menggunakan ini di jalan-jalan utama yang mengalami kemacetan signifikan.

Residu yang dihasilkan selama prosedur penggilingan padi dikenal sebagai RHA Untuk mengatasi kelangkaan bahan pengisi di lapangan, penelitian ini memasukkan variabel bahan pengisi yang konsisten sebesar 6%, yang berada dalam kisaran yang ditentukan yaitu 4 hingga 9%. Penelitian ini terutama menyelidiki jumlah komponen RHA yang konsisten yang berinteraksi secara fisik dengan berbagai fraksi aspal (Akbulut et al., 2012). Pengisi mineral biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan kohesif campuran beton aspal, mengisi kekosongan dalam campuran, dan meningkatkan stabilitas keseluruhan komposit (Mistry & Kumar Roy, 2021). Sebelum digunakan sebagai bahan baku, beras harus dipisahkan. Residu abu atau RHA dalam jumlah besar dihasilkan selama pembakaran batang padi (Aprianti S, 2017). Silika hadir dalam RHA dalam jumlah yang bervariasi, dengan kisaran 87% hingga 97%, dan sangat reaktif. Sifat reaktif RHA memungkinkannya berfungsi sebagai pozzolan, yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam aspal untuk menghasilkan senyawa yang meningkatkan ikatan partikel (Paul et al., 2021).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan SD sebagai bahan pengisi dapat mempengaruhi stabilitas aspal. Namun temuan penelitian mengenai hal ini masih menunjukkan inkonsistensi. Oleh karena itu, penelitian tambahan diperlukan untuk mengembangkan pemahaman komprehensif mengenai dampak RHA terhadap ketahanan aspal, terutama bila dikombinasikan dengan SD. Penelitian ini berkontribusi pada upaya berkelanjutan untuk mengurangi kerusakan lingkungan akibat emisi karbon. Dengan memanfaatkan kembali produk sampingan dan mengubahnya menjadi bahan mentah, penelitian ini bertujuan untuk mencapai pengganti SD dalam campuran aspal yang ramah lingkungan (Mistry et al., 2019).

Alternatif yang layak adalah menggunakan beton untuk konstruksi jalan daripada aspal. Beberapa keuntungan jalan beton dibandingkan dengan jalan aspal. Ini menggambarkan bahwa jalan beton memiliki ketahanan cuaca yang superior, tahan terhadap pergeseran tanah, dan dapat menahan lalu lintas kendaraan. Harga aspal secara signifikan ditentukan oleh harga minyak dunia, yang berfluktuasi dan dipengaruhi oleh nilai tukar rupiah terhadap dolar AS. Satu kelemahan lain dari jalan aspal adalah pasokan yang tidak memadai. Selama periode lima tahun ini, total pasokan aspal mencapai 400.000 ton, sementara permintaan tahunan untuk aspal mencapai 1,2 juta ton. Kecenderungan untuk mengganti pembangunan jalan aspal yang sudah usang dengan konstruksi jalan beton untuk mengatasi berbagai masalah menawarkan banyak keuntungan.

Keinginan untuk pembangunan berkelanjutan telah menjadi perhatian mendesak bagi semua pemangku kepentingan dan harus dilaksanakan. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami besarnya perbedaan terkait emisi CO₂, penghematan biaya, dan penurunan nilai ekonomi yang disebabkan oleh emisi CO₂, serta biaya efektif yang terkait dengan mitigasi emisi CO₂ melalui penggantian jalan aspal dengan jalan beton. Selain itu, sangat penting untuk menentukan fase mana yang menghasilkan emisi CO₂ tertinggi dari aktivitas konstruksi dan untuk mengevaluasi dampak umur jalan terhadap aspek ini.

Sangat penting untuk melakukan eksperimen laboratorium guna menyelidiki dampak variasi pengisi menggunakan SD dan RHA terhadap karakteristik campuran aspal, seperti yang dibuktikan oleh banyak studi sebelumnya dan masalah yang terkait dengan kerusakan jalan aspal. Desain campuran yang digunakan dalam penyelidikan ini adalah desain untuk jenis campuran aspal AC-BC.

Deskripsi yang disebutkan di atas memberikan konteks untuk melakukan penelitian laboratorium dan mendokumentasikannya dalam format berikut:

1. Berdasarkan deskripsi latar belakang, permasalahan yang ingin diselesaikan dirumuskan sebagai berikut:
 - a. Membandingkan nilai stabilitas menggunakan SD dan RHA pada campuran lapisan AC-BC.
 - b. Berapa besar pengaruh dampak lingkungan yang dihasilkan oleh penggunaan SD dan RHA sebagai filler pada campuran lapisan AC-BC.
2. Tujuan penelitian diuraikan sebagai berikut, berdasarkan deskripsi latar belakang:
 - a. Penelitian ini akan berfokus pada perbandingan nilai stabilitas campuran lapisan aspal AC-BC yang menggunakan SD dan RHA sebagai pengisi.
 - b. Perbandingan data mengenai dampak lingkungan yang menggunakan SD dan RHA sebagai filler pada campuran beraspal.
3. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek berikut:
 - a. Jenis aspal yang digunakan yaitu aspal minyak dengan penetrasi 60/70
 - b. Lapisan yang diuji Lapisan aspal AC-BC.
 - c. Filler yang digunakan adalah SD dan RHA
 - d. Dampak lingkungan diperhitungkan sebagai dampak lingkungan dari setiap campuran yang dipersiapkan dalam penelitian ini.
 - e. Gradasi campuran mengikuti parameter yang diuraikan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2.
 - f. Pengujian material dilakukan sesuai dengan standar SNI.
4. Diharapkan penelitian ini akan membantu kita memahami bagaimana menggunakan bahan limbah, khususnya abu batu dan abu sekam padi, sebagai bahan pengisi dalam campuran aspal AC-BC, dengan fokus pada bagaimana mereka mempengaruhi nilai stabilitas. Kami mengantisipasi bahwa hasil penelitian ini akan bermanfaat bagi sektor konstruksi, khususnya dalam pengembangan teknologi permukaan jalan yang lebih berkelanjutan.

1.2. Teori

1.2.1. Perkerasan

Perkerasan telah terbangun pasti akan terjadi kerusakan seiring dengan berjalannya waktu dan beberapa factor lainnya. Pada dasarnya, konstruksi perkerasan jalan mempunyai umur rencana dan selama kurun waktu umur rencana akan terjadi penurunan kinerja dan kualitas secara bertahap. Sehingga dapat dikatakan bahwa kerusakan jalan adalah sesuatu yang keniscayaan pasti terjadi (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum.Nomor.19/PRT/M/2011).

Kemajuan global dalam pembangunan jalan berasal dari inovasi Thomas Telford (1757-1834) dan John Loudon McAdam. (1756-1836). Struktur ini menggunakan lapisan tahan aus yang memanfaatkan aspal sebagai bahan pengikat, sebuah teknologi yang diadopsi secara universal untuk pembangunan jalan. Fase selanjutnya melibatkan penerapan aspal panas untuk konstruksi permukaan jalan. (Hot Mix). Pavemen ini disebut sebagai perkerasan fleksibel.

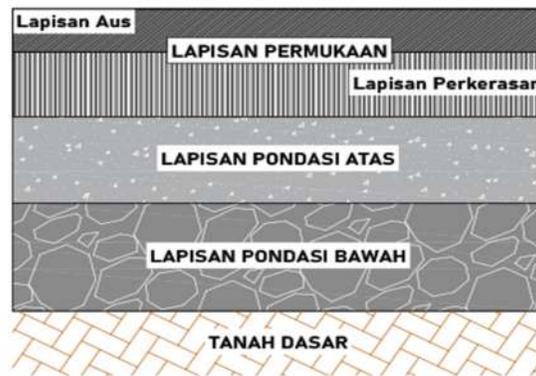
Perkerasan kaku akan menggantikan perkerasan lentur. Perkerasan kaku adalah jenis permukaan jalan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat, menghasilkan kekakuan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan perkerasan lentur. Dampaknya akan menyebar di seluruh area yang cukup luas karena permukaan beton yang kaku dengan modulus elastisitas yang tinggi. Oleh karena itu, fondasi beton berfungsi sebagai sumber utama dari integritas struktural permukaan jalan (Sentosa & Roza, 2012).

1.2.2. Perkerasan Lentur

Secara umum, perkerasan fleksibel cocok untuk jalan yang menampung volume lalu lintas ringan hingga sedang, termasuk jalan perkotaan, jalan dengan sistem utilitas bawah permukaan, perkerasan bahu jalan, dan perkerasan yang sedang dalam tahap konstruksi. Aspal, zat padat hingga semi-padat, tetap padat pada suhu kamar dan menunjukkan warna hitam atau coklat tua. Ketika aspal mencapai suhu tertentu, ia dapat melunak atau menguap, memungkinkan untuk mengenkapsulasi partikel agregat selama konstruksi beton aspal.

Agregat yang tergradasi rapat dan campuran aspal, yang disebut sebagai campuran aspal, berfungsi sebagai lapisan permukaan dari sistem perkerasan lentur ini. Kami menggabungkan kedua bahan tersebut saat masih panas, mendistribusikan campuran, dan memadatkan campuran tersebut. Oleh karena itu, namanya "hot mix." Lapis ini harus memiliki permukaan yang datar namun kasar yang tidak tembus air (Lestari, 2013).

Gambar 1 menggambarkan komponen-komponen perkerasan fleksibel, yang dibangun dengan menempatkan lapisan di atas subgrade yang dipadatkan. Lapisan-lapisan ini bertanggung jawab untuk menerima volume lalu lintas dan mendistribusikannya ke lapisan-lapisan di bawahnya. Dengan cara ini, beban yang ditransmisikan ke subgrade lebih kecil daripada yang ada pada lapisan permukaan dan tetap berada dalam kapasitas dukung subgrade.



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

1.2.3. Agregat

Agregat biasanya dicirikan sebagai formasi yang kaku dan padat dari kerak Bumi, yang terdiri dari massa atau fragmen yang substansial. Agregat, atau batu, adalah elemen utama dari perkerasan jalan, yang menyumbang 90-95% dari berat atau 75-85% dari volume agregat. Karakteristik agregat dan kombinasi mereka dengan bahan lain mempengaruhi kapasitas beban, daya tahan, dan kualitas perkerasan jalan.

Menurut American Society for Testing and Materials (ASTM C 136-06, 2012), Mineral padat, baik dalam jumlah yang substansial maupun dalam bentuk terfragmentasi, mendefinisikan agregat sebagai suatu bahan. Agregat adalah zat granular yang terdiri dari mineral seperti pasir, kerikil, batu pecah, atau bahan mineral lainnya, yang berasal dari sumber alami atau pengolahan, dan berfungsi sebagai komponen utama dalam konstruksi jalan.

Kualitas agregat adalah penentu kritis dari ketahanan permukaan jalan terhadap kondisi cuaca dan kapasitasnya untuk mendukung volume lalu lintas. Analisis kualitas fisik agregat diperlukan, karena penerapannya sebagai bahan perkerasan bergantung pada karakteristiknya. Inspeksi harus berkonsentrasi pada hal-hal berikut: gradasi, kebersihan, kekerasan, ketahanan agregat, bentuk butir, kekasaran permukaan, porositas, kapasitas penyerapan air, berat jenis, dan adhesi terhadap bitumen.

1.2.4. Klasifikasi Agregat

Dimensi partikel mengategorikan agregat menjadi dua jenis.

1. Agregat Kasar

Agregat yang tersisa di ayakan No. 8 disebut sebagai agregat kasar. Agregat yang digunakan terdiri dari batu pecah atau kerikil dalam kondisi kering, bebas dari tanah liat, kotoran, bahan organik, atau komponen tidak diinginkan lainnya, serta mendekati gradasi yang sesuai (SNI 1969:2016).

2. Agregat Halus

Menurut definisi, agregat halus lolos melalui ayakan nomor 8 dan tertahan di ayakan nomor 200. Agregat halus dapat berupa pasir, batu pecah, atau kombinasi keduanya. Peran utama agregat halus adalah untuk meningkatkan stabilitas dan meminimalkan deformasi permanen dari campuran dengan memfasilitasi penguncian dan gesekan antar partikel. Kualitas spesifik yang dibutuhkan dari agregat meliputi sudut permukaan, kekasaran permukaan, kebersihan, dan tidak adanya komponen organik (SNI 1970:2008).

1.2.5. Gradasi

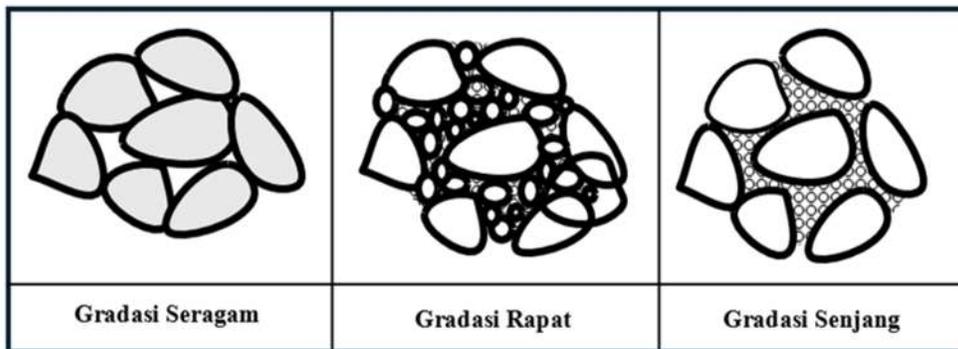
Spesifikasi (SNI 03-1968:1990) permukaan jalan mengharuskan bahwa partikel agregat harus mematuhi rentang ukuran yang ditentukan, dengan jumlah yang telah ditentukan untuk setiap ukuran partikel. Istilah "gradasi agregat" merujuk pada distribusi dan variasi dalam ukuran partikel agregat. Analisis ayakan menentukan grade agregat dengan mewajibkan sampel agregat melewati ayakan yang ditentukan. Gambar 2 menggambarkan gradasi agregat. Gradasi agregat dihitung sebagai persentase berat dari setiap sampel yang melewati ayakan tertentu, yang ditentukan dengan menimbang agregat yang melewati atau tertahan pada setiap ayakan. Tabel 1. Menunjukkan spesifikasi gradasi campuran AB-BC.

Agregat yang diklasifikasikan dari kasar hingga halus sangat penting untuk semua lapisan perkerasan fleksibel. Ukuran maksimum partikel agregat yang lebih besar memerlukan variasi ukuran yang lebih lebar dari besar ke kecil. Ada dua cara untuk menentukan dimensi partikel agregat:

1. Ukuran maksimum didefinisikan sebagai ayakan terkecil yang memungkinkan 100% agregat lolos.
2. Ukuran maksimum nominal didefinisikan sebagai ayakan terbesar yang menahan tidak lebih dari 10% agregat.

Tabel 1. Gradasi AC-BC

Aayakan		Garadasi	Spesifikasi
Nomor Saringan	Ukuran Saringan (mm)	AC-BC	
1 1/2"	3,750	-	(SNI ASTM C136, 2012)
1"	25,000	100	
3/4"	9,500	90 - 100	
1/2	4,750	75 - 90	
3/8	4,750	66 - 82	
4	4,750	46 - 64	
8	2,360	30 - 49	
16	1,180	18 - 38	(% pass min. 75%)
30	0,600	12 - 28	
50	0,300	7 - 20	
100	0,150	5 - 13	
200	0,075	4 - 8	



Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat

1.2.6. Filler

Contoh filler termasuk debu batu, kapur cepat, semen Portland, dan bahan non-plastik lainnya, yang semuanya merupakan bahan halus yang mampu melewati saringan No. 200. 0,075 mm, menurut (Abdullah et al., 2017) . Filler ini memiliki fungsi-fungsi berikut :

1. Ketika digunakan sebagai pengisi di antara partikel agregat yang lebih kasar, hal ini tidak hanya mengurangi ruang udara dan meningkatkan ketahanan gesekan, tetapi juga memberikan efek penguncian yang substansial antara butiran-butiran tersebut.
2. Ketika pengisi ditambahkan ke aspal, ia menciptakan suspensi, membentuk mastic yang, bersamaan dengan aspal, mengikat partikel agregat.

Sebaliknya, komponen filler yang tidak mencukupi menyebabkan campuran menjadi lentur pada suhu tinggi. Jumlah filler yang optimal berkisar antara 0,6 hingga 1,2, yang menunjukkan rasio persentase filler terhadap kadar aspal dalam campuran, yang umumnya dikenal sebagai proporsi debu.

Filler formulasi aspal untuk meningkatkan ketebalannya dan memperbaiki kekuatan keseluruhannya.

1. Komponen pengisi untuk campuran bitumen harus mencakup debu kapur, semen Portland, abu terbang, debu kiln semen, atau bahan non-plastik lainnya dari sumber manapun. Bahan-bahan harus bebas dari zat-zat yang tidak diinginkan.
2. Filler harus dikeringkan dan bebas dari agregat. Sesuai dengan spesifikasi (SNI 06-6723-2002), minimal 75% dari material harus berhasil melewati ayakan No. 200 (75 mikron) dan harus berbeda dari yang melewati ayakan No. 30. 600 mikron.
3. Dua metode mempengaruhi campuran aspal: pertama, pengisi mengubah gradasi pasir, meningkatkan kepadatan dengan memperbaiki titik kontak antara butiran partikel, sehingga mengurangi jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi kekosongan residu dalam campuran. Dengan mengoptimalkan komposisi mortar dari agregat halus, pengisi, dan bitumen,

fungsi sekunder ini berdampak positif pada kinerja pengisi. Sifat-sifat mortir ini bergantung pada proporsi campuran bitumen, elemen pengikat yang digunakan, dan karakteristik inheren dari pasir.

1.2.7. Abu Sekam

Sekam padi adalah sisa kulit dari budidaya padi, lapisan luar yang membungkus butir-butir padi, yang terpisah dan dianggap sebagai limbah atau sampah. Abu sekam padi yang dibakar menunjukkan karakteristik semen yang meningkatkan kekasaran butir partikel (St. Fauziah Badaron, 2019). Secara tradisional, abu sekam padi (RHA) digunakan sebagai agen pembersih untuk peralatan masak dan sebagai sumber api dalam pembuatan bata. Sekam ini dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses industri. Sekam padi terdiri dari 75% bahan yang dapat terbakar dan 25% berat yang berubah menjadi abu sekam padi (RHA), seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 3. Membakar sekam padi dalam tungku menghasilkan sekitar 55 kg (25%) abu sekam padi. (RHA). Sekitar 20% dari berat beras terdiri dari sekam beras, yang berkisar antara 13% hingga 29% dari isinya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Al-Alwan et al., 2022) hasil analisis kimia terhadap RHA adalah silika (SiO_2) sebesar 83,10%, alumina (Al_2O_3) sebesar 2,15%, besi oksida (Fe_2O_3) sebesar 1,10%, kalsium oksida (CaO) sebesar 4,70%, magnesium oksida (MgO) sebesar 1,50%, hilang pada pembakaran (LOI) sebesar 1,13%, sulfur trioksida (SO_3) sebesar 1,20%, kalium oksida (K_2O) sebesar 2,96%, natrium oksida (Na_2O) sebesar 0,10%, dan fosfat (P_2O_5) sebesar 2,05%. Penggunaan bahan pengisi secara efektif dapat memitigasi rongga udara dalam campuran dan mengurangi sensitivitas suhu campuran terhadap perubahan suhu.

Mengingat meningkatnya biaya bahan baku dan menurunnya ketersediaan sumber daya alam, banyak peneliti saat ini sedang menilai kelayakan pemanfaatan limbah pertanian, seperti RHA, sebagai bahan baku untuk HMA melalui daur ulang. Secara umum, campuran beton aspal menggunakan elemen pengisi mineral untuk meningkatkan kekuatan kohesifnya, mengisi kekosongan, dan meningkatkan stabilitas keseluruhannya. (Mistry & Kumar Roy, 2021).



Gambar 3. Abu sekam

1.2.8. Karakteristik Campuran Beton Aspal

1.2.8.1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan untuk menahan tekanan lalu lintas tanpa mengalami deformasi jangka panjang, seperti bleeding, alur, atau gelombang. Kebutuhan akan stabilitas berkorelasi dengan volume lalu lintas dan berat kendaraan yang menggunakan rute tersebut. Volume lalu lintas yang tinggi dan prevalensi truk besar memerlukan stabilitas yang lebih besar dibandingkan dengan jalan yang hanya digunakan oleh kendaraan penumpang. Lapisan tersebut menjadi kaku dan rentan terhadap pemisahan cepat akibat stabilitas yang berlebihan. Namun, kandungan aspal yang dibutuhkan minimal karena volume antara agregat yang berkurang. Ini mengarah pada lapisan aspal yang tipis, yang rentan terhadap kerusakan dan dengan demikian mengurangi daya tahan ikatan aspal.

Stabilitas optimal dapat dicapai dengan menggunakan:

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

Agregat yang bergradasi baik menghasilkan rongga minimal di antara partikel agregat (Rongga dalam agregat mineral = VMA). Konfigurasi ini menghasilkan stabilitas yang baik tetapi memerlukan komponen aspal minimal untuk menghubungkan agregat. VMA rendah menghasilkan aspal yang tidak cukup membungkus agregat mineral, sehingga menghasilkan lapisan aspal tipis yang mudah terkelupas, mengorbankan integritas kedap air lapisan tersebut, memfasilitasi oksidasi, dan menyebabkan kerusakan perkerasan. Penggunaan aspal yang berlebihan menyebabkan hilangnya kedap air, memfasilitasi oksidasi, dan membuat lapisan perkerasan rentan terhadap kerusakan. Penggunaan aspal yang berlebihan menyebabkan cakupan agregat yang tidak memadai karena VMA yang tidak mencukupi, sehingga menghasilkan rongga minimal dalam campuran (Rongga dalam campuran = VIM).

1.2.8.2. Durabilitas

Daya tahan mengacu pada kapasitas beton aspal untuk menahan beban lalu lintas yang berulang, termasuk berat kendaraan dan distribusi berat antara roda kendaraan dan permukaan jalan, sekaligus menahan degradasi dari faktor lingkungan seperti kondisi atmosfer dan fluktuasi suhu. Faktor-faktor yang memengaruhi daya tahan lapisan beton aspal meliputi:

1. Membran aspal atau lapisan aspal. Lapisan aspal yang padat dapat menghasilkan permukaan beton aspal yang sangat tahan lama; namun, potensi kebocoran cukup besar.
2. VIM yang padat menghambat masuknya udara ke dalam campuran, sehingga mengakibatkan oksidasi dan membuat aspal menjadi getas.

VMA cukup besar, sehingga memudahkan pembuatan lembaran aspal yang tebal.

3. Risiko kebocoran yang signifikan muncul ketika kita menggabungkan peningkatan kadar aspal dengan VMA dan VIM minimum. Kami menggunakan agregat bergradasi celah untuk mencapai VMA yang signifikan ini. Karena VMA yang tidak mencukupi, aspal gagal mengikat agregat dengan baik, yang mengakibatkan rongga dalam campuran VIM.

1.2.8.3. Workability

Kemudahan pengerjaan mengacu pada kemudahan campuran untuk didistribusikan dan dipadatkan. Faktor-faktor yang memengaruhi kemudahan pengerjaan meliputi gradasi agregat, suhu campuran, dan kandungan pengisi yang tinggi.

1.2.8.4. Sifat Volumetrik dari campuran Beton Aspal Yang Telah Dipadatkan

Parameter volumetrik beton aspal padat dapat diukur secara analitis untuk sampel yang dipadatkan di laboratorium dan dipadatkan di lapangan. Parameter yang sering digunakan adalah:

1. Kami menyebut volume pori yang tersisa setelah pemadatan campuran beton bitumen sebagai VIM. VIM ini perlu ada di tempat-tempat di mana partikel agregat bergerak karena lalu lintas yang padat atau di mana bitumen menjadi lunak karena suhu tinggi. VIM yang berlebihan akan mengurangi impermeabilitas beton aspal padat, yang mengakibatkan oksidasi aspal yang cepat. Hal ini, pada gilirannya, mempercepat proses penuaan dan mengurangi umur aspal. Saat suhu meningkat, kebocoran perkerasan akan terjadi karena VIM yang tidak memadai.
2. Setelah lapisan aspal dihilangkan seluruhnya, VMA menunjukkan volume pori dalam beton aspal yang dipadatkan. VMA tidak termasuk volume pori dalam setiap partikel agregat. Penggunaan material bergradasi terbuka atau lapisan bitumen yang lebih padat akan menghasilkan peningkatan VMA. VFA menunjukkan volume lapisan atau penutup aspal, atau volume pori beton aspal jenuh padat..

1.2.8.5. Jenis Beton Aspal

Jenis-jenis aspal beton yang saat ini tersedia di Indonesia adalah:

1. Laston (beton apatit yang terus menerus diratakan dan sering digunakan di jalan raya yang dilalui beban lalu lintas berat). Dalam formulasi ini, beton aspal (AC), yang terkadang dikenal sebagai laston, menonjol karena stabilitasnya. Hal ini bergantung pada fungsi Laston, tetapi ketebalan nominalnya setidaknya 4 hingga 6 cm. Secara khusus, ada tiga kategori campuran yang menyusun Laston.

- a. Laston sebagai lapisan aus, disebut AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course). Ketebalan nominal minimal AC-WC adalah 4 sentimeter.
 - b. Laston berfungsi sebagai lapisan pengikat, disebut AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course). Ketebalan nominal minimal AC-BC adalah 5 sentimeter.
 - c. Laston berfungsi sebagai lapisan pondasi, disebut AC-Base (Asphalt Concrete-Base). Ketebalan minimal AC-Base adalah 6 sentimeter.
2. Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton) merupakan salah satu jenis beton aspal bergradasi celah. Paling umum, orang menyebut Lataston sebagai HRS (hot-rolled sheet). Karakteristik utama beton aspal dalam campuran ini adalah ketahanan dan keunikan. Lataston memiliki dua jenis campuran sesuai dengan fungsinya:
- a. Lataston digunakan sebagai lapisan luar, dikenal juga dengan sebutan HRS-WC (hot-rolled sheet-wear rough). Ketebalan nominal minimal HRS-WC adalah 3 cm.
 - b. Lataston, juga dikenal sebagai HRS-Base (Hot Rolled Sheet-Base), berfungsi sebagai lapisan pondasi. Ketebalan minimal HRS-Base ditetapkan sebesar 3,5 cm.
 - c. Latasir (Pasir Aspal Lapis Tipis) merupakan beton aspal yang dirancang untuk jalan dengan lalu lintas ringan, khususnya pada daerah dimana agregat kasar tidak tersedia atau sulit diperoleh. Lapisan ini memiliki ketahanan alur (rutting) yang rendah. Oleh karena itu, tidak disarankan untuk digunakan di area dengan lalu lintas berat atau di daerah tanjakan. Latasir biasanya disebut sebagai SS (lembaran pasir) atau HRSS (lembaran pasir canai panas). Berdasarkan nilai agregat, latasir dapat diklasifikasikan ke dalam kategori berikut: Kami menyebut latasir dari kelas A sebagai HRSS-A atau SS-A. Ketebalan nominal HRSS-A adalah 1,5 cm. Kami menyebut kelas B sebagai HRSS-B atau SS-B. Ketebalan nominal HRSS-B adalah 2 cm. Gradasi agregat HRSS-B lebih kasar.
3. Lapis perata merupakan beton aspal yang digunakan sebagai lapisan perata dan pembentuk penampang melintang pada permukaan jalan yang telah ada. Semua jenis campuran beton aspal dapat digunakan; namun, untuk membedakannya dari campuran untuk lapisan perkerasan jalan baru, setiap campuran beton aspal tersebut diberi tambahan Huruf L. Oleh karena itu, ada tiga jenis campuran yang tersedia: AC-WC (L), AC-BC (L), dan AC -Basis (L).
4. Split Mastic Asphalt (SMA) merupakan beton aspal bergradasi terbuka dengan lapisan aspal tebal. Material ini menggunakan aditif berupa serat selulosa yang berfungsi untuk menstabilkan kadar aspal yang tinggi. Lapisan ini terutama diterapkan pada jalan-jalan yang mengalami beban lalu lintas berat. Terdapat tiga jenis SMA, yaitu:

- a. SMA 0/5 dengan ketebalan perkerasan 1,5–3 cm
 - b. SMA 0/8 dengan ketebalan perkerasan 2–4 cm
 - c. SMA 0/11 dengan ketebalan perkerasan 3–5 cm
5. HSMA (High Stiffness Modulus Asphalt) merupakan aspal beton yang memanfaatkan aspal penetrasi rendah yaitu 30/40. Jalan raya dengan lalu lintas padat biasanya menggunakan lapis.

1.2.8.6. Rancangan Campuran Beton Aspal

Beton aspal merupakan komposit dari agregat dan aspal, dengan atau tanpa aditif. Kami terutama mengambil agregat dari lokasi yang paling dekat dengan tujuan penggunaannya. Sebagaimana diuraikan dalam (Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2). Indonesia sebagian besar menggunakan proses desain campuran berbasis pengujian empiris menggunakan alat Marshall. Lihat Tabel 2. Spesifikasi untuk Karakteristik Campuran Laston. Metodologi desain berbasis pengujian empiris terdiri dari empat tahap, khususnya:

1. Mengevaluasi karakteristik agregat dan aspal yang ditujukan untuk digunakan sebagai bahan dasar dalam kombinasi.
2. Desain campuran laboratorium digunakan untuk menghasilkan formulasi untuk campuran desain. Kami menyebut formula untuk campuran desain ini sebagai DMF (Formula Campuran Desain). Sebelum melanjutkan ke tingkat berikutnya, direktur kerja harus menerima DMF ini sebelum melanjutkan ke tingkat berikutnya.
3. Langkah ketiga melibatkan kalibrasi hasil desain campuran ke instalasi pencampuran yang ditunjuk.
4. Setelah hasil dari dua fase sebelumnya, uji coba produksi dilakukan di fasilitas pencampuran, diikuti dengan penerapan dan pemadatan hasil campuran uji coba. Kami melakukan percobaan produksi untuk campuran minimal 50 ton. Untuk teknik pemadatan yang dimaksud, semua tugas menggunakan peralatan yang ditentukan.

Tabel 2. Sifat Campuran Laston (AC)

Sifat Campuran		Laston			Spesifikasi
		AC-WC	AC-BC	AC-Base	
Jumlah tumbukan per bidang		75		112	(Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 (Revisi 3), 2010)
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 (%) pada Kepadatan membal (refusal)	Min.	2	

1.2.9. Marshall

Uji Marshall merupakan penilaian wajib untuk beton aspal, yang dirancang untuk mengevaluasi dan memastikan kualitas material sesuai dengan harapan. Uji Marshall menentukan persentase kadar aspal yang diperlukan untuk gradasi batuan yang diinginkan, yang menghasilkan kekuatan tekan optimal, yang dikenal sebagai uji stabilitas Marshall atau uji stabilitas statis, yang diukur dalam kilogram silinder beton aspal yang direndam selama satu jam pada suhu 60°C. Uji Marshall merupakan metode untuk mencapai desain yang efektif. Prosedur laboratorium yang dikenal sebagai metode uji Marshall mengevaluasi kinerja campuran aspal panas.

Stabilitas dan flow kombinasi diukur menggunakan metode ini dengan alat uji Marshall (Irfansyah et al., 2017). Metode ini diciptakan pada tahun 1940-an oleh Bruce Marshall dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi dan distandarisasi dalam (ASTM D-1559, 1976). Stabilitas dan aliran diuji pada beberapa benda uji dengan kadar aspal yang bervariasi (SNI 06-2489-1991). tentang prosedur pengujian campuran aspal dengan alat Marshall dirujuk dalam konteks artikel ini. Benda uji awalnya direndam dalam penangas air pada suhu 60°C sekitar 30 menit sebelum pelaksanaan tes Marshall.

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 penilaian deformasi aksial yang akurat terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Universal Testing Mechine

1.2.10. UPV

Penerapan pengujian non-destruktif (NDT) merupakan hal yang baru dan menarik. Pengujian ini dapat menilai kondisi struktural secara non-destruktif. Kami mendefinisikan NDT sebagai teknik yang mengevaluasi proyek, material, atau sistem tanpa mengorbankan fungsionalitas subjek uji. Inilah keuntungan utama dari pendekatan NDT. Kami menggunakan metode ini untuk menilai variasi dalam struktur, kerataan, deformasi, dan faktor-faktor lainnya. Salah satu alat yang digunakan untuk proses NDT adalah pengujian gelombang ultrasonik. Kecepatan pulsa ultrasonik, disingkat UPV, merupakan metode pengujian non-destruktif untuk campuran aspal yang menggunakan kecepatan gelombang ultrasonik untuk menilai kualitas campuran. Pengujian UPV mampu mengidentifikasi campuran aspal yang dipadatkan secara tidak tepat. Penurunan kecepatan gelombang UUV menunjukkan hal ini. Dalam pengujian UPV, perubahan kecepatan gelombang dapat menunjukkan stabilitas aspal. Penurunan kecepatan gelombang mengakibatkan penurunan stabilitas aspal. Jika kecepatan gelombang meningkat, stabilitas aspal juga meningkat. Tersedia tiga metode untuk pengujian UPV: langsung, tidak langsung, dan semi-langsung. Berikut ini adalah contoh pengujian UPV pada Gambar 5. Implementasi pengujian UPV.



Gambar 5. Ultrasonik Pulse Velocity

1.2.11. 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 Deplesi 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 menunjukkan variasi suhu global yang disebabkan oleh efek rumah kaca. Gas rumah kaca, termasuk karbon dioksida (CO₂), yang dipancarkan oleh aktivitas manusia, bertahan di atmosfer Bumi dan menghambat pembuangan panas planet dari matahari. Peningkatan suhu global dapat menyebabkan gangguan iklim, penggurunan, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Konsensus ilmiah yang luas menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca secara signifikan memengaruhi 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 ini disebabkan oleh deposisi polutan yang bersifat asam pada tanah, air, organisme, ekosistem, dan bahan seperti sulfur dan nitrogen. Gas-gas asam seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x) yang dilepaskan dalam pembakaran bahan bakar

bereaksi dengan air di tanah atau di atmosfer (di mana ini membentuk "hujan asam"). Ion hidrogen sangat reaktif dan memicu zat lain mengubah komposisi dan sifat fisiknya. Deposisi asam oleh karena itu dapat merusak ekosistem dan mengikis bahan. 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.

Diperkirakan bahwa konstruksi jalan, khususnya prosedur aspal campuran panas, menghasilkan emisi gas rumah kaca paling banyak di antara semua kegiatan konstruksi lainnya. Menjaga material pada suhu tinggi (>100°C) meningkatkan energi yang dibutuhkan untuk memproses aspal campuran panas. Sumber utama energi ini adalah pembakaran bahan bakar fosil. Potensi emisi gas rumah kaca pada gambar di bawah ini adalah hasil dari pembakaran lengkap molekul hidrokarbon, seperti yang direpresentasikan oleh persamaan $C_xH_y + O_2 = CO_2 + H_2O$. Emisi ini terkait dengan operasi pengaspalan jalan. Lima tahap melibatkan penggunaan material pengaspalan jalan: ekstraksi, produksi, konstruksi, pemeliharaan, dan daur ulang (Fadholah & Setyawan, 2017). Studi ini meneliti perkiraan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂) yang terkait langsung dengan kegiatan konstruksi pengaspalan jalan. Ini termasuk tahapan produksi campuran, transportasi campuran, dan proses peletakan dan pematatan. Beton, bahan bangunan yang umum di industri konstruksi, menghasilkan sejumlah besar limbah yang merugikan lingkungan

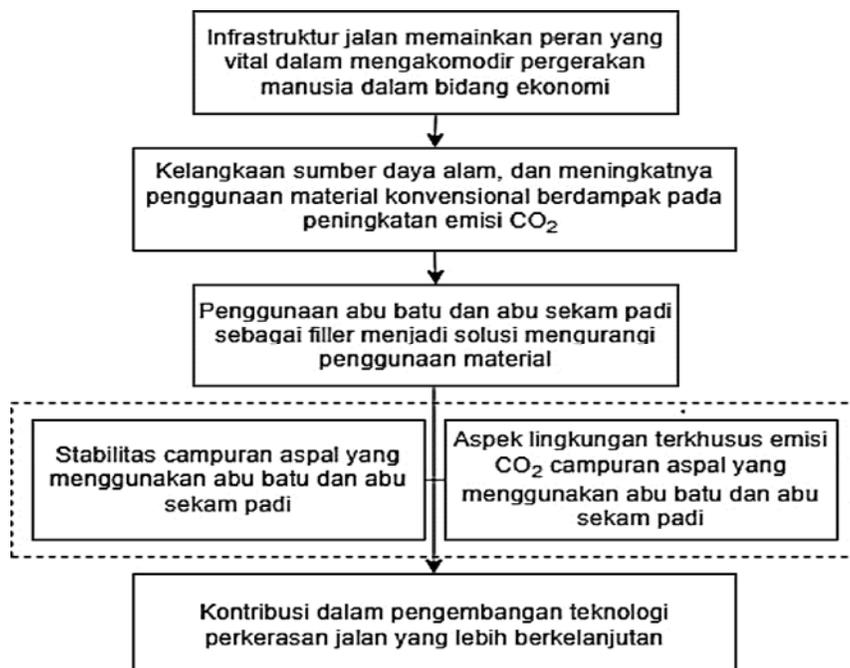
1.3. Desain Konseptual

Dalam upaya untuk mendukung pembangunan ekonomi yang berkelanjutan, infrastruktur jalan memainkan peran yang sangat vital. Jalan tidak hanya menjadi sarana utama bagi pergerakan manusia, komoditas, dan jasa, tetapi juga memfasilitasi perdagangan, investasi, serta berbagai aktivitas ekonomi lainnya dengan menghubungkan berbagai wilayah. Namun, tantangan yang dihadapi dalam konstruksi jalan, terutama terkait dengan pemilihan material yang tepat, masih menjadi perhatian utama. Penggunaan material daur ulang dalam konstruksi, seperti SD dan RHA, menjadi salah satu solusi yang mulai diterapkan untuk mengatasi masalah kelangkaan sumber daya dan dampak lingkungan. Penelitian ini fokus pada penggunaan SD dan RHA sebagai bahan pengisi dalam campuran aspal pada lapisan AC-BC, dengan tujuan utama untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap stabilitas campuran dan dampak lingkungan yang dihasilkan.

Studi ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman tentang kemandirian penggunaan SD dan RHA sebagai aditif dalam campuran aspal. Stabilitas campuran aspal merupakan indikator penting kualitas konstruksi jalan, dan studi ini

akan meneliti nilai stabilitas yang dihasilkan oleh dua jenis bahan pengisi. Selain itu, faktor lingkungan menjadi fokus penting studi ini, mengingat meningkatnya permintaan untuk penggunaan teknologi konstruksi berkelanjutan. Emisi gas rumah kaca dari penggunaan kedua jenis bahan pengisi ini akan diukur dan dievaluasi untuk menentukan dampak lingkungan dari setiap bahan.

Dengan membatasi penelitian pada jenis aspal minyak dengan penetrasi 60/70 dan mengikuti spesifikasi gradasi campuran sesuai dengan (Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2), penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih berkelanjutan. Gambar 6 menunjukkan desain kerangka konseptual. Hasil dari penelitian ini tidak hanya akan bermanfaat bagi industri konstruksi dalam hal peningkatan kualitas dan durabilitas jalan, tetapi juga dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi upaya lebih lanjut dalam pengembangan material konstruksi yang efisien dan ramah lingkungan.



Gambar 6. Desain kerangka konseptual

1.4. Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh (Arabani et al., 2017) menggunakan RHA sebagai bahan pengisi, menghasilkan stabilitas sebesar 104 kN, aliran sebesar 3,37 mm, VIM sebesar 7,15%, VMA sebesar 24,5%, dan VFB sebesar 58,4%. Nilai stabilitas campuran RHA berkurang sebesar 12% relatif terhadap campuran yang

menggunakan SD. Dalam sebuah penelitian yang dilakukan oleh (Sargin et al., 2013), kombinasi dibuat dengan menggunakan bitumen termodifikasi dan 15-20% RHA. Campuran yang mengandung 5% dan 20% RHA menunjukkan peningkatan stabilitas masing-masing sebesar 12% dan 32% dibandingkan dengan campuran kontrol. Selain itu, stabilitas campuran yang mengandung 15% RHA adalah 3% lebih rendah dibandingkan campuran yang dibuat dengan 20% RHA. Stabilitas kombinasi yang dibuat dengan RHA 5% lebih besar 12% dibandingkan campuran kontrol, sedangkan stabilitas campuran yang dibuat dengan RHA 20% lebih tinggi 32% dibandingkan campuran kontrol. Selain itu, stabilitas campuran yang mengandung 15% RHA adalah 3% lebih rendah dibandingkan campuran yang dibuat dengan 20% RHA.

Penelitian yang dilakukan oleh (Arabani & Tahami, 2017), di mana mereka menyiapkan kombinasi aspal termodifikasi yang menggunakan 15–30 RHA. Kombinasi yang mengandung RHA 5% dan 20% menunjukkan peningkatan stabilitas masing-masing sebesar 12% dan 32% dibandingkan dengan campuran kontrol. Selain itu, stabilitas campuran yang mengandung 15% RHA adalah 3% lebih rendah dibandingkan dengan campuran yang dibuat dengan 20% RHA.

(Puslitbang et al., 1997) Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan emisi CO₂ dan menilai penghematan biaya atau kerugian ekonomi terkait yang diakibatkan oleh emisi tersebut. Data diperoleh dari dokumen kontrak dan wawancara komprehensif. Dengan menggunakan metode analisis siklus hidup 10 tahun, penerapan jalan beton akan mengakibatkan kerugian sebesar 1.162,5 tCO₂e/km atau biaya sebesar \$19.763,18/tCO₂e/km. Selama periode 20 tahun, emisi akan berkurang sebesar 661,2 tCO₂e/km, menghasilkan penghematan biaya sebesar \$11.237/tCO₂/km, dengan rasio emisi 1:1,22 dan biaya efektif sebesar \$16,1/tCO₂/km. Sumber emisi utama dalam pembangunan jalan beton adalah fase ekstraksi dan manufaktur, yang mencakup 85,4%, terutama karena bahan baku semen. Sebaliknya, fase konstruksi jalan aspal menyumbang 51% emisi, sebagian besar berasal dari penggunaan alat berat.

(Thives & Ghisi, 2017) 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. Penelitian yang dilakukan oleh (Ozturk et al., 2022) Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan RHA bersama dengan pozolan lain dapat menghasilkan pengurangan emisi CO₂ sebesar 25% selama produksi beton, selain peningkatan efisiensi sebesar 65%. Konsep yang disajikan dalam studi ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih komprehensif terhadap praktik konstruksi dan pengembangan proses pemilihan bahasa yang lebih komprehensif yang dapat diterapkan pada RHA.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

2.1.1. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Riset Eco Material, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, selama dua bulan, terhitung sejak Februari 2024

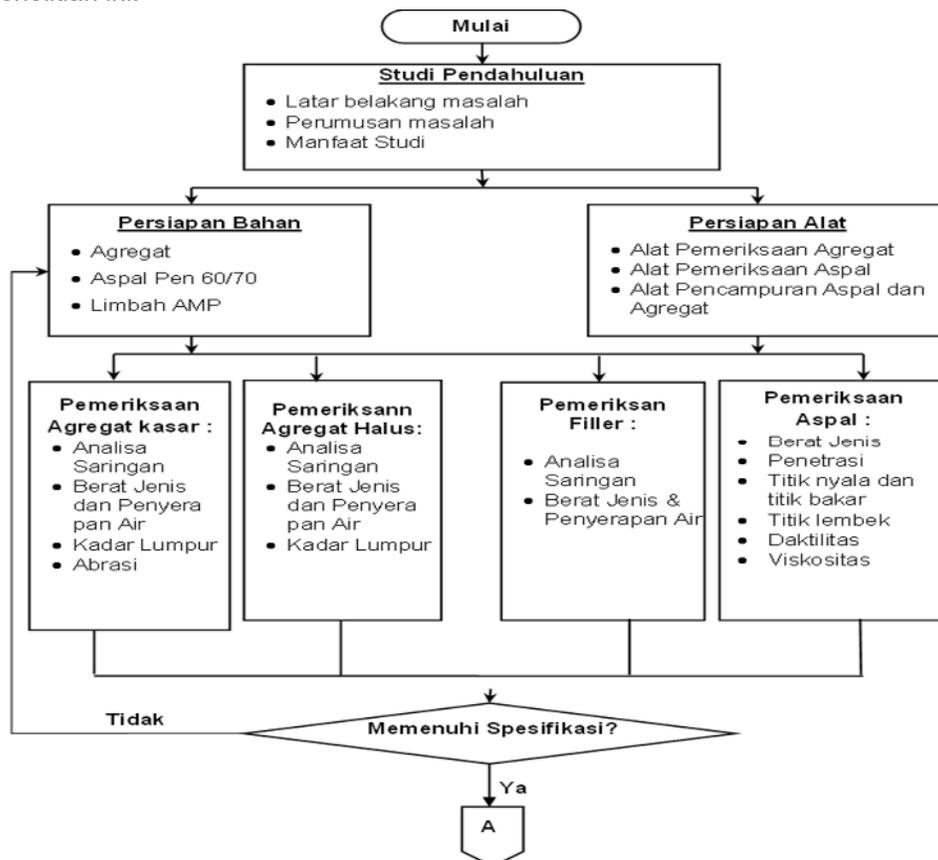
2.1.2. Material

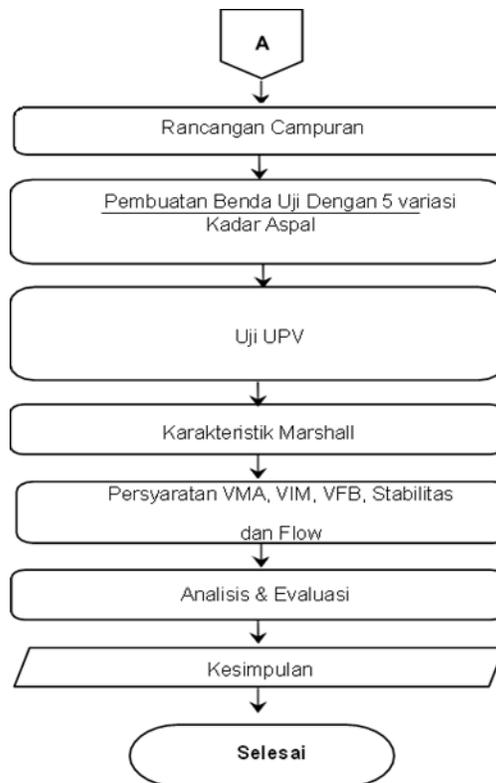
Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi batu pecah dengan ukuran 2-3 mm, 1-2 mm, dan 0,5-1 mm. Abu batu sebagai bahan baku utama diperoleh dari PT. Putra Jaya Moncongloe, Kabupaten Maros, sedangkan abu sekam diperoleh dari industri pertanian.

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1. Bagan Penelitian

Pada gambar 7 menunjukkan tahapan-tahapan yang dilaksanakan dalam penelitian ini.





Gambar 7. Diagram alir penelitian

2.2.2. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini melakukan beberapa pengujian di laboratorium, marshall dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) pada campuran aspal. Untuk mendapatkan data, selanjutnya, dua strategi pengumpulan data digunakan, khususnya :

1. Melakukan dengan cara menganalisa berbagai buku, jurnal, atau publikasi akademis yang menjadi kerangka teori penelitian ini dan menjadi sumber perolehan data sekunder.
2. Pemeriksaan sampel dilakukan dilaboratorium untuk mendapatkan data primer guna analisa hasil penelitian.

2.3. Analisis dan Perhitungan

2.3.1. Metode Pengujian Karakteristik

Penulis menggunakan metode yang ditetapkan oleh Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Bina Marga, yaitu Buku Petunjuk Pemeriksaan Material Jalan (MPBJ). Lihat Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Karakteristik

No	Pengujian	Metode Pengujian	
		Agregat Kasar	Agregat Halus
1	Analisa Saringan	(SNI 03-1968, 1990)	
2	Berat Jenis dan Penyerapan Agregat	(SNI 1969, 2008)	(SNI 1970, 2008)
3	Lolos saringan 200	(SNI 03-4142, 1996)	
4	Keausan Agregat	(SNI 2417, 2008)	
5	Indeks Kepipihan	(SNI 03-4137, 1996)	
6	Berat Jenis Aspal	(SNI 2441, 2011)	
7	Rancangan Campuran Aspal	(Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2), 2020)	
8	Uji Marshall	(SNI 06-2489, 1991)	

2.3.2. Penentuan Jumlah Benda Uji

Tabel 4 menampilkan kuantitas benda uji yang di buat untuk penelitian ini.

Tabel 4. Perhitungan Benda Uji AC-BC

Uraian Kegiatan Pengujian		
Penentuan Kadar Aspal Optimum		
Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji	
	SD	RHA
5	3.00	3.00
5.5	3.00	3.00
6	3.00	3.00
6.5	3.00	3.00
7	3.00	3.00

2.3.3. Perhitungan Perkiraan Bitumen

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Rashed & Al-Hadidy, 2023; Saleh & Isya, 2017). Komposisi campuran agregat ditentukan dengan metode coba-coba digunakan untuk menentukan komposisi campuran agregat. Berdasarkan jumlah aspal yang melibatkan pemilihan variasi kadar aspal berdasarkan jumlah

awalnya yang diperkirakan sebagai kadar aspal optimal. dengan menggunakan persamaan 1.

$$P_b = 0.035 (CA) + 0.045 (FA) + 0.18 (F) + K \quad (1)$$

Dimana :

P _b	= Perkiraan bitument (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

2.4. Pengujian UPV

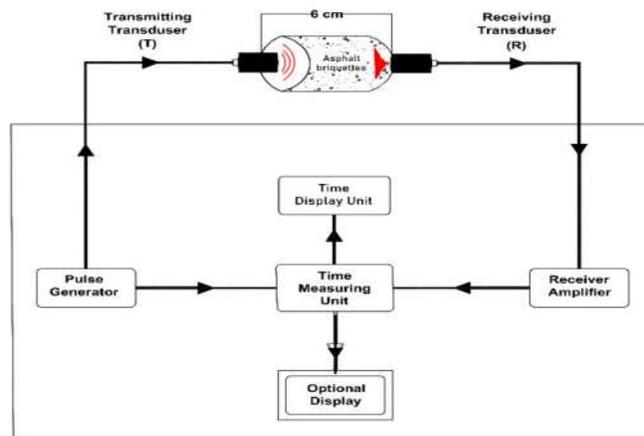
UPV adalah metode pengujian non-destruktif yang dapat secara akurat menilai integritas struktural bahan padat seperti batu (Vasanelli dkk., 2015), konkret (Ahmad dkk., 2022; Henry dkk., 2011), mortar (Buckner dkk., 2016; Omer dkk., 2015), dan aspal (Abo-Qudais & Suleiman, 2005) Teknik ini dikembangkan sesuai dengan spesifikasi yang diuraikan dalam ASTM C597-02. Perangkat pulsa ultrasonik mengukur kecepatan perambatan gelombang dari waktu ke waktu. Agar dapat melintasi waktu, gelombang memerlukan perangkat pengukur kecepatan pulsa ultrasonik (Δt). Akibatnya, kecepatan gelombang dapat dipastikan dengan menggunakan persamaan 2:

$$V = d/t \quad (2)$$

di mana V adalah kecepatan gelombang ultrasonik (m/s), d adalah jarak antara pemancar dan penerima (m), dan t adalah waktu tempuh gelombang ultrasonik. Gambar 8 menunjukkan skema UPV dan. Setelah mengetahui kecepatan pulsa maka dilakukan percobaan pengukuran EFR (Effective Flow Resistivitas) pada aspal beton. (Biligiri & Way, 2014) Impedansi campuran SD dan RHA dihitung menggunakan persamaan (3) dan dinyatakan dalam satuan Ns/m³. Impedansi, yang biasa disebut EFR (A. Singh et al., 2023), adalah impedansi mekanis per satuan luas suatu material, yang diperoleh dengan mengalikan kerapatan dan UPV. Penting untuk dipahami bahwa EFR merupakan impedansi umum suatu material, bukan impedansi akustiknya yang unik. Konversi EFR ke Rayl cgs dapat dicapai dengan mengalikan nilai yang diperoleh dari Persamaan 3 dengan faktor 0,10.

$$Z = \rho \times v \quad (3)$$

dimana Z adalah impedansi dalam satuan (Ns/m³), ρ adalah nilai kerapatan material dalam satuan (kg/m³), dan v adalah kecepatan gelombang melalui material dalam satuan (m/s).

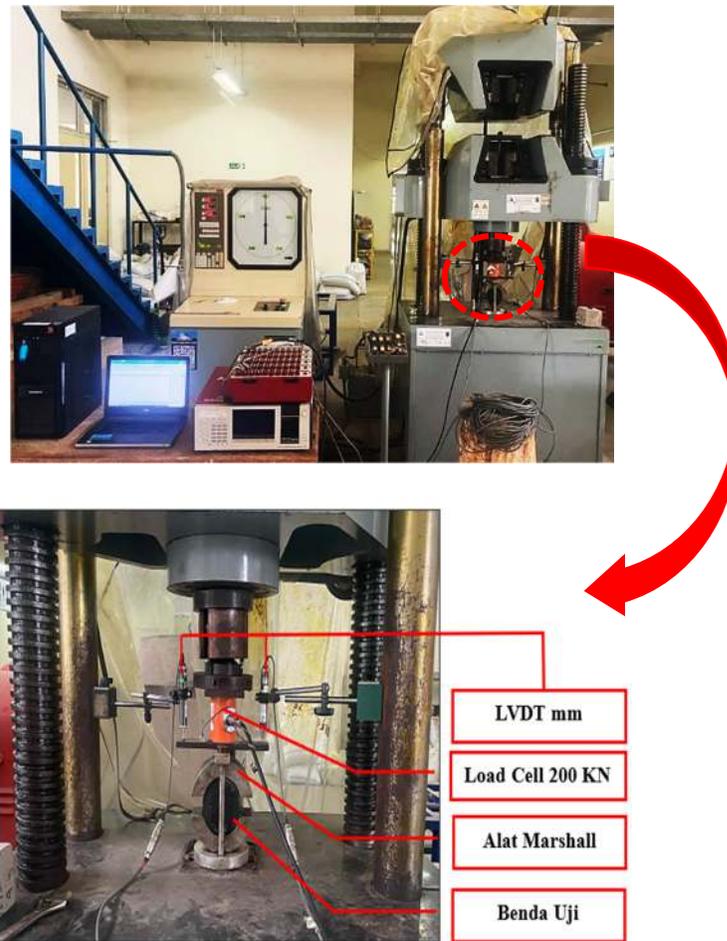


Gambar 8. Skema UPV

2.5. Pengujian Marshall

Gambar 9 mengilustrasikan mesin uji universal (UTM) yang digunakan dalam uji Marshall. Peralatan ini mengukur nilai stabilitas dan aliran dengan menilai ketahanan campuran aspal terhadap beban terpusat. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan transformator diferensial variabel linier (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara tepat. Beban diberikan secara bertahap hingga mencapai titik kegagalan sampel, dan data tegangan dan regangan akan dicatat secara terus-menerus.

Uji Marshall adalah metode yang umum digunakan dan diakui untuk mengembangkan campuran aspal, berhasil dalam menghasilkan desain berkualitas tinggi. Pendekatan ini diatur dalam ASTM D1559-89 dan dikembangkan oleh Bruce Marshall di Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi pada tahun 1940-an. Berbagai sampel uji dengan kandungan aspal yang berbeda dibuat dan dievaluasi menggunakan Uji Marshall untuk menilai aliran dan stabilitas. Spesimen uji direndam dalam air pada suhu 60 °C selama 30 menit sebelum pengujian (SNI 2489:2018). Uji Marshall mengevaluasi fleksibilitas plastik dan stabilitas campuran aspal, mencerminkan kapasitas mereka untuk menahan stres lalu lintas (Shah et al., 2020). Stabilitas menunjukkan kemampuan campuran aspal untuk menahan deformasi permanen ketika dikenakan beban terkonsentrasi. Aliran mengukur sejauh mana deformasi yang dialami oleh campuran aspal sebelum mengalami kegagalan. Kedua kualitas tersebut dinilai selama evaluasi. Uji Marshall mengevaluasi variabel volumetrik tambahan, termasuk VIM (ruang kosong dalam campuran), VMA (ruang kosong dalam agregat mineral), dan VFB (ruang kosong yang terisi aspal), bersama dengan karakteristik stabilisasi dan aliran. Parameter ini memberikan informasi mengenai kepadatan dan rongga udara di dalam campuran aspal.



Gambar 9. Alat Pengujian Marshall

2.6. Parameter Dampak Lingkungan dari Campuran Aspal Panas

Studi yang kami lakukan mengamati apa yang terjadi pada potensi pemanasan global (GWP), potensi reduksi abiotik (ADP), potensi pengasaman (AP), dan potensi eutrofikasi (EP) ketika RHA ditambahkan ke campuran aspal yang digunakan sebagai pengisi. Semua potensi ini diukur. Kami membandingkan nilai parameter dampak lingkungan dengan komposisi campuran dalam HMA untuk memperkirakan kriteria persetujuan untuk RHA sebagai pengisi (Walach et al., 2019) untuk menestimasi nilai dari parameter dampak lingkungan, digunakan persamaan 4:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \times w_i \dots\dots\dots(4)$$

Penilaian parameter lingkungan, termasuk ADP, GWP, AP, dan EP, dilakukan melalui pemeriksaan literatur ilmiah yang kredibel. Tabel 5 menyajikan nilai ADP,

GWP, AP, dan EP untuk agregat kasar, agregat halus, abu batu, abu sekam, dan aspal yang digunakan dalam penelitian ini, yang diambil dari literatur.

Tabel 5. Data dampak lingkungan dari produksi HMA

Sources	Material	ADP	GWP	AP	EP
		(kgSbeq)	(kgCO ₂ eq)	(kgSO ₂ eq)	(kgPO ₄ eq)
(Quispe et al., 2019)	Rice Husk Ash	2.00.E-03	4.29.E-03	1.60.E-04	4.00.E-05
(Challenge, 2019)	Asphalt	6.38.E-01	6.38.E-01	6.38.E-01	6.38.E-01
(Kurda et al., 2018; Majhi et al., 2021)	Stone dust	4.88.E-03	4.88.E-03	4.88.E-03	4.88.E-03
(Silva et al., 2023)	Coarse Agregat	1.09.E-09	2.44.E-02	1.44.E-04	3.18.E-05

Selanjutnya faktor-faktor dampak lingkungan dari setiap raw materia dikalikan dengan jumlahnya pembentuk CB untuk mempelajari dampak lingkungan dengan fuctional 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)