

**ANALISA KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN BERASPAL
MENGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI FILLER**

**ANALYSIS OF COMPRESSIVE STRENGTH AND CARBON FOOTPRINT
OF ASPHALT MIXTURE USING ROCK ASH AND CEMENT AS FILLER**



ANDRE PIELI PRATAMA

D012231033

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024



**“ANALISA KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN
BERASPAL MENGGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI
FILLER”**

ANDRE PIELI PRATAMA

D012231033



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

**“ANALYSIS OF COMPRESSIVE STRENGTH AND CARBON
FOOTPRINT OF ASPHALT MIXTURE USING ROCK ASH AND CEMENT
AS FILLER”**

**ANDRE PIELI PRATAMA
D012231033**



**CIVIL ENGINEERING MASTER STUDY PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**ANALISA KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN BERASPAL
MENGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI FILLER**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ANDRE PIELI PRATAMA

D012231033

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS**ANALISA KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN
BERASPAL MENGGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI
FILLER****ANDRE PIELI PRATAMA****D012231033**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr.Eng.M.Akbar Carofige 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

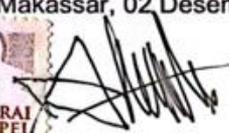
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "*Analisa Kuat Tekan Dan Jejak Carbon Campuran Beraspal Menggunakan Abu Batu Dan Semen Sebagai Filler*" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Dr.Eng. M. Akbar Caronge, ST, MEng sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng sebagai Pembimbing Pendamping). 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 disubmid dan ter under review di Jurnal (Innovative Infrastructure Solutions) sebagai artikel dengan judul "*Reliability Laboratory Investigation of Hot Asphalt Mixtures Containing Stone Dust and Cement as Fillers: Combined Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity*". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 02 Desember 2024



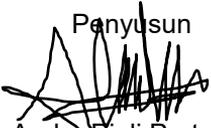

Andre Pieli Pratama
D012231033

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh kerendahan hati penulis panjatkan puji dan syukur kehadirat Tuhan yang maha esa 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 KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN BERASPAL MENGGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI FILLER”** 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 Ir Alpius MT. dan Elnice yang selalu memberi motifasi dan bantuan baik moril maupun materil.

Gowa, 26 November 2024

Penyusun

Andre Piel Pratama

ABSTRAK

ANDRE PIELI PRATAMA. **Analisa Kuat Tekan Dan Jejak Carbon Campuran Beraspal Menggunakan Abu Batu Dan Semen Sebagai Filler** (dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Saat ini pemanfaatan perkerasan lentur dengan bahan pengisi sebagai faktor krusial banyak digunakan sebagai komponen dalam negeri di daerah dengan keterbatasan sumber daya alam yang berdampak signifikan terhadap ketersediaan bahan pengisi. Penelitian ini menggunakan bahan pengisi sebagai variabel konsisten, yaitu sebesar 6% dari berat agregat total. Bersama aspal, bahan pengisi SD sering digunakan sebagai bahan pengisi pengganti, berkisar antara 5-7% (dengan penambahan 0,5%). Penelitian ini mengkaji hubungan antara tegangan tekan, regangan tekan, dan sifat volumetrik dengan memanfaatkan campuran bahan pengisi debu batu, semen, dan aspal dengan kadar yang bervariasi. Hasil uji UPV menunjukkan bahwa kuat tekan menggunakan SD lebih rendah (4,5%) dibandingkan dengan campuran menggunakan CE. Selisih kurang dari 10% menunjukkan bahwa SD dan CE kompatibel untuk digunakan sebagai bahan pengganti bahan pengisi. Penelitian ini dirancang untuk mengantisipasi kelangkaan debu batu di daerah yang tidak memiliki sumber daya alam berupa batu pecah dan pasir. Kekuatan tekan dan regangan campuran aspal dengan filler SD dan CE menunjukkan pola dengan empat bagian terpisah: bagian penyesuaian beban, bagian deformasi reversibel, bagian deformasi ireversibel, dan perilaku elastoplastik hingga 80% dari bagian tegangan puncak. Hal ini karena sebagian besar sifat fisik CE menyerupai sifat fisik SD. Namun, yang berbeda dari setiap campuran adalah tegangan puncak. Pengaruh debu batu (SD) dan semen (CE) sebagai filler dalam campuran beton aspal dievaluasi dalam penelitian ini. Hal ini ditunjukkan oleh hasil bahwa dampak yang berbeda pada karakteristik campuran dihasilkan oleh kedua jenis filler. CE mencapai nilai kekuatan tekan, volumetrik, modulus elastisitas, modulus dinamis, dan indeks ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan SD. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi dan retak diberikan oleh campuran beton aspal dengan CE. Secara umum, hasil pengujian volumetrik, terutama dalam hal VIM, VMA, dan VFB, menunjukkan bahwa campuran yang mengandung SD dan CE dengan kadar aspal 6%–7% kompatibel.

Kata Kunci: Filler, Beton aspal, Kekuatan tekan, Debu batu, Semen

ABSTRACT

ANDRE PIELI PRATAMA. *Analysis Of Compressive Strength And Carbon Footprint Of Asphalt Mixture Using Rock Ash And Cement As Filler* (guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Currently, the utilization of flexible pavements incorporating fillers as crucial factors is widely used as domestic components in areas with limited natural resources that have a significant impact on filler supply. This study used filler as a consistent variable, consisting of 6% of the total aggregate weight. Along with asphalt, SD filler is often used as a substitute filler, ranging from 5-7% (with an increase of 0.5%). This study investigated the relationship between compressive stress, compressive strain, and volumetric properties by utilizing mixtures of stone dust, cement, and asphalt fillers with varying contents. The UPV test results show that the compressive strength using SD is lower (4.5%) compared to the mixture using CE. A difference of less than 10% indicates that SD and CE are compatible to be used as filler replacements. This research was designed to anticipate the scarcity of stone dust in areas that do not have natural sources of crushed stone and sand. The compressive strength and strain of asphalt mixtures with SD and CE fillers show a pattern with four separate parts: load adjustment part, reversible deformation part, irreversible deformation part, and elastoplastic behavior up to 80% of the peak stress part. This is because most of the physical properties of CE resemble the physical properties of SD. However, what is different from each mixture is the peak stress. The effect of stone dust (SD) and cement (CE) as fillers in asphalt concrete mixtures is evaluated in this study. It was shown by the results that different impacts on the characteristics of the mixture were produced by both types of fillers. CE achieved better compressive strength, volumetric, elastic modulus, dynamic modulus, and toughness index values compared to SD. This indicates that better resistance to deformation and cracking is provided by asphalt concrete mixtures with CE. In general, the results of volumetric testing, especially in terms of VIM, VMA, and VFB, showed that mixtures containing SD and CE with asphalt content of 6%–7% were compatible.

Keywords: Filler, Asphalt concrete, Compressive strength, Stone dust, Cement

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL BERBAHASA ASING.....	ii
PENGAJUAN TESIS.....	iii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	iv
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	14
1.1. Latar Belakang	14
1. Rumusan Masalah.....	15
2. Tujuan Penelitian	15
3. Manfaat Penelitian	15
4. Batasan Masalah	16
1.2. Teori.....	16
1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya	16
1.2.2 Agregat.....	17
1.2.2.1 Klasifikasi Agregat	18
1.2.2.2 Gradasi	19
1.2.3 Bahan Pengisi (Filler)	20
1.2.4 Spesifikasi Bahan Pengikat	20
1.2.5 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	21
1.2.5.1 Workability	23
1.2.6 Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal Yang Telah di Padatkan.....	23
1.2.7 Jenis Beton Aspal	24
1.2.8 Rancangan Campuran Beton Aspal.....	25
1.2.9 Semen	26
1.2.10 Uji Kuat Tekan Campuran Aspal	27
1.2.11 Toughness Index.....	30
1.2.12 Parameter Dampak Lingkungan	31

1.2.13 Desain Konseptual.....	33
1.2.14 Penelitian Terdahulu	35
BAB II METODE PENELITIAN.....	37
2.1 Bagan Alir Penelitian.....	37
2.2 Lokasi Material	38
2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	38
2.4 Teknik Pengumpulan Data	39
2.5 Persiapan Peralatan dan Pengambilan Sampel	39
2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji	39
2.7 Perhitungan Perkiraan Bitumen	40
2.8 Pengujian UPV	41
2.9 Pengujian Kuat Tekan.....	42
2.10 Environment Performance dari Campuran Aspal Panas.....	43
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
3.1 Karakteristik Material	44
3.2 Analisa Rancangan Campuran.....	45
3.3 Kurva Hubungan Kuat Tekan, Kadar Aspal dan Regangan	47
3.4 Kekuatan Tekan Puncak dan Parameter Volumetrik.....	49
3.4.1 <i>Hubungan Kuat Tekan, Kadar Aspal dan VMA</i>	50
3.4.2 Hubungan Kuat Tekan, Kadar Aspal dan VIM.....	51
3.4.3 Hubungan Kuat Tekan, Kadar Aspal dan VFB	53
3.5 Ultrasonic Pulse Velocity	54
3.5.1 <i>Pola Gelombang Ultrasonik</i>	54
3.5.2 Modulus Elastisitas dan Modulus Dinamis.....	55
3.5.3 Toughness Index.....	57
3.6 Dampak Lingkungan.....	58
BAB IV KESIMPULAN.....	63
DAFTAR PUSTAKA.....	64
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC	19
Tabel 2. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)	26
Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA.....	32
Tabel 4. Metode Pengujian Karakteristik.....	39
Tabel 5. Perhitungan Benda Uji	40
Tabel 6. Karakteristik Agregat Kasar, Agregat Halus dan Filler	44
Tabel 7. Karakteristik Aspal	44
Tabel 8. Gradasi Semen	45
Tabel 9. Rancangan Campuran Aspal Panas Lapisan AC-BC	46
Tabel 10. Hubungan Antara Tegangan dan Regangan Pada Setiap Campuran Dengan SD Sebagai Pengisi	48
Tabel 11. Hubungan Antara Regangan dan Tegangan Pada Setiap Bagian Campuran Dengan CE Sebagai Pengisi.....	48
Tabel 12. Hubungan Antara Komposisi, Kuat Tekan, Kadar Aspal dan Dampak Lingkungan Pada Campuran Aspal Dengan CE Sebagai Filler	58
Tabel 12. Hubungan Antara Komposisi, Kuat Tekan Dan Kadar Aspal Dan Dampak Lingkungan Pada Campuran Aspal Dengan SD Sebagai Filler	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur	17
Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat	19
Gambar 3. Skema Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity.....	22
Gambar 4. Skema Pembebanan Pada Lapis Perkerasan Jalan	28
Gambar 5. Kurva Tegangan dan Regangan	29
Gambar 6. Universal Testing Mechine	30
Gambar 7. Grafik Toughness Index	31
Gambar 8. Kerangka Konseptual.....	34
Gambar 9. Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 10. Ilustrasi Pengujian UPV.....	41
Gambar 11. Pengujian Kuat Tekan	42
Gambar 12. Gradasi Agregat.....	46
Gambar 13. Grafik menunjukkan korelasi antara kuat tekan dan regangan campuran SD.	49
Gambar 14. Grafik menunjukkan korelasi antara kuat tekan dan regangan campuran SD.....	49
Gambar 15. Hubungan Kuat Tekan dan VMA Campuran Filler SD.....	50
Gambar 16. Hubungan Kuat Tekan dan VMA Campuran Filler CE.....	51
Gambar 17. Grafik korelasi kekuatan tekan dan VIM campuran SD	52
Gambar 18. Grafik korelasi kekuatan tekan dan VIM campuran CE.	52
Gambar 19. Grafik korelasi antara kuat tekan dan VFB campuran SD.....	53
Gambar 20. Grafik korelasi antara kuat tekan dan VFB campuran CE.....	53
Gambar 21. Pola gelombang ultrasonik campuran bahan pengisi (A) SD; (B) CE	55
Gambar 22. Grafik korelasi antara kuat tekan dan UPV campuran SD.	55
Gambar 23. Grafik korelasi antara kuat tekan dan UPV campuran CE	56
Gambar 24. Grafik Modulus Elastisitas Dan Modulus Dinamis Campuran CE Dan SD.....	57
Gambar 25. Grafik Toughness Index campuran SD dan CE.....	57
Gambar 26. GWP Pada Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler CE	60
Gambar 27. GWP Pada Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler SD	60
Gambar 28. ADP Pada Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler CE.....	61
Gambar 29. ADP Pada Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler SD.....	61
Gambar 30. AP Terhadap Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler CE	61
Gambar 31. AP Terhadap Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler SD.....	62
Gambar 32. EP Terhadap Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler CE.....	62
Gambar 33. EP Terhadap Komposisi dan Kuat Tekan Campuran Filler SD.....	62

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan keterangan
SD	= Stone Dust (Abu Batu)
CE	= Cement (Semen)
TI	= Toughness Index
MPa/ N/mm ²	= kuat tekan/Tarik beton Aspal benda uji
P	= gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)
E _c	= modulus elastisitas (MPa)
UTM	= universal testing machine
SNI	= standar nasional indonesia
ASTM	= american society for testing and materials
CA	= Coarse Aggregate
FA	= Fine Aggregate
UPV	= Ultrasonic Pulse Velocity
AC	= Asphalt Concrete
GWP	= Global Warming Potential
ADP	= Abiotic Depletion Potential
AP	= Acidification Potential
EP	= Eutrophication Potential
SSD	= Saturated Surface Dry
PCC	= Portland Composite Cement
HMA	= Hot Mix Asphalt
AASHTO	= American Association of State Highway and Transportation Officials
VMA	= Voids in Mineral Aggregate
VFB	= Voids Filled with Bitumen
VIM	= Voids in the Mixture
HMA	= Hot Mix Asphalt

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan untuk meningkatkan infrastruktur transportasi ditunjukkan oleh meningkatnya populasi perkotaan. Hal ini mencakup pemasangan perkerasan yang tahan lama dan serbaguna seperti perkerasan kaku, fleksibel, dan hibrida kaku-fleksibel, untuk memfasilitasi pergerakan orang dan barang antara daerah pedesaan dan perkotaan (Kartiasih 2019). Pengaspalan sering kali dilakukan melalui pengembangan perkerasan fleksibel, dengan pengisi sebagai komponen penting. Di daerah dengan sumber daya batuan yang melimpah, industri infrastruktur transportasi menunjukkan tradisi penggunaan debu batu (SD) yang dihasilkan dari proses penghancuran batu alam. Dalam konteks ini, metode konvensional telah diterapkan untuk membangun jalan fleksibel. Namun, beberapa daerah masih kekurangan cadangan batu dan pasir asli, yang menyebabkan impor batu dan SD dari sumber eksternal, yang secara signifikan meningkatkan biaya produksi jalan fleksibel (Kemala Dewi and Aris Krisdiyanto 2023).

Di daerah yang tidak memiliki endapan batu sungai atau batu gunung, industri konstruksi jalan dengan tekun menyelidiki metode inovatif untuk mengurangi ketergantungan pada impor debu batu (SD) dari daerah lain. Saat ini, semen (CE) telah berkembang menjadi produk yang diperdagangkan secara luas di industri konstruksi, dengan kehadiran yang meluas ke hampir setiap daerah terpencil (Hamzani et al. 2021). Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penggunaan CE sebagai filler dalam campuran aspal karena mudah diakses dibandingkan dengan (SD) di daerah yang kekurangan cadangan batu sungai dan batu gunung. Penting untuk memahami interaksi antara bahan baku terhadap perilaku campuran aspal padat, yang merupakan komposit dari batu pecah alam getas, bitumen viskoelastis, agregat halus, dan filler yang mengisi rangka agregat kasar dan rongga (Pude, Mangontan, and Alpius 2023). Perkerasan jalan umumnya dibangun untuk menahan beban berulang. Namun, konstruksi jalan fleksibel sering dirancang untuk berfungsi sebagai tempat parkir yang mampu menampung tegangan statis yang diberikan oleh kendaraan yang berhenti untuk durasi tertentu. Selama tahap umur pakai konstruksi jalan, setiap lapisan akan mengalami beban tekan di permukaan dan beban tarik di bagian bawah (Kurakina and Evtiukov 2020). Hal ini menunjukkan perlunya menilai kapasitas untuk menahan gaya tekan statis pada bagian atas lapisan menggunakan campuran aspal panas (HAM) dalam konstruksi jalan fleksibel. Modulus elastisitas HAM merupakan parameter penting dalam perancangan campuran baru dan evaluasi masa pakai kondisi konstruksi yang ada. Umumnya diperoleh melalui uji kompresi dan tarik dinamis pada campuran aspal padat. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini melakukan uji kompresi statis yang dapat memengaruhi lapisan jalan lentur (Badr and Karlaftis 2013). Perilaku tegangan-regangan di bawah pembebanan kompresi statis ini menentukan sifat-sifat mekanis penting seperti modulus elastisitas statis, tegangan kompresi statis puncak,

regangan, tegangan sisa, dan regangan setelah tegangan kompresi statis puncak. Parameter ini berkontribusi pada pengembangan pengetahuan teknik dalam perancangan, konstruksi, dan pemeliharaan campuran aspal untuk perkerasan lentur. Mengenai konstruksi yang sehat, uji Kecepatan Pulsa Ultrasonik (UPV) dianggap sebagai uji non-destruktif yang dapat diandalkan, baik di lapangan maupun di laboratorium, karena pelaksanaannya mudah dan cepat. Biasanya, uji UPV menilai kemantapan pemadatan material padat. Pemadatan material padat yang efektif berkorelasi langsung dengan kualitas bentuk pulsa yang tinggi dan kecepatan rambat yang rendah. Berdasarkan penelitian sebelumnya, waktu tempuh perambatan pulsa yang lebih lama memberikan wawasan tentang konsolidasi material padat yang kurang optimal atau tidak memadai.

Penelitian ini membahas kelangkaan SD di lapangan dengan menggunakan bahan pengisi sebagai variabel konstan pada tingkat 6%. Variabel konstan tersebut berada dalam kisaran yang umum digunakan yaitu 4 hingga 9% dalam produksi HAM. SD dan CE berfungsi sebagai bahan pengisi dalam produksi HAM, terutama terdiri dari 6% campuran dengan kadar aspal berkisar antara 5% hingga 7%, dengan kelipatan 0,5%..

Dari uraian tersebut diatas menjadi latar belakang untuk mengadakan penelitian di laboratorium dan menuliskannya dalam bentuk tulisan dengan judul : **“ANALISA KUAT TEKAN DAN JEJAK CARBON CAMPURAN BERASPAL MENGGUNAKAN ABU BATU DAN SEMEN SEBAGAI FILLER”**

1. Rumusan Masalah

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

- Membandingkan nilai kuat tekan campuran lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan semen
- Berapa besar pengaruh dampak lingkungan yang dihasilkan oleh setiap campuran lapisan AC-BC yang menggunakan abu batu dan semen sebagai filler

2. Tujuan Penelitian

- Untuk menentukan perbandingan nilai kuat tekan campuran beraspal lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan semen
- Memperoleh perbandingan informasi tentang dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap campuran yang menggunakan abu batu dan semen

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 kuat tekan. 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.

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 semen
- Semen yang digunakan adalah semen PCC
- Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kuat tekan
- 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

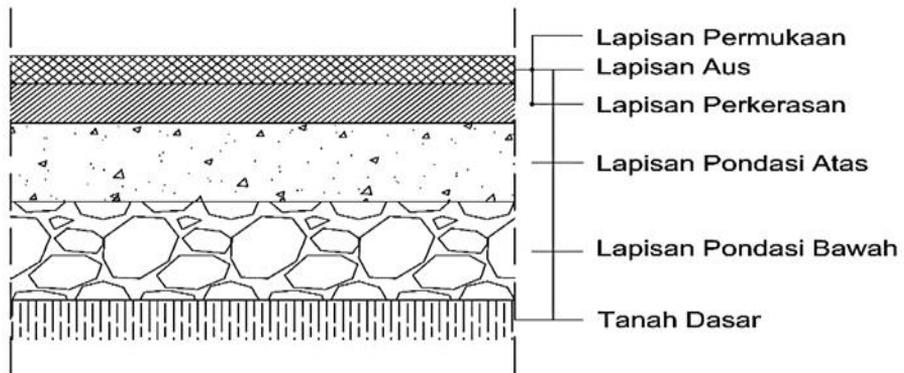
Perkerasan jalan yang telah terbangun pasti akan mengalami kerusakan seiring dengan berjalannya waktu dan beberapa faktor lainnya (Soeseno and Tajudin 2021). Umur rencana untuk konstruksi perkerasan jalan telah ditetapkan, dan selama periode tersebut, kinerja dan kualitas jalan akan mengalami penurunan secara bertahap. Oleh karena itu, kerusakan pada jalan dianggap sebagai suatu hal yang tidak dapat dihindari (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 19/PRT/M/2011 Tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan, 2011). Jalan digunakan sebagai prasarana yang sangat penting dalam sistem transportasi untuk menghubungkan berbagai lokasi demi memenuhi kebutuhan ekonomi, sosial, budaya, serta pertahanan dan keamanan negara. Kondisi jalan yang optimal diperlukan agar kegiatan transportasi dapat terselenggara secara efisien untuk mempercepat mobilitas manusia, barang, atau jasa dengan aman dan nyaman.

Perkembangan konstruksi jalan yang digunakan di seluruh dunia diawali oleh temuan yang dikembangkan oleh Thomas Telford (1757-1834) dan John London Mac Adam (1756-1836). Konstruksi tersebut dilapisi dengan lapisan aus di mana aspal digunakan sebagai bahan pengikatnya, dan teknologi ini kemudian diterapkan secara luas sebagai konstruksi jalan global. Selanjutnya, metode konstruksi perkerasan jalan dengan menggunakan campuran aspal panas (Hot Mix) dikembangkan, dan jenis perkerasan ini dikenal sebagai perkerasan lentur. Saat ini, teknologi perkerasan kaku (rigid pavement) telah dikembangkan sebagai alternatif pengganti perkerasan lentur (flexible pavement). Perkerasan kaku adalah perkerasan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat sehingga memiliki tingkat kekakuan yang relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkerasan lentur,

sehingga lebih sering disebut sebagai perkerasan kaku (Woro Sukarno 2022). Karena kemajuan teknologi dan pembangunan di segala bidang maka jalan mengalami perkembangan sesuai dengan tingkat penggunaan, fungsi, dan klasifikasinya serta segi konstruksinya. Berdasarkan fungsinya jalan dapat dibedakan atas :

1. Jalan Arteri, adalah jalan yang melayani angkutan utama dengan ciri-ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara efisien;
2. Jalan Lokal, adalah jalan yang melayani angkutan setempat dengan ciri-ciri perjalanan jarak dekat, dan jumlah jalan masuk tidak dibatasi.
3. Jalan Kolektor, adalah jalan yang melayani angkutan pengumpulan/pembagian dengan ciri-ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi.

Konstruksi perkerasan lentur terdiri dari :



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

(Sumber, dikutip dari tugas akhir Eko Agus Nugroho Universitas Negeri Semarang)

1.2.2 Agregat

Agregat umumnya didefinisikan sebagai formasi dari kulit bumi yang memiliki sifat keras dan padat, baik dalam bentuk massa berukuran besar maupun fragmen-fragmen kecil. Agregat atau batuan digunakan sebagai komponen utama dalam perkerasan jalan, yang tersusun dari 90 – 95% agregat berdasarkan persentase berat atau 75 – 85% agregat berdasarkan persentase volume. Oleh karena itu, daya dukung, keawetan, dan kualitas perkerasan jalan ditentukan oleh karakteristik agregat serta hasil campuran agregat dengan material lainnya (Induwati et al. 2023).

Menurut American Society for Testing and Materials (ASTM), agregat didefinisikan sebagai bahan yang terbentuk dari mineral padat, baik dalam bentuk massa berukuran besar maupun fragmen-fragmen kecil. Agregat dipahami sebagai material berbutir yang terdiri dari komposisi mineral, seperti pasir, kerikil, batu pecah, atau mineral lainnya, yang dapat berasal dari sumber alami maupun hasil

pengolahan. Bahan ini digunakan sebagai komponen utama dalam konstruksi jalan (Akbar, Mukhlis, and Muhibuddin 2021).

Kemampuan perkerasan jalan dalam memikul beban lalu lintas dan daya tahannya terhadap cuaca ditentukan oleh sifat-sifat agregat. Kualitas agregat sebagai bahan utama perkerasan jalan dipengaruhi oleh karakteristik tersebut, sehingga pemeriksaan terhadap sifat-sifat fisik material ini perlu dilakukan. Dalam proses ini, aspek-aspek seperti gradasi, kebersihan, kekerasan dan ketahanan agregat, bentuk butir, tekstur permukaan, porositas, kemampuan menyerap air, berat jenis, serta daya pelekatan dengan aspal harus dievaluasi.

1.2.2.1 Klasifikasi Agregat

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

1. Agregat Kasar
Agregat kasar didefinisikan sebagai agregat yang tertahan pada saringan No.8. Agregat yang digunakan harus berupa batu pecah atau kerikil dalam kondisi kering dan bersih dari lempung, kotoran, bahan organik, serta bahan-bahan lain yang tidak diinginkan, serta harus mendekati gradasi yang diharapkan.
2. Agregat Halus
Agregat halus didefinisikan sebagai material yang pada dasarnya lolos dari saringan No. 8 namun tertahan pada saringan No. 200. Agregat halus ini dapat berupa pasir, batu pecah, atau kombinasi dari keduanya. Fungsi utama dari agregat halus adalah untuk meningkatkan kuat tekan dan mengurangi deformasi permanen pada campuran melalui mekanisme interlocking dan gesekan antar partikel.

1.2.2.2 Gradasi

Seluruh spesifikasi perkerasan mensyaratkan bahwa ukuran partikel agregat harus berada dalam rentang tertentu, dan proporsi untuk setiap ukuran partikel perlu ditentukan. Distribusi dan variasi ukuran butir agregat ini dikenal sebagai gradasi agregat. Gradasi tersebut dapat ditentukan melalui analisis saringan, di mana contoh agregat diuji untuk memastikan lolos pada saringan yang sesuai. (Farida and Noer Hakim 2021). Gambar 2 memperlihatkan berbagai macam gradasi dalam campuran aspal.

Pada Tabel 1 disajikan spesifikasi gradasi campuran AC-BC. Gradasi agregat dinyatakan dalam persentase berat dari setiap contoh agregat yang lolos pada saringan tertentu, dan penentuan dilakukan dengan menimbang agregat yang lolos atau tertahan pada setiap saringan. Menurut Silvia (1990), gradasi agregat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu gradasi seragam (uniform graded), gradasi rapat (dense graded), dan gradasi senjang (gap graded).

1. Gradasi Seragam (Uniform Graded)

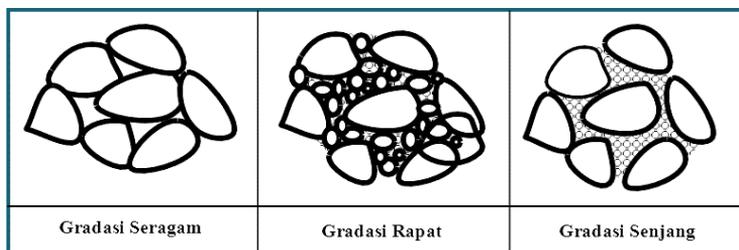
Gradasi seragam (uniform graded) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama, gradasi seragam disebut juga gradasi terbuka (open graded) karena hanya mengandung sedikit agregat halus sehingga terdapat banyak rongga/ruang kosong antar agregat. Campuran agregat yang dibuat dengan gradasi ini memiliki permeabilitas tinggi, stabilitas rendah dan memiliki berat isi yang kecil.

2. Gradasi Rapat (Dense Graded)

Gradasi rapat (dense graded) adalah gradasi agregat, dimana terdapat butiran dari agregat kasar sampai halus sehingga disebut juga gradasi menerus atau gradasi baik (well graded). Campuran dengan gradasi ini memiliki stabilitas yang tinggi, agak kedap air .

3. Gradasi Senjang (Gap Graded)

Gradasi senjang (gap graded) adalah gradasi agregat dimana ukuran agregat yang ada tidak lengkap atau ada fraksi agregat yang tidak ada atau jumlahnya sedikit sekali



Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat (Sumber : Binamarga 2010 Rev.3)

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

1.2.3 Bahan Pengisi (*Filler*)

Filler didefinisikan sebagai material yang lolos pada saringan No.200 (0,075 mm) dan mencakup kapur hidrat, abu terbang, semen Portland, serta abu batu. Filler digunakan untuk mengurangi sensitivitas campuran terhadap perubahan suhu dan mengurangi jumlah rongga udara di dalam campuran (Bethary, Intari, dan Asyiah 2022). Namun demikian, jumlah filler harus dibatasi dalam batas yang optimal. Jika kadar filler terlalu tinggi, campuran akan cenderung menjadi getas dan mudah retak akibat beban lalu lintas. Sebaliknya, jika kadar filler terlalu rendah, campuran berisiko menjadi lembek pada suhu yang relatif tinggi (Telap dan Hutabarat 2021). Jumlah filler yang ideal ditentukan berada di kisaran 0,6 hingga 1,2, yang merupakan rasio antara persentase filler dengan persentase kadar aspal dalam campuran, dikenal sebagai Dust Proportion (Dony Triyatno, Yosef Cahyo, Ahmad Ridwan 2020).

Filler dalam campuran aspal diterapkan melalui dua cara: pertama, gradasi pasir dimodifikasi dengan menggunakan filler untuk meningkatkan kepadatan campuran melalui peningkatan jumlah titik kontak antar partikel. Dengan demikian, jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi rongga yang tersisa dalam campuran dapat dikurangi. Kedua, kinerja campuran dipengaruhi oleh filler dengan mempertimbangkan proporsi yang tepat antara agregat halus, filler, dan aspal dalam mortar. Sifat-sifat mortar tersebut ditentukan oleh karakteristik pasir asli, jumlah filler dalam campuran aspal, serta jenis bahan pengikat yang digunakan. Menurut Sukirman (2003), bahan pengisi (filler) juga harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu.

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

1.2.4 Spesifikasi Bahan Pengikat

Aspal atau bitumen didefinisikan sebagai material berwarna hitam kecoklatan yang memiliki sifat termoplastik, yang berarti material ini dapat mencair ketika dipanaskan hingga suhu tertentu dan mengeras kembali ketika suhunya

menurun (Manual Perkerasan Campuran Beraspal Panas, Buku 1, Petunjuk Umum). Dalam konstruksi perkerasan lentur, aspal digunakan sebagai salah satu komponen minor dengan proporsi umumnya berkisar antara 4 - 10% berdasarkan berat atau 10 - 15% berdasarkan volume, meskipun harganya relatif mahal. Aspal yang digunakan saat ini umumnya diperoleh melalui proses distilasi minyak bumi, namun aspal alam dari Pulau Buton juga semakin sering dimanfaatkan.

Beton aspal dibuat melalui proses pencampuran agregat dan aspal, baik dengan atau tanpa bahan tambahan. Material-material tersebut dicampur di instalasi pencampuran pada suhu tertentu, kemudian diangkut ke lokasi, dan dihamparkan serta dipadatkan. Suhu pencampuran ditentukan sesuai dengan jenis aspal yang digunakan. Jika semen aspal digunakan, suhu pencampuran umumnya berada antara 145°C hingga 155°C, sehingga campuran ini disebut sebagai beton aspal campuran panas atau hotmix. Berdasarkan gradasinya, campuran aspal panas ini dibedakan menjadi tiga jenis: campuran dengan gradasi rapat, gradasi senjang, dan gradasi terbuka. Ketebalan minimum penghamparan setiap jenis campuran sangat bergantung pada ukuran maksimum agregat yang digunakan. Ketebalan padat campuran aspal harus lebih dari dua kali ukuran butir agregat maksimum yang digunakan. Beberapa jenis beton aspal campuran panas telah diterapkan, namun dalam penelitian ini, jenis yang ditinjau adalah AC-BC (Asphalt Concrete-Bearing Course). Salah satu produk campuran aspal panas yang sering digunakan oleh Departemen Pekerjaan Umum adalah AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course), atau dikenal sebagai Lapis Aus Aspal Beton. AC-BC merupakan satu dari tiga jenis lapis aspal beton, yaitu AC-WC, AC-BC, dan AC-Base. Ketiga jenis laston ini merupakan hasil spesifikasi campuran aspal yang telah disempurnakan oleh Bina Marga bersama dengan Pusat Litbang Jalan, menggunakan pendekatan kepadatan mutlak.

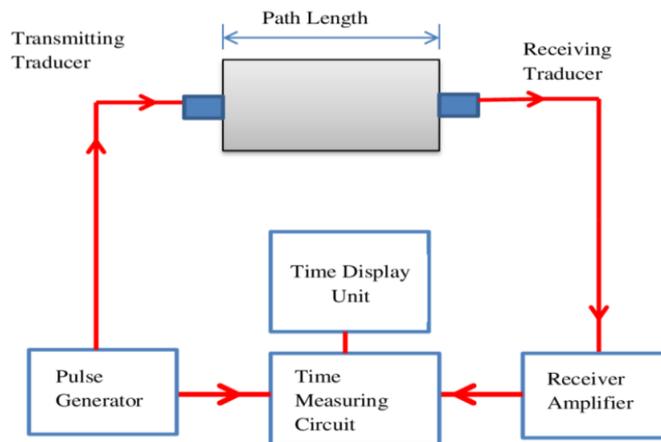
Lapis aspal beton (laston), yang dikenal sebagai AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course), diterapkan sebagai bagian dari lapisan permukaan yang ditempatkan antara lapis pondasi atas (Base Course) dan lapis aus (Wearing Course). Lapisan ini menggunakan agregat dengan gradasi rapat atau menerus dan umumnya diterapkan pada jalan yang menahan beban lalu lintas berat. AC-BC berfungsi sebagai lapisan antara dalam struktur perkerasan untuk mencegah infiltrasi air dari permukaan ke lapisan pondasi. Campuran aspal panas AC-BC memiliki ukuran agregat maksimum sebesar 25,4 mm, dengan ketebalan minimum lapisan padat sebesar 6,0 cm. Toleransi ketebalan pada setiap lapisan campuran aspal tidak boleh melebihi 4,0 mm (Kewa, Handayani, dan Anis 2024). Hal ini membuat campuran AC-BC sangat sensitif terhadap variasi dalam proporsi campurannya.

1.2.5 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Non-Destructive Testing (NDT) dianggap menarik karena memungkinkan kondisi struktur dianalisis tanpa adanya kerusakan pada objek uji (Sarsam, 2021). NDT didefinisikan sebagai metode yang diaplikasikan untuk pengujian proyek, material, atau sistem tanpa mempengaruhi fungsi objek uji. Keunggulan utama dari

metode ini adalah kemampuannya untuk diaplikasikan tanpa mengakibatkan kerusakan pada objek yang diuji (Chen et al., 2022). Metode ini juga digunakan untuk memeriksa variasi dalam struktur, mendeteksi retakan, deformasi, dan aspek lainnya (Zhang et al., 2019).

Salah satu alat yang digunakan dalam penerapan metode NDT adalah perangkat yang memanfaatkan gelombang ultrasonik. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) digunakan sebagai metode pengujian NDT pada campuran aspal dengan mengukur kecepatan gelombang ultrasonik untuk menganalisis karakteristik campuran tersebut (Shi et al., 2018). Melalui penerapan UPV, campuran aspal yang mengalami pemadatan yang kurang optimal dapat diidentifikasi, yang terlihat dari penurunan kecepatan gelombang ultrasonik. Kekuatan tekan aspal diukur melalui perubahan kecepatan gelombang yang terdeteksi selama pengujian UPV. Penurunan kecepatan gelombang menunjukkan penurunan kekuatan tekan aspal, sementara peningkatan kecepatan menunjukkan peningkatan kekuatan tekan. Pengujian UPV dilakukan menggunakan tiga pendekatan: langsung (direct), tidak langsung (indirect), dan semi langsung (semi-direct). Ilustrasi pelaksanaan pengujian UPV dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. Skema Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity

Prinsip penggunaan metode Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) didasarkan pada kecepatan propagasi gelombang tekan melalui suatu material, yang bergantung pada sifat elastisitas dan densitas material tersebut. Berdasarkan ASTM C597-02 (2003), cara kerja UPV melibatkan pengiriman gelombang oleh transduser pengirim (transmitter), yang kemudian ditangkap oleh transduser penerima (receiver) yang ditempatkan pada jarak L dari transmitter. Waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk menempuh jarak tersebut (Δt) dicatat oleh alat Ultrasonic Pulse Velocity. Dengan demikian, kecepatan gelombang dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$v = L / (\Delta \tau) \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

V : kecepatan perambat

L : panjang lintasan gelombang (m);

Δt : travel time (s)

Kecepatan gelombang pada aspal umumnya diukur dalam rentang 70 hingga 85 μs untuk panjang lintasan 300 mm. Oleh karena itu, peralatan yang digunakan harus memiliki kemampuan untuk mengukur waktu tempuh (travel time) yang sangat singkat dengan tingkat akurasi yang tinggi. Panjang lintasan juga harus diukur dengan sangat teliti, mengingat metode UPV adalah teknik propagasi gelombang, dan berbagai sumber gangguan yang dapat menyebabkan penurunan intensitas gelombang selama pengujian, seperti alat berat (misalnya jack hammer), perlu dihilangkan.

Pengiriman dan penerimaan gelombang akan berfungsi optimal jika transduser terhubung sepenuhnya dengan objek yang diuji. Jika terdapat kantong udara yang terperangkap, hal ini dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran waktu tempuh gelombang. Untuk mencegah kesalahan tersebut, couplant digunakan. Couplant yang umum tersedia meliputi petroleum jelly, pelumas, sabun cair, dan pasta kaolin-gliserol. Couplant harus diaplikasikan setipis mungkin; namun, jika permukaan beton sangat kasar, couplant yang lebih tebal seperti pelumas dapat digunakan. Sebelum pengujian UPV dilaksanakan, permukaan harus diratakan. Selama pengujian, transduser diberi tekanan konstan, dan pengukuran diulang pada lokasi yang sama hingga diperoleh nilai waktu tempuh minimum. Beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik pada campuran aspal juga telah diidentifikasi.

- 1) Jarak antara transmitter dan receiver,
- 2) Kondisi permukaan benda uji, dan
- 3) Temperatur benda uji.

1.2.5.1 Workability

Kemudahan pelaksanaan (workability) didefinisikan sebagai tingkat kemudahan suatu campuran untuk dihamparkan dan dipadatkan. Faktor-faktor yang memengaruhi kemudahan pelaksanaan (workability) dipertimbangkan sebagai berikut:

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

1.2.6 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 (Void in Mix) didefinisikan sebagai volume pori yang tersisa setelah campuran beton aspal mengalami proses pemadatan. VIM diperlukan untuk memungkinkan pergeseran agregat akibat pemadatan tambahan yang disebabkan oleh beban lalu lintas berulang atau sebagai ruang bagi aspal ketika melunak akibat peningkatan suhu. Jika nilai VIM terlalu tinggi, beton aspal yang padat akan kehilangan kepadatannya, sehingga mempercepat proses oksidasi aspal, mempercepat penuaan, dan menurunkan daya tahan beton aspal. Sebaliknya, jika nilai VIM terlalu rendah, perkerasan dapat mengalami bleeding saat terjadi peningkatan suhu.
- VMA (Void in Mineral Aggregate) didefinisikan sebagai volume pori yang terdapat di dalam beton aspal padat setelah lapisan aspal dihilangkan sepenuhnya. Volume pori dalam butiran agregat tidak dimasukkan dalam perhitungan VMA. Nilai VMA akan meningkat jika lapisan aspal diperluas atau jika agregat yang digunakan memiliki gradasi terbuka.
- VFB adalah volume pori beton aspal padat yang terisi oleh aspal, atau volume film/selimit aspal.

1.2.7 Jenis Beton Aspal

Jenis beton aspal yang ada di Indonesia saat ini adalah :

1. Laston (Lapisan Aspal Beton) adalah jenis beton aspal dengan gradasi menerus yang umum digunakan pada jalan-jalan yang menahan beban lalu lintas berat. Laston, juga dikenal sebagai Asphalt Concrete (AC), memiliki stabilitas sebagai karakteristik paling penting dalam campurannya. Tebal nominal minimum Laston berkisar antara 4-6 cm, tergantung pada fungsinya. Terdapat tiga jenis campuran Laston, yaitu:

- Laston sebagai lapis aus, dikenal dengan nama AC-WC (Asphalt Concrete- Wearing Course). Tebal nominal minimum AC-WC adalah 4 cm.
- Laston sebagai lapis pengikat, dikenal dengan nama AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course). Tebal nominal minimum AC-BC adalah 5 cm.
- Laston sebagai lapis pondasi, dikenal dengan nama AC-Base (Asphalt Concrete-Base). Tebal minimum AC-Base adalah 6 cm.

2. Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton) adalah jenis beton aspal dengan gradasi senjang yang dikenal juga sebagai HRS (Hot Rolled Sheet). Karakteristik utama beton aspal pada campuran ini adalah durabilitas dan fleksibilitas. Berdasarkan fungsinya, Lataston dibedakan menjadi dua jenis campuran, yaitu:

- 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) adalah jenis beton aspal yang dirancang untuk jalan dengan lalu lintas ringan, terutama di area di mana agregat kasar sulit atau tidak tersedia. Lapisan ini memiliki ketahanan alur (rutting) yang rendah, sehingga tidak direkomendasikan untuk digunakan pada jalan dengan lalu lintas berat atau di area tanjakan. Latasir juga dikenal sebagai SS (Sand Sheet) atau HRSS (Hot Rolled Sand Sheet). Berdasarkan gradasi agregatnya, campuran Latasir dapat dibedakan menjadi beberapa jenis:

- 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 adalah beton aspal yang diterapkan sebagai lapisan untuk meratakan dan membentuk penampang melintang pada permukaan jalan yang sudah ada. Semua jenis campuran beton aspal dapat digunakan untuk tujuan ini. Namun, untuk membedakan dengan campuran yang digunakan pada lapisan perkerasan jalan baru, huruf "L" ditambahkan pada setiap jenis campuran beton aspal tersebut. Contohnya, campuran yang digunakan adalah AC-WC (L), AC-BC (L), dan AC-Base (L).

5. SMA (Split Mastic Asphalt) adalah jenis beton aspal dengan gradasi terbuka dan lapisan aspal yang tebal. Bahan ini dilengkapi dengan tambahan fiber selulosa yang berfungsi untuk menstabilkan kadar aspal yang tinggi. Lapisan ini terutama diaplikasikan pada jalan-jalan yang menahan beban lalu lintas berat. Terdapat tiga 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 beton aspal yang menggunakan aspal dengan tingkat penetrasi rendah, yaitu 30/40. Lapisan ini terutama diterapkan pada jalan-jalan yang menanggung beban lalu lintas berat..

1.2.8 Rancangan Campuran Beton Aspal

Campuran beton aspal didefinisikan sebagai kombinasi antara agregat dan aspal, dengan atau tanpa bahan tambahan. Agregat tersebut umumnya diperoleh dari lokasi yang terdekat dengan area penggunaannya. Di Indonesia, metode

rancangan campuran yang paling umum digunakan saat ini adalah metode rancangan berdasarkan pengujian empiris, dengan menggunakan alat Marshall. Metode ini terdiri dari empat tahap yang harus dilalui dalam proses perancangannya.

1. Sifat agregat dan aspal yang akan digunakan sebagai bahan dasar campuran diuji terlebih dahulu untuk memastikan kualitasnya.
2. Campuran dirancang di laboratorium untuk menghasilkan rumus campuran rancangan yang dikenal sebagai DMF (Design Mix Formula). Hasil rancangan campuran tersebut kemudian dikalibrasi dengan instalasi pencampuran yang akan digunakan.
3. Berdasarkan hasil dari kedua tahap sebelumnya, percobaan produksi dilakukan di instalasi pencampuran, yang diikuti dengan proses penghamparan dan pemadatan campuran percobaan tersebut.

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.		1.0	
	Maks		1.4	
Rongga dalam campuran (%)	Min.		3.0	
	Maks		5.0	
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)

1.2.9 Semen

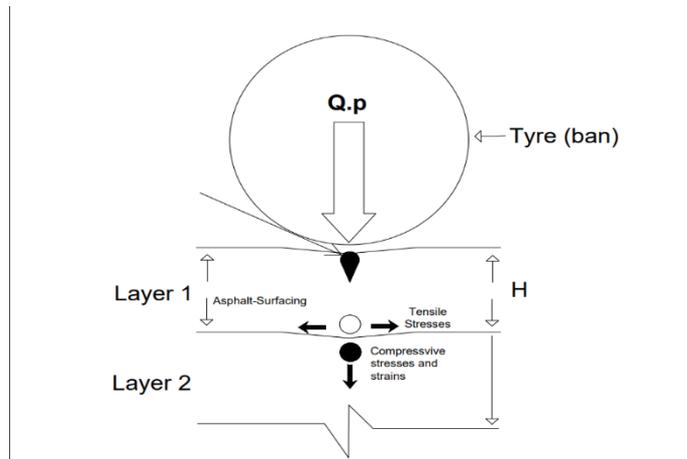
Semen merupakan bahan hidrolis yang, ketika dicampur dengan air, berubah menjadi material yang memiliki sifat perekat. Penggunaannya mencakup pembuatan beton, adukan mortar, plesteran, bahan penambal, adukan encer (grout), dan lain sebagainya. Di pasaran, tersedia beberapa jenis dan tipe semen yang umumnya diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI), seperti SNI 15-2049-2004 yang mengatur tentang semen portland (PCC = Portland Composite Cement) (Susanto, Djauhari, dan Olivia, 2019).

Dalam proses pembuatan aspal di AMP (Asphalt Mixing Plant), abu batu sering digunakan sebagai bahan pengisi. Semen portland adalah salah satu material yang dapat digunakan untuk berbagai jenis konstruksi bangunan dan juga berpotensi sebagai alternatif material dalam campuran aspal (Ghilman dan Walujodjati, 2023). Material ini merupakan bahan non-plastis yang telah disetujui oleh Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah sebagai filler dalam campuran beraspal panas, dengan kemungkinan bahwa persyaratan spesifikasi material tersebut dapat dipenuhi. Selain itu, semen portland mudah ditemukan di berbagai tempat penjualan material, sehingga lebih mudah diakses dibandingkan dengan material lainnya.

1.2.10 Uji kuat tekan campuran aspal

Analisis didasarkan pada pendekatan desain mekanistik (Croney dkk, 1998 dan Huang HY, 1993), dan elastis sistem perkerasan dua lapisan linear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Semua lapisan yang terletak di bawah permukaan aspal (top-layer) yang secara teoritis ditandai dengan satu nilai komposit modulus elastisitas akibatnya, kriteria desain perkerasan jalan dapat dibahas yaitu distribusi tegangan-regangan tiga dimensi lebih tinggi dari lapisan aspal-permukaan. Tegangan tekan horizontal dan regangan yang terjadi di zona bawah ($[h - 1]$ mm) dari lapisan aspal permukaan yang merupakan parameter kerusakan pada perkerasan akibat kelelahan dan mengakibatkan terjadinya retak (Soeseno and Tajudin 2021).

Pada Gambar 4 menunjukkan adanya penyederhanaan model dengan asumsi kondisi lalu lintas sebagai pembebanan statis dan karakterisasi pada kondisi linier-elastis isotropik dari bahan itu sendiri. Dalam Gambar 4, Q adalah beban ban dengan satuan kN, p adalah tekanan ban dalam kPa, h adalah ketebalan lapisan aspal permukaan dalam mm.

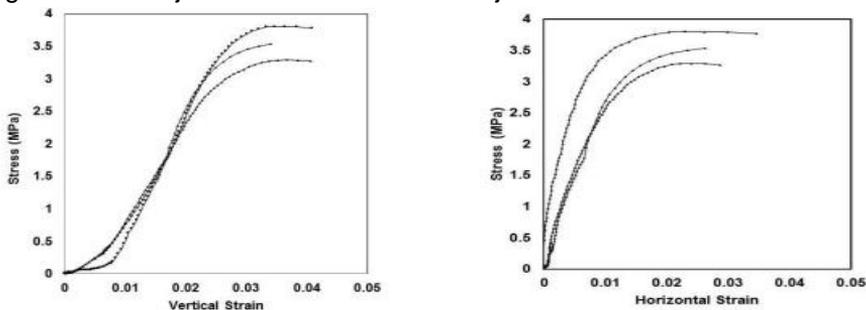


Gambar 4. Skema Pembebanan Pada Lapis Perkerasan Jalan

Kuat Tekan dimaksudkan untuk menentukan karakteristik kuat Tekan dari aspal beton yang dapat dijadikan sebagai indikator dalam melakukan kajian terhadap retak (cracking) yang terjadi pada lapis perkerasan. Perkembangan jumlah beban lalu lintas yang akan diterima oleh jalan mengakibatkan masa layanan dari lapisan perkerasan akan berkurang. Beban tekan dan beban tarik adalah dua pembebanan yang dialami oleh suatu lapisan perkerasan jalan. SNI telah mengeluarkan pedoman dalam melakukan pengujian SNI 03-6758-2002. (Leon, Charles, and Simpson 2016) melakukan penelitian tentang hubungan tegangan regangan beton aspal dalam keadaan tekan dan menggunakan pengujian tekan uniaksial dan triaksial. Mode kegagalan dibandingkan dengan J. Zheng dan T. Huang (2015) dan terdapat kesamaan dari bagian yang awalnya menanjak secara linier yang mencapai puncaknya kemudian menurun dengan kurva nonlinier yang tidak terlalu curam. Juga diketahui bahwa titik luluh (tegangan maksimum) lebih besar pada uji tekan triaksial dibandingkan dengan benda uji yang sama pada uji uniaksial. Penelitian mereka menyimpulkan bahwa benda uji dengan karakteristik berbeda (agregat, upaya pemadatan, persentase aspal, tinggi, jenis pembebanan) semuanya menunjukkan pola umum dalam hubungan tegangan-regangan yang mirip dengan beton.

Kurva tegangan-regangan dapat digambarkan memiliki bagian cabang yang linier dengan perilaku elastis yang diwakili oleh hukum Hooke yang bertransisi dengan mulus menjadi bagian nonlinier yang ditandai dengan retakan mikro dan oleh karena itu modus kegagalan digambarkan sebagai kegagalan pemisahan atau geser. (Wang et al. 2016) menyelidiki perilaku campuran beton aspal di bawah tekanan triaksial. Mereka mempresentasikan hasil dan mendiskusikan pengujian monotonik kompresi triaksial yang dilakukan pada beton aspal padat dan berpori. Mereka menyimpulkan bahwa kekuatan kegagalan tekan dan kekakuan beton aspal meningkat ketika suhu menurun, laju pembebanan meningkat, dan pengurangan meningkat. Zheng dan Huang (2015) mengembangkan metode triaksial baru untuk mempelajari kriteria kegagalan campuran aspal. Peningkatan tekanan pengekan

(memberikan kekuatan tekan yang lebih kecil) terutama menunjukkan kegagalan geser dan peningkatan lebih lanjut dalam tekanan pengekan mengakibatkan kegagalan reologi. Dibandingkan dengan uji uniaksial, kegagalan dari uji triaksial akan memungkinkan lebih banyak mode kegagalan untuk dianalisis. Hubungan tegangan-regangan dari spesimen yang diuji dalam penelitian Zheng dan Huang (2015) menunjukkan nilai tegangan horizontal yang lebih besar yang memiliki kurva dengan tungkai awalnya menaik yang mendatar setelah kegagalan spesimen (atau setelah keadaan elastis terlampaui). Namun tegangan horizontal yang lebih kecil menunjukkan kurva dengan bagian yang awalnya menaik yang memuncak kemudian mulai turun yang dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah. Karena tegangan horizontal yang diterapkan cenderung nol, maka bagian menurun dari kurva tegangan regangan akan menjadi lebih curam atau lebih jelas.



Gambar 5. Kurva Tegangan dan Regangan

Kuat Tekan dimaksudkan untuk menentukan karakteristik kuat Tekan dari aspal beton yang dapat dijadikan sebagai indikator dalam melakukan kajian terhadap retak (cracking) yang terjadi pada lapis perkerasan. Perkembangan jumlah beban lalu lintas yang akan diterima oleh jalan mengakibatkan masa layanan dari lapisan perkerasan akan berkurang. Beban tekan dan beban tarik adalah dua pembebanan yang dialami oleh suatu lapisan perkerasan jalan. SNI telah mengeluarkan pedoman dalam melakukan pengujian SNI 03-6758-2002.

$$KUAT\ TEKAN = \frac{BEBAN\ VERTIKAL\ MAKSIMUM}{LUAS\ PENAMPANG} \dots\dots\dots(3)$$

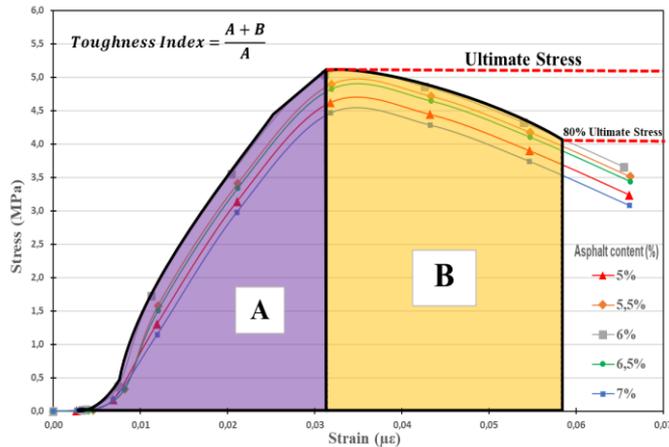


Gambar 6. Universal Testing Mechine

1.2.11 Toughness Index

Dan terdapat pula perhitungan untuk memperoleh toughnes indeks, dengan rumus $TI = \frac{Ad - Ap}{d/dp - 1}$ (doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(177)

Pada umumnya toughness index diperoleh dari hubungan tegangan yang di normalisasi dengan regangan. Parameter TI ditentukan menggunakan kurva tegangan-regangan yang dinormalisasi (Kewa, Handayani, and Anis 2024). Parameter ini merupakan indikator fleksibilitas material. Faktanya, ketangguhan adalah kemampuan suatu material untuk menyerap energi dan berubah bentuk tanpa patah. Gambar 7 menggambarkan kurva Uji Kuat Tekan yang dinormalisasi. Untuk mendapatkan kurva yang dinormalisasi, nilai tegangan yang tercatat dibagi dengan kekuatan tekan benda uji terkait (yaitu nilai tegangan maksimum). Oleh karena itu, kurva tegangan-regangan tak berdimensi diperoleh dengan nilai maksimum 1 pada sumbu vertikal versus nilai regangan nyata pada sumbu horizontal. Indeks ketangguhan Tekan (TI) tanpa dimensi didefinisikan sebagai $TI = (A+B)/B$.



Gambar 7. Grafik Toughness Index

1.2.12 Parameter Dampak Lingkungan

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

Parameter yang umum digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan antara lain Global Warming Potential (GWP), Abiotic Depletion Potential (ADP), Acidification Potential (AP), dan Eutrophication Potential (EP). GWP dikaitkan dengan seluruh gas rumah kaca, yang berasal dari emisi CO₂ dan metana, yang dapat memicu peningkatan suhu global serta berdampak negatif pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material (Elmansouri, Alossta, and Badi 2022). Perubahan iklim dihasilkan dari fluktuasi suhu global sebagai efek rumah kaca. Gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tertahan di atmosfer bumi dan menghalangi pelepasan panas bumi yang diterima dari matahari. Peningkatan suhu global ini dapat menyebabkan gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit (Torres-Machi et al. 2017). Kesepakatan ilmiah yang substansial menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki dampak signifikan terhadap iklim.

Kategori ADP digunakan untuk menggambarkan pengurangan jumlah bahan baku global yang tidak dapat diperbarui. Dampak ini terkait dengan ekstraksi material abiotik, seperti agregat, bijih logam, mineral, dan tanah. Ekstraksi material tersebut mengindikasikan bahwa kapasitas alami bumi terlampaui dan sumber daya tidak tersedia bagi generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan unsur yang dipertimbangkan.

Dampak AP disebabkan oleh deposisi polutan 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 atmosfer, membentuk hujan asam.

Asam sebagai zat kimia menghasilkan ion hidrogen (H+) ketika bertemu air, yang sangat reaktif dan menyebabkan zat lain mengubah komposisi serta sifat fisiknya. Deposisi asam dapat merusak ekosistem dan mengikis bahan.

Kategori EP mencakup dampak dari tingginya kadar makronutrien (fosfor dan nitrogen) di lingkungan, yang memicu produksi biomassa tinggi di ekosistem akuatik dan darat. Contohnya, polutan udara dan air limbah. Nitrat dan fosfat penting untuk kehidupan, tetapi peningkatan konsentrasinya dalam air memicu eutrofikasi (over-nutrifikasi), yang menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi oksigen dalam air, dan merusak ekosistem (Czerniak, Grajewski, and Kurowska 2021). Sumbernya termasuk pupuk dan emisi nitrogen oksida (NOx) dari pembakaran bahan bakar fosil. Estimasi nilai dari parameter dampak lingkungan telah dilakukan oleh Wałach et al. (2019).digunakan persamaan 1 :

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

Pekerjaan konstruksi yang diduga memberikan dampak lingkungan terbesar adalah pekerjaan konstruksi jalan, khususnya dengan metode campuran panas. Energi yang dibutuhkan pada pengolahan campuran aspal panas dianggap lebih besar karena mensyaratkan material yang digunakan berada pada suhu tinggi (>100°C). Energi tersebut terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Seperti yang diuraikan oleh Fadholah, Setyawan, dan Suryoto (2017), lima tahap penggunaan material perkerasan jalan telah diidentifikasi, yaitu ekstraksi, manufaktur, konstruksi, pemeliharaan dan perawatan, serta daur ulang.

Kajian analisis terhadap estimasi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂) pada penelitian ini dibatasi pada kegiatan yang terkait langsung dengan konstruksi perkerasan jalan, yaitu pada tahap produksi campuran, transportasi (pengangkutan campuran), serta penghamparan dan pemadatan (Fadholah, Setyawan, dan Suryoto 2017).

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur ilmiah yang terpercaya. Nilai-nilai ADP, GWP, AP, dan EP untuk material agregat kasar, agregat halus, abu batu, CE, dan aspal yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA

Sources	Material	ADP	GWP	AP	EP
		(kgSbeq)	(kgCO ₂ eq)	(kgSO ₂ eq)	(kgPO ₄ eq)
(Ohemeng et al. 2024)	Cement	3.73.E-03	8.85.E-01	2.57.E-03	3.35.E-04
(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
Braga, Ohemeng et al.	Fine Agregat	3.34.E-10	9.87.E-03	4.58.E-05	1.08.E-05

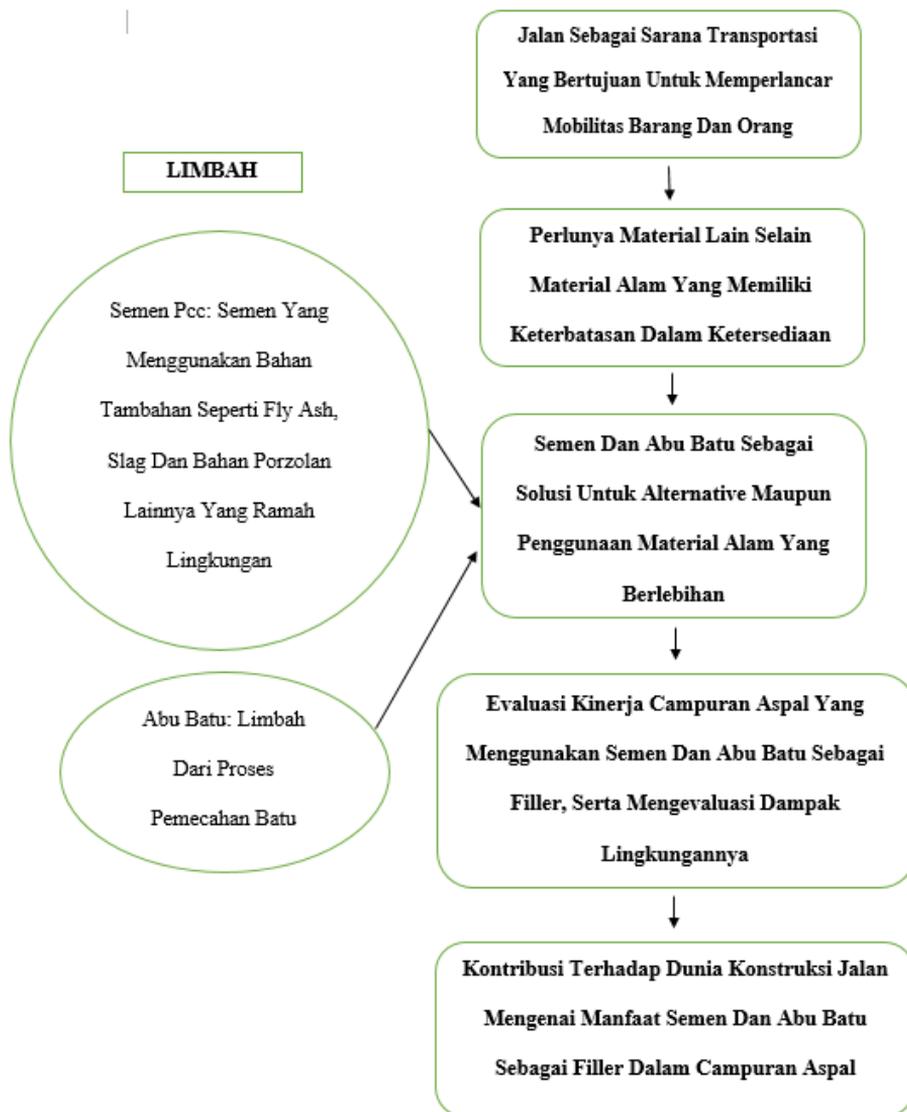
1.2.13 Desain Konseptual

Konsep penelitian ini difokuskan pada upaya meningkatkan kualitas dan keberlanjutan infrastruktur jalan di Indonesia melalui penggunaan bahan daur ulang dalam campuran perkerasan aspal, khususnya pada lapisan AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course). Mengingat pentingnya jalan sebagai prasarana transportasi untuk memperlancar mobilitas barang dan orang, tantangan dalam menyediakan bahan konstruksi yang ramah lingkungan dan tahan lama disoroti. Salah satu solusi yang diusulkan adalah penggunaan abu batu dan semen sebagai filler pada campuran aspal, yang bertujuan untuk meningkatkan kuat tekan campuran sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan inovasi dalam teknologi konstruksi jalan yang memanfaatkan limbah industri seperti semen, yang merupakan sisa pembakaran batu bara. Potensi semen untuk digunakan sebagai bahan pengganti filler agregat alam dalam campuran aspal diidentifikasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kuat tekan campuran aspal dapat ditingkatkan dengan menggunakan semen, meskipun dampak lingkungan dari penggunaannya juga perlu diperhatikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perbandingan nilai kuat tekan dan dampak lingkungan dari penggunaan abu batu dan semen dalam campuran AC-BC.

Masalah utama yang dihadapi dalam penggunaan semen dan abu batu, yaitu potensi dampaknya terhadap kuat tekan jalan dan lingkungan, akan diukur melalui kuat tekan Test untuk menentukan seberapa besar pengaruh kedua filler ini terhadap kekuatan dan daya tahan jalan. Selain itu, dampak lingkungan, termasuk emisi CO₂ yang dihasilkan dari campuran aspal yang berbeda, akan dievaluasi. Dengan membandingkan hasil-hasil ini, solusi optimal yang tidak hanya meningkatkan kualitas jalan tetapi juga lebih ramah lingkungan diharapkan dapat ditemukan.

Akhirnya, tujuan jangka panjang penelitian ini adalah untuk memberikan kontribusi pada dunia konstruksi jalan raya di Indonesia dengan menyediakan data empiris mengenai manfaat penggunaan limbah industri sebagai bahan konstruksi. Jika hasil yang positif dapat diperoleh, penggunaan semen dan abu batu sebagai filler dalam campuran aspal diharapkan dapat diterapkan secara lebih luas, membantu mengurangi ketergantungan pada bahan alam dan mengurangi emisi karbon dioksida, serta mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.



Gambar 8. Kerangka Konseptual

1.2.14 Penelitian Terdahulu

Gaus Abdul, et al. (2015), melakukan penelitian mengenai Kuat Tekan Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) Menggunakan Buton Granular Asphalt . Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan tegangan-regangan campuran aspal beton dengan menggunakan aspal butiran Buton (BGA) sebagai pengganti sebagian aspal minyak bumi pada produksi campuran aspal beton bearing course (AC-BC). Uji eksperimental menunjukkan bahwa pola kurva tegangan-regangan vertikal dan kurva tegangan-regangan horizontal serupa untuk semua campuran. Penerapan BGA sebagai pengganti sebagian aspal minyak bumi pada campuran AC-BC meningkatkan kuat tekan dan modulus elastisitas dibandingkan

dengan campuran AC-BC tanpa BGA. Tidak ada perbedaan signifikan dalam rasio Poisson untuk semua campuran yang diamati.

Leon Lee, et al. (2016), melakukan penelitian Perilaku tegangan-regangan beton aspal dalam keadaan tekan . Penelitian ini menyajikan evaluasi modus kegagalan beton aspal dan menggambarkan kurva tegangan-regangan yang mengatur beton aspal melampaui batas elastisitas pada cabang menaik. Hubungan tegangan-regangan identik dengan hubungan tegangan tekan beton semen. Bentuk umum dari kurva perilaku diusulkan untuk mewakili kerusakan elastis dan plastis pada beton aspal. Perilaku nonlinier beton aspal yang melampaui batas elastis linier dapat dilihat dengan mata telanjang. Parameter yang menentukan bentuk ini signifikan secara fisik dan ditentukan secara eksperimental. Parameter kurva tegangan-regangan merupakan karakteristik dasar suatu benda padat yang mengalami pembebanan jangka pendek. Percobaan menggunakan pembebanan tekan statik jangka pendek pada benda uji beton aspal berbentuk silinder, yang berbeda jenis campurannya (Bergradasi padat, Matriks Batu), kandungan rongga udara, massa jenis, ukuran benda uji dan suhu. Terdapat perubahan signifikan pada tegangan puncak dan regangan antar jenis campuran beton aspal. Kekuatan yang berbeda dapat dicapai antara jenis beton aspal serta sifat-sifat penyusun campurannya. Persamaan yang diusulkan sesuai dengan berbagai kondisi pengujian dan jenis beton aspal untuk cabang naik dan turun dari diagram tegangan-regangan dalam kompresi. Penyelidikan memperoleh parameter (tegangan luluh dan modulus elastisitas) untuk berbagai jenis campuran beton aspal yang dapat digunakan dalam program FE seperti Abaqus yang menggunakan data elastis dan plastis untuk memodelkan perilaku berbagai jenis campuran bahan beton aspal yang digunakan. suatu struktur perkerasan.

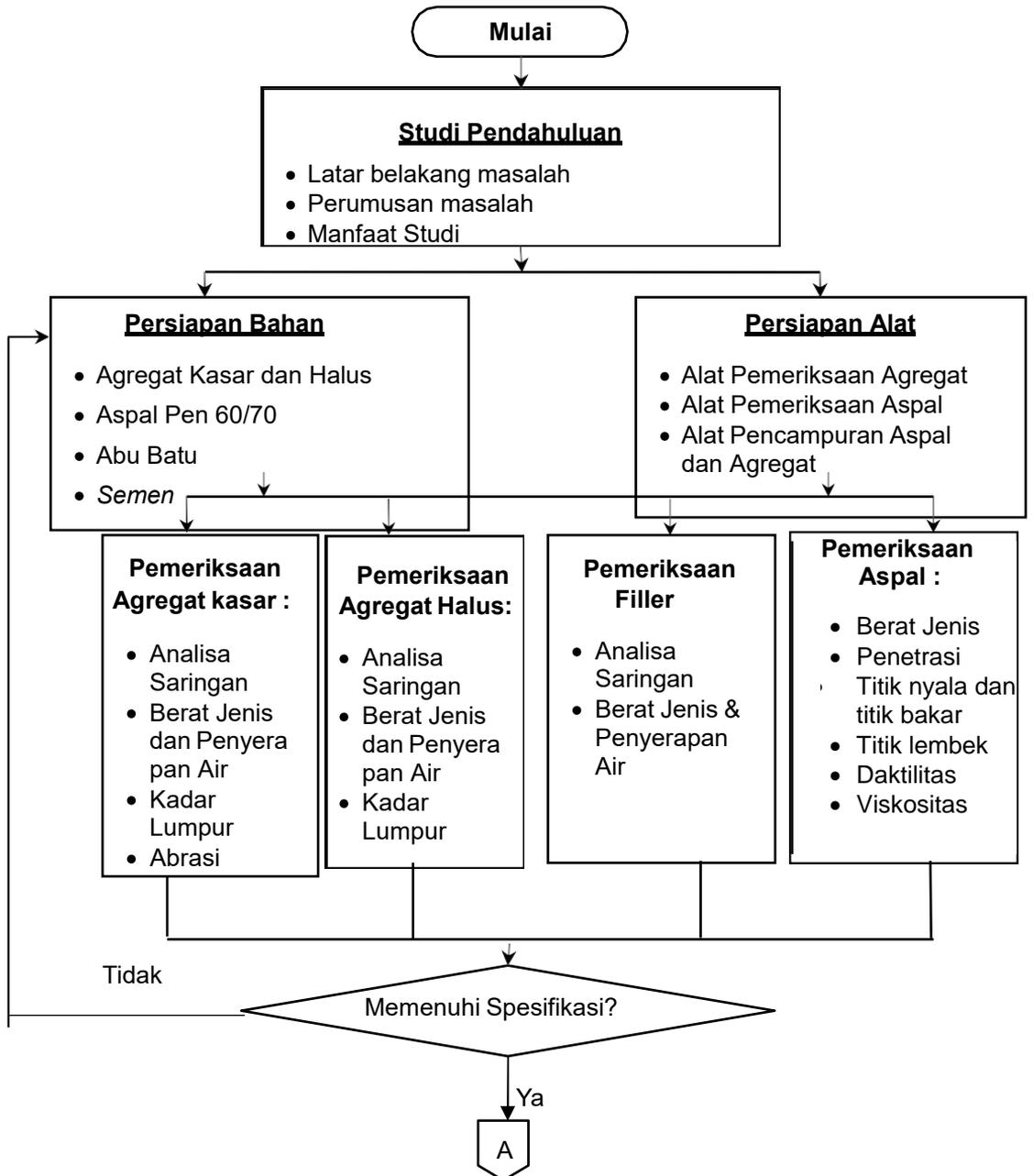
Thives, Liseane et al. (2015), Melakukan penelitian mengenai emisi karbon pada konstruksi jalan raya dengan membandingkan emisi karbon pada proses pencampuran antara beton semen Portland dan campuran aspal panas. Pada penelitian ini menjelaskan mengenai bahan bakar yang digunakan selama memanaskan dan 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

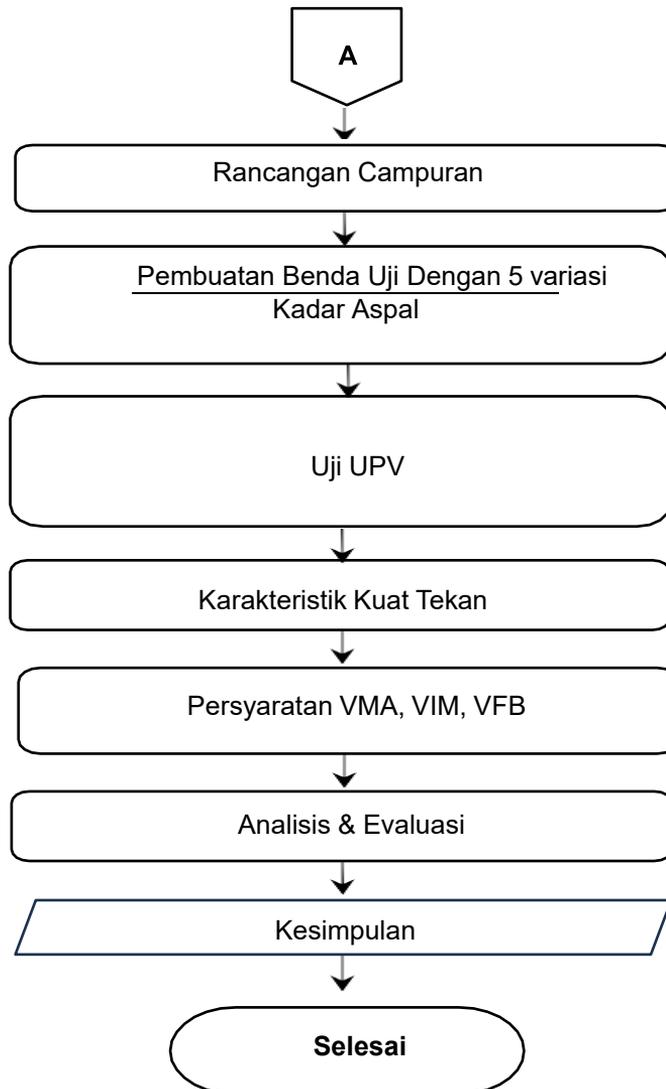
Peng, Bo et al. (2015), Melakukan penelitian mengenai karbon dioksida pada industry konstruksi jalan raya. Pada penelitian ini menjelaskan mengenai perubahan iklim global dan pengurangan emisi karbon yang telah menjadi isu penting dalam industry konstruksi jalan raya yang hingga kini masih belum dapat ditetapkan, oleh karena itu pada penelitian ini bertujuan untuk menerapkan model konstruksi jalan raya yang rendah karbon dioksida Dimana penelitian ini membagi antara konstruksi

perkerasan aspal menjadi Produksi campuran aspal dan konstruksi campuran aspal, berdasarkan analisis proses produksi aspal meliputi penumpukan agregat, penyediaan agregat, pemanasan aspal, pencampuran aspal dan sebagainya sedangkan untuk konstruksi campuran aspal meliputi pengerasan campuran, pengangkutan, pemadatan aspal dan tahapan lainnya. Pada penelitian ini menganalisis 1 ton campuran sebagai objek pembandingan Dimana hasil penelitian pemanasan agregat, pemanasan aspal dan proses pencampuran masing-masing menyumbang 67%, 14% dan 12% dari total emisi karbon..

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian





Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

2.2 Lokasi Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Batu Pecah 2-3, 1 - 2 dan Batu Pecah 0,5 - 1, abu batu bahan bakunya didatangkan dari Moncongloe PT. Putra Jaya Moncongloe Kab Maros dan semen PCC

2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Riset Eco Material, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa dengan rentang waktu penelitian selama dua bulan, dimulai pada February 2024

2.4 Teknik Pengumpulan Data

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

- a. Studi pustaka, untuk memperoleh data sekunder dengan membaca sejumlah buku, jurnal ataupun artikel-artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam menuju kesempurnaan penelitian ini.
- b. Pemeriksaan sampel dilakukan dilaboratorium untuk mendapatkan data primer yang akan digunakan dalam menganalisa hasil penelitian yang dilaksanakan.

2.5 Persiapan Peralatan dan Pengambilan Sampel

Pada pemeriksaan ini penulis menggunakan metode persyaratan yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal 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	Keausan Agregat	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 Kuat Tekan Campuran Aspal	SNI 03-6758-2002	

2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji

Banyaknya benda uji yang dibuat untuk kebutuhan penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. Perhitungan Benda Uji

Uraian kegiatan pengujian	
Penentuan Kadar Aspal Optimum (Filler: Abu Batu)	
Variasi Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
AC-BC	AC-BC
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
7	3
Penentuan Kadar Aspal Optimum (Filler: Semen)	
Variasi Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
AC-BC	AC-BC
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
7	3

2.7 Perhitungan Perkiraan Bitumen

Komposisi agregat gabungan campuran aspal panas AC-BC ditentukan dengan penerapan metode coba-coba (Trial And Error) dalam penelitian ini. Metode ini awalnya menentukan persentase masing-masing jenis agregat. Untuk mendapatkan hasil perkalian, persentase tersebut kemudian dikalikan dengan proporsi masing-masing agregat yang lolos. Komposisi ideal campuran aspal panas AC-BC dibuat dengan menjumlahkan hasil perkalian masing-masing jenis agregat. Rumus umum untuk menghitung perkiraan awal kadar aspal optimum (Pb) pada campuran dengan persamaan 2 adalah :

$$Pb = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%F) + \text{Konstanta.} \quad (2)$$

Dimana :

Pb = Perkiraan bitument (kadar aspal)

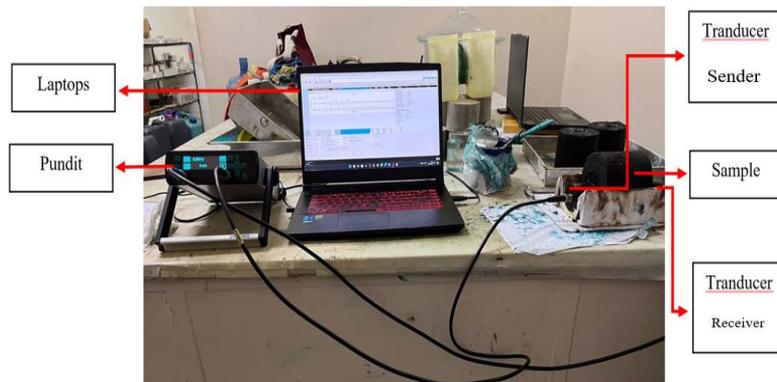
CA = Gradasi penggabungan saringan no 1 dikurang saringan no 4
 FA = Gradasi penggabungan saringan no 4 dikurang saringan no 200
 F = Agregat halus yang lolos saringan No. 200
 K = Nilai konstanta 0,5 - 1,0

2.8 Pengujian UPV

Kecepatan Pulsa Ultrasonik (UPV), suatu teknik Pengujian Tak-Merusak (NDT), menggunakan pulsa ultrasonik untuk mengukur waktu tempuh gelombang. Instrumen UPV dengan pewaktu untuk mencatat waktu tempuh gelombang digunakan untuk pengukuran ini. Kecepatan gelombang kemudian diperoleh dari hasil pengukuran. Menurut 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. Gelombang tersebut membutuhkan alat pengukur kecepatan pulsa ultrasonik (Δt) agar dapat bergerak melalui waktu. Oleh karena itu, dengan menggunakan persamaan 3, kecepatan gelombang dapat ditentukan sebagai berikut:

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

Dimana V adalah kecepatan gelombang ultrasonik (m/s), d adalah jarak antara transduser pemancar dan penerima (m), dan t adalah waktu tempuh gelombang ultrasonik (s). Gambar 7 menunjukkan skema kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) dalam penelitian ini.



Gambar 10. Ilustrasi Pengujian UPV

Setelah kecepatan pulsa ditentukan, dilakukan percobaan untuk mengukur modulus dinamis aspal beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses perjalanan ultrasonik dalam campuran aspal menentukan getaran dan pergerakan gelombang suara frekuensi tinggi, yang dapat digunakan untuk mencerminkan modulus dinamis frekuensi tinggi dari campuran tersebut. Metode perhitungan yang sesuai dijelaskan dalam Persamaan (4). Untuk menentukan penerapan UPV dalam mengevaluasi modulus dinamis campuran aspal, pengujian dilakukan pada

campuran dengan menggunakan pengisi SD dan CE dengan jumlah konstan, serta kadar aspal bervariasi dari 5% hingga 7%, dengan peningkatan 0,5%.

$$E = \nu^2 \rho + \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (4)$$

Di mana E adalah modulus dinamis campuran yang disimpulkan oleh UPV, ν adalah UPV, dan ρ adalah densitas campuran.

2.9 Pengujian Kuat Tekan

Kuat Tekan dimaksudkan untuk menentukan karakteristik kuat Tekan dari aspal beton yang dapat dijadikan sebagai indikator dalam melakukan kajian terhadap retak (cracking) yang terjadi pada lapis perkerasan. Perkembangan jumlah beban lalu lintas yang akan diterima oleh jalan mengakibatkan masa layanan dari lapisan perkerasan akan berkurang. Beban tekan dan beban tarik adalah dua pembebanan yang dialami oleh suatu lapisan perkerasan jalan. SNI telah mengeluarkan pedoman dalam melakukan pengujian SNI 03-6758-2002.



Gambar 11. Pengujian UPV

Gambar 13 menunjukkan sampel pengujian Kuat Tekan Campuran Aspal AC-BC yang dapat digunakan untuk mengukur Tegangan Tekan (SNI 03- 6758-2002).

Kuat tekan = Luas Penampang Benda Uji / Beban Vertikal Maksimum dinyatakan dalam Pascal.

1. Setiap kadar aspal harus dibuat 3 benda uji.
2. Nilai kuat tekan dihitung dengan rata-rata kuat tekan paling sedikit 3 benda uji.
3. Harus dicatat : (1) Berat jenis benda uji. (2) Tinggi diameter benda uji.

2.10 Environment Performance dari Campuran Aspal Panas

Sebuah analisis efek Semen (CE) pada konsumsi energi yang dibutuhkan untuk membuat campuran aspal sebagai filler serta global warming potential (GWP), abiotic depletion potential (ADP), acidification potensial (AP), dan eutrophication potensial (EP) dilakukan. Untuk memprediksi kriteria penerimaan semen sebagai filler, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan dengan komposisi campuran pada HMA.

Selanjutnya faktor-faktor dampak lingkungan dari setiap raw material dikalikan dengan jumlah pembentuk AC untuk mempelajari dampak lingkungan dengan fuctional 1 m³ (campuran AC). 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)