

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 : **“STUDI LABORATORIUM KUAT TEKAN DAN KUAT TARIK CAMPURAN ASPAL PANAS”**

1. Rumusan Masalah

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

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

1.2. Teori

1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

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

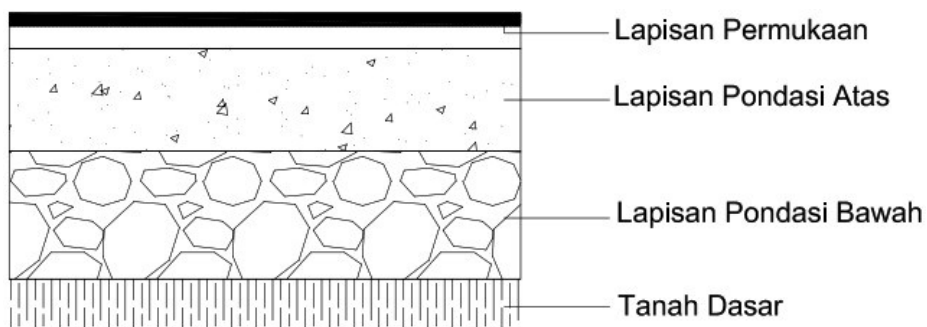
Permukaan jalan yang direkayasa pasti akan mengalami penurunan kualitas seiring berjalannya waktu karena berbagai faktor. Konstruksi perkerasan jalan memiliki masa pakai tertentu, di mana kinerja dan kualitasnya akan menurun secara bertahap. Kerusakan jalan tidak dapat dihindari. (Peraturan Menteri Pekerjaan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

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

1.2.2 Perkerasan Lentur

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

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



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

1.2.3 Agregat

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

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

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

1.2.3.1 Klasifikasi Agregat

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

1. Agregat Kasar
Agregat kasar adalah material yang tertinggal pada saringan No. 8. Agregat harus terdiri dari batu pecah atau kerikil dalam keadaan kering, bebas dari tanah liat, kotoran, zat organik, atau komponen lain yang tidak diinginkan, dan sesuai dengan gradasi yang ditentukan.
2. Agregat Halus
Agregat halus adalah zat yang pada prinsipnya melewati saringan nomor 8 dan disimpan di saringan nomor 200. Agregat halus dapat terdiri dari pasir, batu pecah, atau kombinasi keduanya. Fungsi utama agregat halus adalah untuk meningkatkan stabilitas dan meminimalkan deformasi permanen campuran dengan memfasilitasi saling mengunci dan gesekan antar partikel.

1.2.3.2 Gradasi

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

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

1. Gradasi Seragam (Uniform Graded)

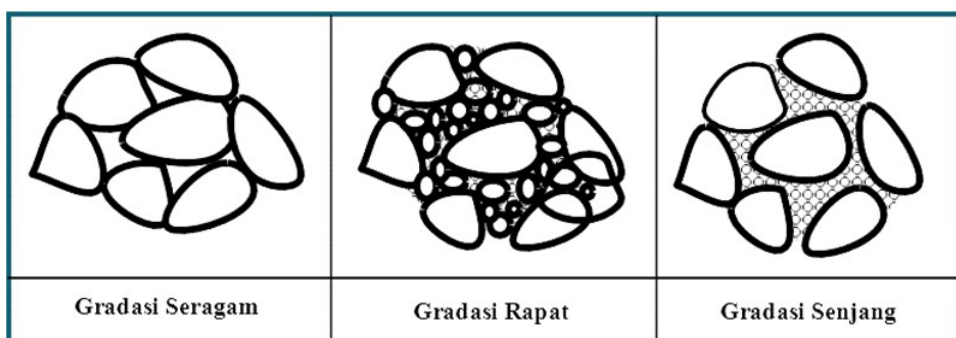
Gradasi seragam (uniform graded) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama, gradasi ini juga dikenal sebagai gradasi terbuka karena kandungan agregat halus yang sedikit, sehingga menghasilkan banyak rongga di antara agregat. Campuran komposit dengan gradasi ini menunjukkan permeabilitas tinggi,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

2. Gradasi Rapat (Dense Graded)

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

3. Gradasi Senjang (Gap Graded)

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



Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC

Ayakan		Gradasi
No Saringan	Ukuran Saringan (mm)	AC-BC
1 ½"	3,750	-
1"	25,000	100
¾"	9,500	90 - 100

1/2	4,750	75 - 90
3/8	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

Sumber: Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6.

1.2.4 Bahan Pengisi (Filler)

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

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

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

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

1.2.5 Spesifikasi Bahan Pengikat

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

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

Berdasarkan gradasinya campuran beraspal panas dapat dibedakan dalam tiga jenis campuran yaitu campuran beraspal bergradasi rapat, senjang dan terbuka. Tebal minimum penghamparan masing-masing campuran sangat tergantung pada ukuran maksimum agregat yang digunakan. Tebal padat campuran beraspal harus lebih dari dua kali ukuran butir agregat maksimum yang digunakan.

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

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

beraspal tidak lebih dari 4,0 mm. Hal tersebut menyebabkan campuran AC-BC peka terhadap variasi dalam proporsi campuran.

1.2.6 Karakteristik Campuran Beton Aspal

1.2.6.1 Stabilitas

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

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

Stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan mengusahakan penggunaan:

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

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

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

1.2.6.2 Durabilitas

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

Faktor- faktor yang mempengaruhi durabilitas lapisan aspal beton adalah :

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

1.2.6.3 Workability

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

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

1.2.7 Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal Yang Telah di Padatkan

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

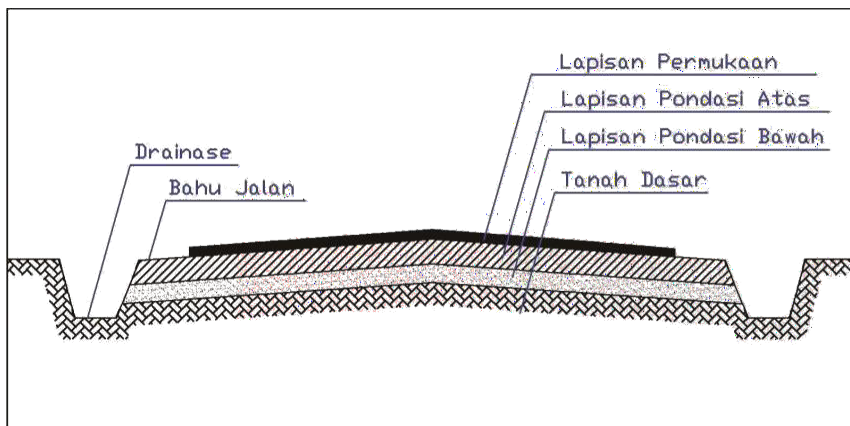
Parameter yang biasa digunakan adalah:

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

- VFB merupakan volume pori beton aspal padat yang terisi oleh aspal, atau volume film/selimut aspal.

1.2.8 Jenis Beton Aspal

Lapisan Aspal Beton (Laston) Laston adalah beton aspal bergradasi menerus yang umum digunakan untuk jalan-jalan dengan beban lalu lintas berat. Laston dikenal pula dengan nama AC (Asphalt Concrete). Karakteristik yang terpenting pada campuran ini adalah stabilitas. Tebal nominal minimum Laston 4- 6 cm. Persyaratan teknis yang digunakan dalam penelitian sesuai dengan persyaratan teknis campuran aspal beton yang dikeluarkan oleh DPU (Ariawan, Subagio and Setiadji, 2015). Lapisan aspal beton pada konstruksi jalan yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, filler dan aspal keras, yang dicampur, dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas pada suhu tertentu. Adapun Jenis lapisan aspal beton campuran panas, terbagi menjadi 3:



Gambar 3. Lapisan Aspal Sumber : Spesifikasi Binamarega 2010 Rev.3

1. Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC)

Laston sebagai lapisan aus, dikenal dengan nama AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) dengan tebal minimum AC-WC adalah 4 cm lapisan ini adalah lapisan yang berhubungan langsung dengan ban kendaraan dan dirancang untuk tahan terhadap perubahan cuaca, gaya geser, tekanan roda ban kendaraan serta memberikan lapis kedap air untuk lapisan dibawahnya (Guncoro *et al.*, 2019).

2. Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC)

Aspal AC-BC (Asphalt Concrete – Binder Course) adalah lapis perkerasan terletak dibawah lapisan aus dan di atas lapis bawah (pondasi). Lapis ini diharuskan mempunyai kekakuan dan ketebalan yang baik untuk mengurangi

tekanan akibat beban kendaraan harus memiliki karakteristik stabilitas (Caron and Markusen, 2016) .

3. Asphalt Concrete – Base (AC-Base)

AC-Base merupakan perkerasan yang terletak dibawah lapis pengikat (AC-BC), perkerasan tersebut tidak berhubung langsung dengan cuaca, tetapi perlu memiliki stabilitas untuk menahan beban lalu lintas yang disebabkan melalui roda kendaraan. Laston AC-Base merupakan lapis yang terletak di bawah lapisan aus AC- BC (Hakim, 2017).

1.2.9 Rancangan Campuran Beton Aspal

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

Pengujian empiris menjadi dasar dari metodologi perancangan empat tahap:

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

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

Sifat-Sifat Campuran		Laston		
		AC-WC	AC-BC	AC-Base
Jumlah tumbukan per bidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal	Min.	1		
	Maks.	1.4		
Rongga dalam campuran (%)	Min.	3		
	Maks.	5		

Rongga dalam Agregat (VMA)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.		65	
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800		1800
Pelelehan (mm)	Min.	2		3
	Maks	4		6
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.		90	
Rongga dalam campuran (%)	Min.		2	

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

1.2.10 Semen

Semen merupakan bahan yang bersifat hirolis yang bila dicampur air akan berubah menjadi bahan yang mempunyai sifat perekat. Penggunaannya antara lain meliputi beton, adukan mortar, plesteran, bahan penambal, adukan encer (grout) dan sebagainya. Pada umumnya terdapat beberapa jenis semen dan tipe semen yang berada dipasaran. Beberapa jenis semen diatur dalam SNI, diantaranya : SNI 15-2049-2004 mengenai semen portland (PCC = Portland Composite Cement)(Susanto, Djauhari, and Olivia 2019). Campuran Bahan pengisi pada campuran yang sering digunakan pada proses pembuatan aspal di AMP (Asphalt Mixing Plant) adalah abu batu. Semen portland adalah salah satu material yang digunakan untuk berbagai konstruksi bangunan memberikan peluang alternatif sebagai material penyusun campuran aspal(Ghilman and Walujodjati 2023). Material tersebut adalah bahan non palstis yang telah disetujui oleh Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah sebagai filler pada campuran beraspal panas. Ada kemungkinan persyaratan spesifikasi pada material tersebut dapat terpenuhi. Selain itu keberadaan semen portland banyak dijumpai di banyak tempat penjualan material, sehingga mudah untuk mendapatkannya dibandingkan material yang lain.

1.2.11 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Penggunaan Non-Destructive Test (NDT) dianggap sebagai sesuatu yang menarik karena pengujian tersebut dapat digunakan untuk menganalisis kondisi struktur tanpa merusak benda uji(Sarsam 2021). NDT telah didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk menguji proyek, material, atau sistem tanpa merusak kegunaan benda uji. Hal ini merupakan salah satu keuntungan utama dari metode NDT(Chen et al. 2022). Metode ini juga digunakan untuk memeriksa variasi dalam struktur, keretakan, perubahan bentuk, dan lain-lain(Zhang et al. 2019).

Salah satu peralatan yang memungkinkan penggunaan metode NDT adalah pengujian dengan gelombang ultrasonik. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) adalah pengujian NDT untuk campuran aspal yang menggunakan kecepatan gelombang ultrasonik guna meneliti sifat campuran aspal (Shi et al. 2018). Melalui pengujian UPV, campuran aspal yang pematatannya kurang baik dapat terdeteksi, yang terlihat ketika gelombang UPV mengalami penurunan kecepatan. Kuat tekan aspal ditunjukkan dengan perubahan kecepatan gelombang pada pengujian UPV. Jika kecepatan gelombang menurun, maka kuat tekan aspal juga menurun. Sebaliknya, jika kecepatan gelombang meningkat, kuat tekan aspal juga meningkat. Pengujian UPV dilakukan melalui tiga cara, yaitu langsung (direct), tidak langsung (indirect), dan semi langsung (semi direct). Gambar 3, pelaksanaan pengujian UPV dapat dilihat di bawah ini.

Prinsip penggunaan metode UPV didasarkan pada kecepatan gelombang tekan yang melintasi suatu benda, yang bergantung pada sifat elastis dan kepadatan benda tersebut. Menurut ASTM C597-02 (2003), cara kerja UPV adalah transduser pengirim (transmitter) mengirimkan gelombang yang kemudian ditangkap oleh transduser penerima (receiver) yang terletak sejauh L dari transmitter. Alat Ultrasonic Pulse Velocity mencatat waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk melintasi jarak tersebut (Δt). Dengan demikian, kecepatan gelombang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

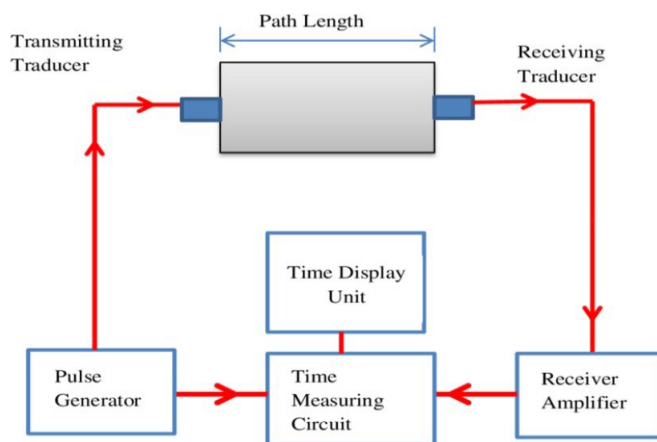
$$v = L / (\Delta t) \quad (2)$$

Keterangan:

V : kecepatan perambat

L : panjang lintasan gelombang (m);

Δt : travel time (s)



Gambar 4. Skema Pengujian Ultrasonik Pulse Velocity

Kecepatan gelombang untuk aspal biasanya diukur berkisar antara 70 hingga 85 μ s untuk panjang lintasan 300 mm. Oleh karena itu, peralatan yang digunakan harus mampu mengukur travel time yang sangat pendek dengan akurasi tinggi. Panjang lintasan juga harus diukur dengan teliti, karena metode UPV merupakan teknik perambatan gelombang, dan berbagai sumber yang dapat menyebabkan penipisan gelombang pada elemen selama pengujian (misalnya jack hammer) harus disingkirkan.

Pengiriman dan penerimaan gelombang dapat dilakukan dengan baik jika transduser terhubung sepenuhnya ke objek yang diuji. Jika ada kantong udara yang terperangkap, hal tersebut dapat menyebabkan kesalahan dalam pembacaan travel time. Untuk menghindari hal ini, couplant digunakan. Couplant yang tersedia di pasaran meliputi minyak teer (petroleum jelly), pelumas (grease), sabun cair, dan pasta kaolin-glyserol. Couplant harus digunakan setipis mungkin, namun jika permukaan beton sangat kasar, grease yang lebih tebal digunakan. Perataan permukaan dilakukan sebelum pelaksanaan uji UPV. Selama uji UPV, transduser diberi tekanan yang konstan, dan pembacaan diulang pada tempat yang sama sampai diperoleh nilai travel time minimum.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik pada campuran aspal juga telah diidentifikasi.

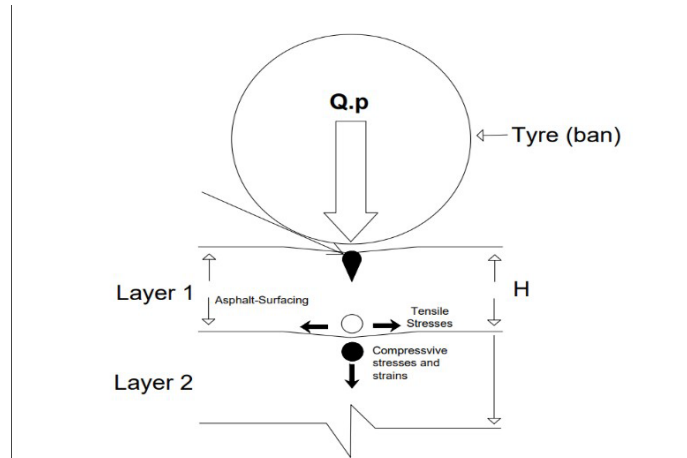
- 1) Jarak antara transmitter dan receiver,
- 2) Kondisi permukaan benda uji, dan
- 3) Temperatur benda uji.

1.2.12 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.

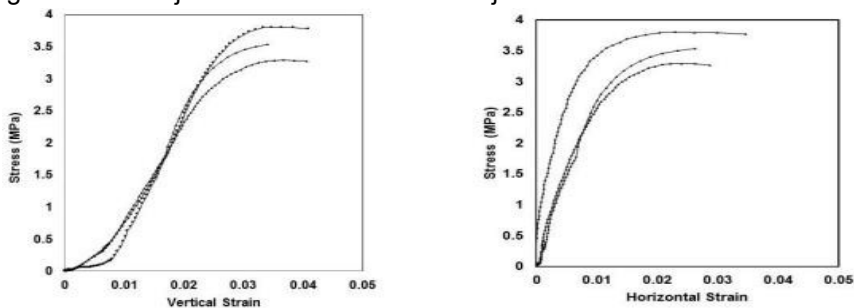


Gambar 5. Skema Pembebanan Pada Lapis Perkerasan Jalan

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 modulus 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 pengurungan 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 6. 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.

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



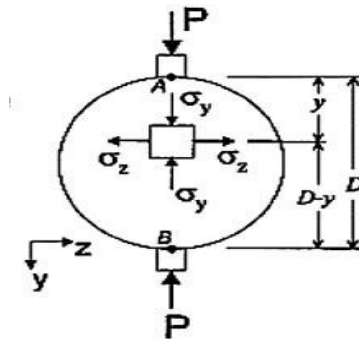
Gambar 7. Universal Testing Mechine

1.2.13 Uji Kuat Tarik Tidak Langsung (ITS) Campuran AC-BC

Kuat tarik tidak langsung (ITS) dimaksudkan untuk menentukan karakteristik kuat tarik dari aspal beton yang dapat dijadikan sebagai indikator dalam melakukan kajian terhadap retak (cracking) yang terjadi pada lapis perkerasan (Properties *et al.*, 2011). 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. ASTM telah mengeluarkan pedoman dalam melakukan pengujian ITS (*Indirect Tensile Strength*) dengan kode (Properties *et al.*, 2011). Pengujian kuat tidak langsung ini dilakukan karena tidak memungkinkan campuran campuran aspal untuk dilakukan pengujian kuat tarik langsung. Kuat tarik tidak langsung dimaksudkan untuk melihat seberapa besar tegangan tarik yang dapat terjadi pada permukaan jalan dan menyebabkan deformasi pada permukaan jalan tersebut.

Telah banyak peneliti ahli konstruksi perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur dalam melakukan berbagai penelitian dan melaporkan kinerja campuran beraspal sehubungan dengan pengujian kuat tarik tidak langsung atau biasa dikenal dengan istilah Indirect Tensile Strength (ITS) yang menggambarkan kemampuan campuran beraspal dalam menerima beban tarik secara monoton. Banyaknya ahli konstruksi jalan yang telah melakukan penelitian dengan topik kuat tarik berupa kuat tarik tidak langsung (Indirect Tensile Strength, ITS) campuran aspal karena masalah ini sehubungan masalah utama kerusakan perkerasan yakni retak yang terjadi pada perkerasan aspal yang diakibatkan oleh deformasi permanen. Ada tiga tekanan besar mekanis yang dapat menyebabkan terjadi retak yaitu retak pada suhu rendah, kelelahan (fatigue) dan rutting. Campuran aspal yang memiliki kekuatan tarik tinggi akan berkorelasi ketahanan terhadap retak yang meningkat (Kamal, Amin and Ijet, 2023), dimana diharapkan dalam penelitian ini retak itu dapat dikurangi dengan adanya penambahan filler menggunakan abu batu yang merupakan hasil Saringan Agregat lolos saringan 200 dan dicampur dengan Abu sekam padi.

Nilai kuat tarik tidak langsung pada benda uji berbentuk selinder merupakan fungsi dari beban (P_{max}), tebal benda uji dan diameter yang dituliskan dalam persamaan 2.



Gambar 8. Diagram pembebanan uji ITS (Birgisson, dkk., 2008)

$$\text{Dimana : ITS} = \frac{2P}{\pi DH} \quad (2)$$

ITS = Kuat tarik langsung dipusat benda uji (kN)

P_{max} = beban maksimum (kN)

H = ketebalan benda uji (mm)

d = diameter benda uji (mm)

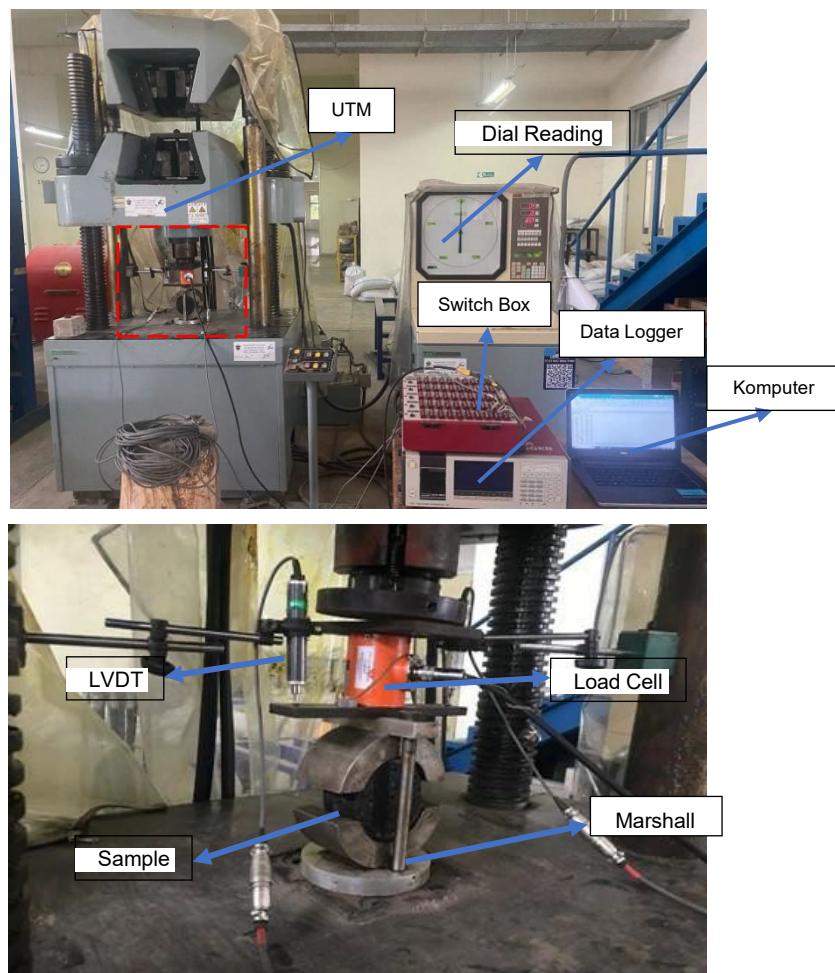
1.2.14 Marshall

Untuk menentukan apakah beton aspal memenuhi kriteria mutu, diperlukan uji Marshall. Uji Marshall (juga dikenal sebagai uji stabilitas Marshall atau uji stabilitas statis) akan menentukan, dalam hal persentase kandungan aspal, seberapa banyak

gradasi batuan yang diperlukan untuk menghasilkan kekuatan tekan terbaik. Informasi ini dinyatakan dalam kilogram (kg) silinder beton aspal (objek uji), yang telah direndam selama satu jam pada suhu 60 °C.

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

Uji Marshall mengukur flow (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, yang menunjukkan seberapa baik benda tersebut dapat menahan beban (Shah et al. 2020). Stabilitas kering dan stabilitas basah adalah dua jenis stabilitas yang berbeda, yang merupakan kapasitas benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas basah mengukur ketahanan benda uji terhadap beban dalam lingkungan jenuh air, sedangkan stabilitas kering mengukur ketahanan benda terhadap tegangan dalam lingkungan kering. Parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB, selain stabilitas dan flow. Instrumen pengujian yang dikenal sebagai Mesin Uji Universal digambarkan dalam Gambar 8. Alat ini mampu mengukur flow dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara presisi.



Gambar 9. Universal Testing Mechine

1.2.15 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 mengacu pada variasi suhu global yang disebabkan oleh efek rumah kaca. "Gas rumah kaca" seperti karbon dioksida (CO_2), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang diperoleh dari matahari. Peningkatan suhu global ini berpotensi menimbulkan gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Kesepakatan ilmiah yang substansial menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki dampak yang signifikan terhadap iklim.

Kategori ADP menggambarkan pengurangan jumlah global bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Kategori dampak ini terkait dengan ekstraksi material abiotik murni, misalnya ekstraksi agregat, bijih logam, mineral, tanah, dll. Ekstraksi zat-zat tersebut dapat berarti bahwa kapasitas alami bumi terlampaui dan membuatnya tidak tersedia untuk digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan unsur yang dipertimbangkan.

Dampak AP diakibatkan oleh pengendapan polutan asam, termasuk sulfur dan nitrogen, ke tanah, air, organisme, ekosistem, dan material. Gas asam, termasuk sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x), yang dipancarkan selama pembakaran bahan bakar, berinteraksi dengan air di tanah atau atmosfer, sehingga mengakibatkan terbentuknya "hujan asam." Asam adalah zat yang menghasilkan ion hidrogen (H^+ , yang biasa disebut 'proton') saat berinteraksi dengan air. Ion hidrogen memiliki reaktivitas yang tinggi, yang menyebabkan perubahan komposisi dan sifat fisik zat lain. Akibatnya, pengendapan asam dapat merusak ekosistem dan merusak material.

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

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

Dimana :

E = dampak lingkungan

N_i = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

w_i = berat kategori ke-i (kg/m^3)

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

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

Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA

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

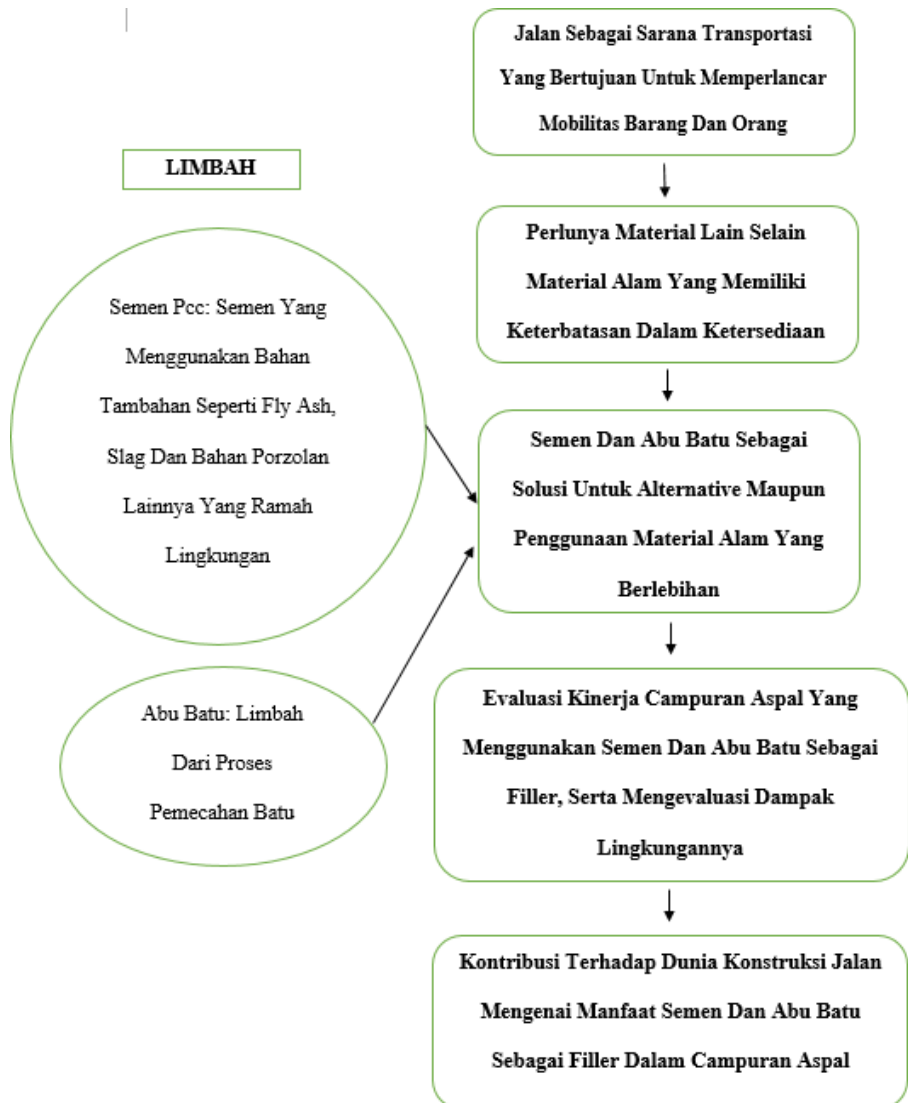
1.2.16 Desain Konseptual

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 10. Kerangka Konseptual

1.2.17 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

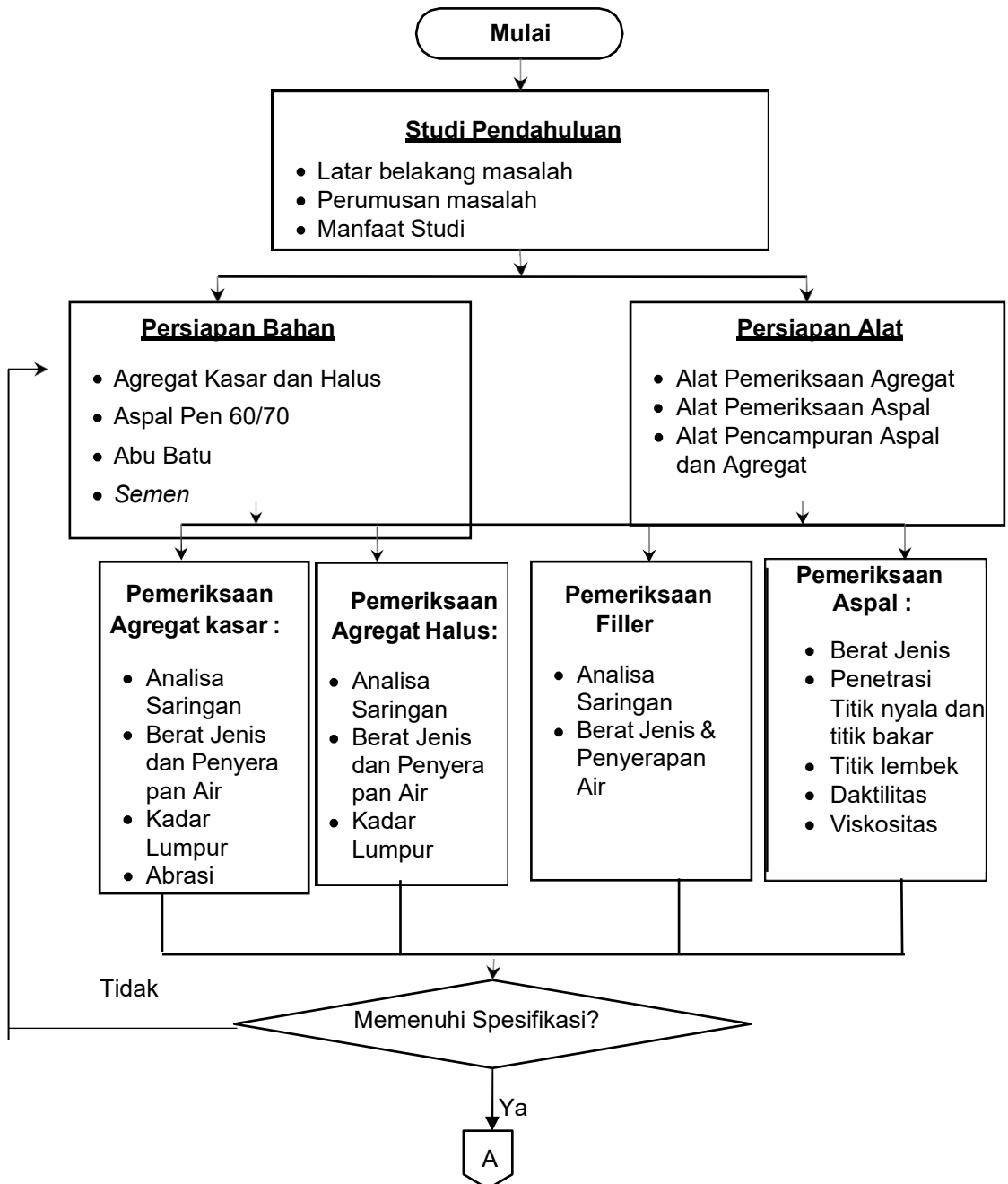
Peng, Bo et al. (2015), Melakukan penelitian mengenai karbon dioksida pada industry konstruksi jalan raya. Pada penelitian ini menjelaskan mengenai perubahan

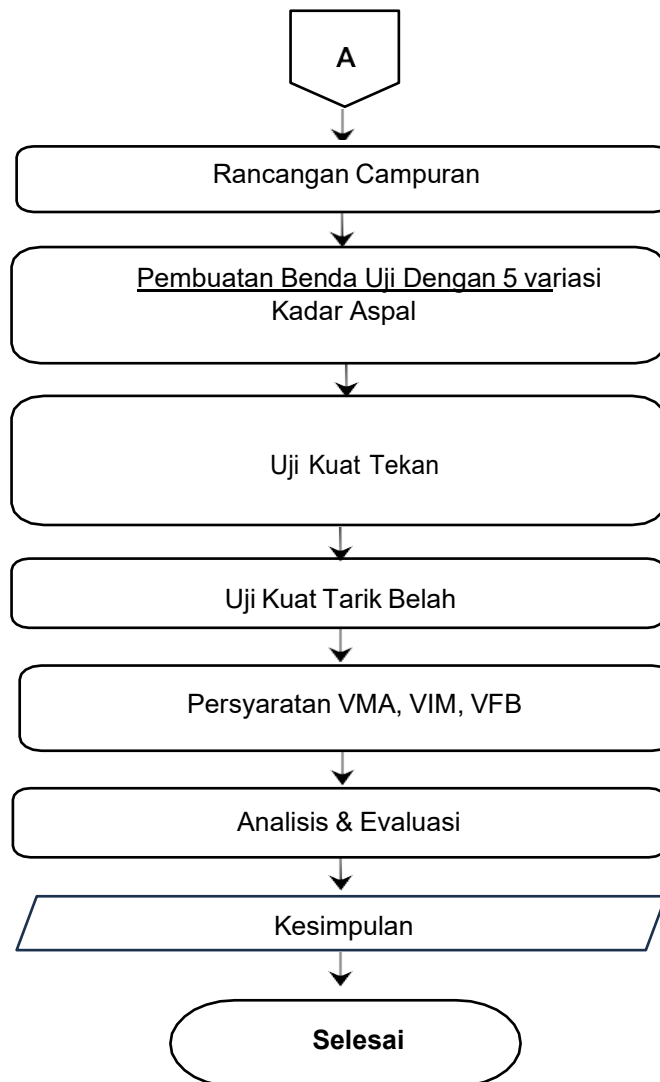
iklim global dan pengurangan emisi karbon yang telah menjadi isu penting dalam industry konstruksi jalan raya yang hingga kini masih belum dapat ditetapkan, oleh karena itu pada penelitian ini bertujuan untuk menerapkan model konstruksi jalan raya yang rendah karbon dioksida Dimana penelitian ini membagi antara konstruksi perkerasan aspal menjadi Produksi campuran aspal dan konstruksi campuran aspal, berdasarkan analisis proses produksi aspal meliputi penumpukan agregat, penyediaan agregat, pemasana 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 pembanding Dimana hasil penelitian pemasanan 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 11. 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 (P_b) pada campuran dengan persamaan 2 adalah :

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

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

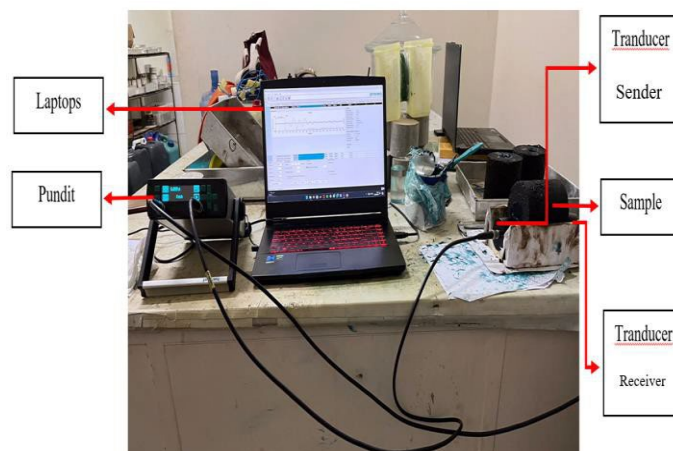
2.8 Pengujian UPV

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 11 menunjukkan skema kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) dalam penelitian ini.



Gambar 12. 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

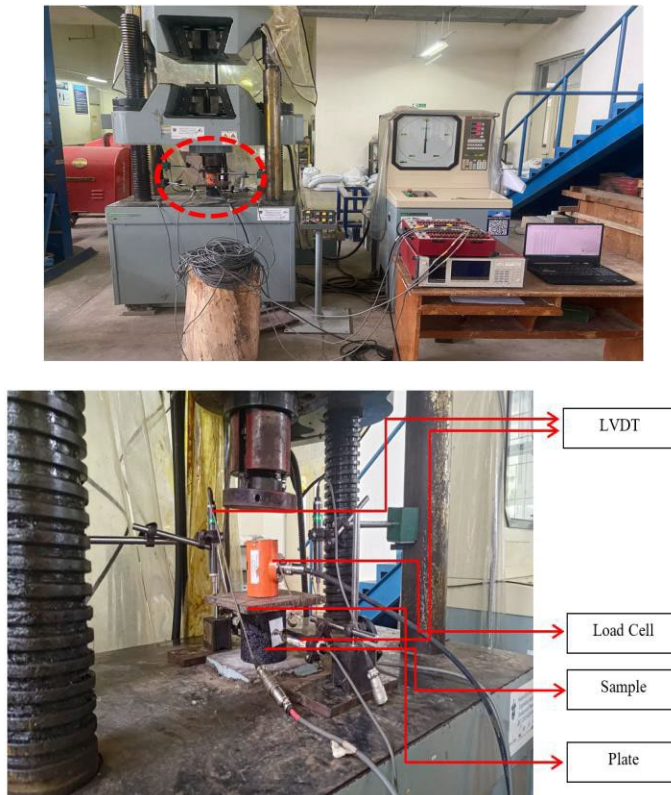
sesuai dijelaskan dalam Persamaan (4). Untuk menentukan penerapan UPV dalam mengevaluasi modulus dinamis campuran aspal, pengujian dilakukan pada campuran dengan menggunakan pengisi SD dan CE dengan jumlah konstan, serta kadar aspal bervariasi dari 5% hingga 7%, dengan peningkatan 0,5%.

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

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 13. Pengujian UPV

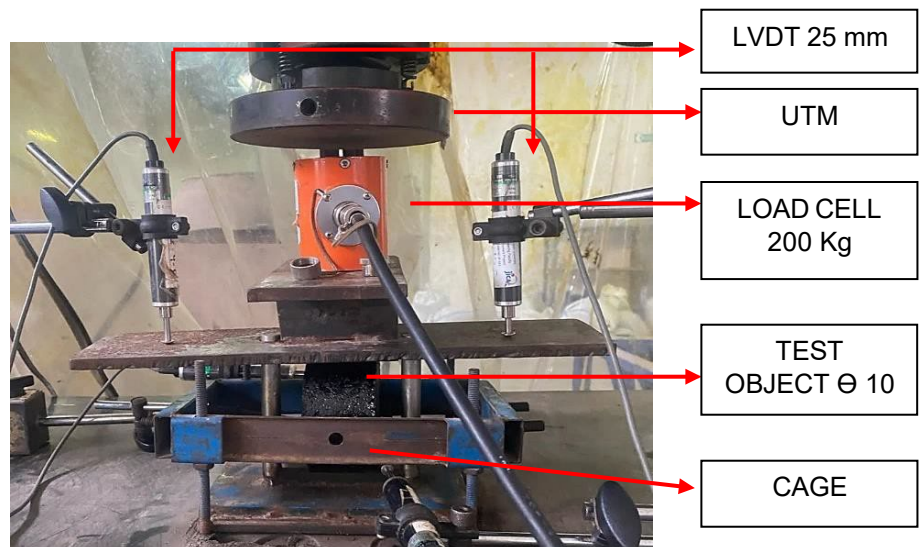
Gambar 12 menunjukkan sampel pengujian Kuat Tekan Campuran Aspal AC-BC yang dapat digunakan untuk mengukur Tegangan Tekan (SNI 03- 6758-2002).

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 Uji Tarik Tidak Langsung (ITS)

ITS (Indirect Tensile Strength) adalah suatu metode untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui indikasi akan terjadinya retak di lapangan. Pada uji ITS, sampel akan diberikan beban diantara dua batang pembebanan yang akan menciptakan tegangan Tarik. Gambar 16 berikut menunjukkan Alat Pengujian Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 1000 kN lengkap dengan Data Logger dan satu set Komputer, kemudian Gambar 13 adalah sketsa proses pengujian kuat tekan dengan menggunakan alat Universal Testing Machine dan LVDT yang dihubungkan ke Data Logger untuk mendapatkan pembacaan lendutan yang terjadi. (AASST D6931-12).



Gambar 14. Pengujian Kuat Tarik Belah Aspal

2.11 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 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)