

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Untuk meningkatkan perekonomian nasional, inisiatif untuk mendorong mobilitas orang, produk, atau layanan harus menyertakan jalan sebagai komponen utama infrastruktur transportasi. G. Chen, Yu, dan Nielsen (2019) mendefinisikan transportasi sebagai proses pemindahan sesuatu, biasanya orang atau barang, dari satu lokasi, yang dikenal sebagai asal, ke lokasi lain, yang dikenal sebagai tujuan, untuk tujuan tertentu, dengan menggunakan instrumen tertentu. Untuk mencapai tujuan tersebut, penyediaan material untuk pembangunan jalan tidak dapat dipisahkan dari penyediaan infrastruktur transportasi darat. Desain perkerasan lentur dan penerapan perkerasan yang efektif di lapangan memerlukan sejumlah besar pengetahuan ilmiah dan teknik mengenai keterkaitan antara beberapa sifat mekanik penting dari campuran yang dipadatkan dalam hal volumetrik, stabilitas dan aliran. Hal ini penting untuk memastikan bahwa standar teknis yang ditetapkan dipenuhi. Untuk menjamin efisiensi pengoperasian transportasi darat, penting untuk mempertimbangkan ketersediaan bahan konstruksi untuk pembangunan jalan.

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

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

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

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.

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

Karena jalan aspal yang sudah lama dan temuan penelitian sebelumnya, pengujian laboratorium diperlukan untuk menentukan efek penggunaan abu batu dan abu sekam padi sebagai bahan pengisi dan bagaimana keduanya mengubah sifat campuran aspal. Desain campuran penelitian ini didasarkan pada tipe kombinasi AC-BC Laston. Lapisan AC-BC memiliki peran penting untuk konstruksi dan fungsionalitas perkerasan jalan, terutama untuk jalan raya dengan volume lalu lintas

tinggi. Lapisan AC-BC menghubungkan lapisan pondasi dengan lapisan aus, mendistribusikan beban lalu lintas secara merata dan melindungi lapisan di bawahnya, sehingga secara langsung memengaruhi ketahanan dan keawetan perkerasan. Dari uraian tersebut diatas menjadi latar belakang untuk mengadakan penelitian di laboratorium dan menuliskannya dalam bentuk tulisan dengan judul : **“Analisis Resistivity Pada Campuran Aspal (AC-BC) Yang Terbuat Dari Abu Sekam Padi Dan Abu Batu Sebagai Filler”**

1.1.1 Rumusan Masalah

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

- Bagaimana perbandingan nilai resistivity campuran lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan abu sekam padi ?
- Seberapa besar pengaruh dampak lingkungan yang dihasilkan oleh setiap campuran lapisan AC-BC yang menggunakan abu batu dan abu sekam padi sebagai filler ?

1.1.2 Tujuan Penelitian

- Menentukan perbandingan nilai resistivity campuran beraspal lapisan AC-BC menggunakan abu batu dan abu sekam padi
- Memperoleh perbandingan informasi tentang dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap campuran yang menggunakan abu batu dan abu sekam padi

1.1.3 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan mampu memberikan wawasan dan pemahaman yang lebih luas tentang penggunaan limbah sebagai Filler pada campuran aspal AC- BC yang ditinjau terhadap nilai resistivity. Penelitian ini juga diharapkan dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi, khususnya konstruksi jalan raya.

1.1.4 Batasan Masalah

Penulisan Skripsi 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 (SD) dan abu sekam padi (RHA)
- Dampak lingkungan diperhitungkan dari setiap campuran yang dipersiapkan dalam penelitian ini.
- Gradasi campuran mengikuti spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.
- Pengujian material yang dilakukan mengacu pada standar SNI.

1.2. Teori

1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

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

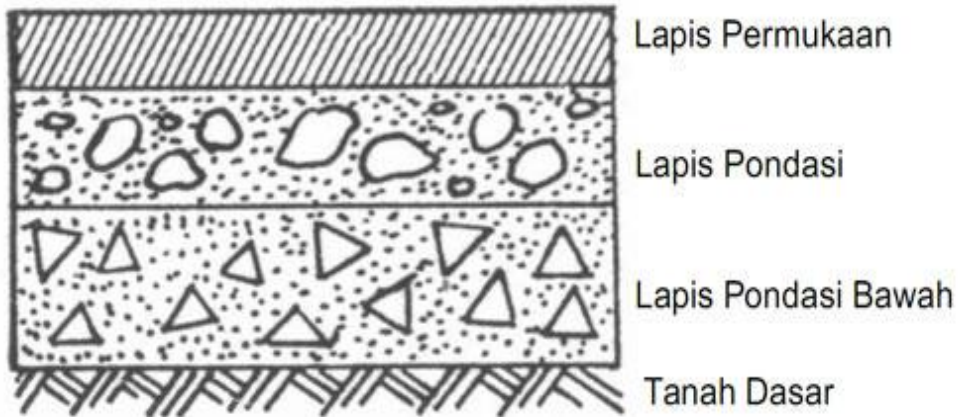
Permukaan jalan yang direkayasa pasti akan mengalami penurunan kualitas seiring berjalannya waktu karena berbagai faktor. Konstruksi perkerasan jalan memiliki masa pakai tertentu, di mana kinerja dan kualitasnya akan menurun secara bertahap. Kerusakan jalan tidak dapat dihindari. (Peraturan Menteri Pekerjaan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

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

1.2.2 Perkerasan Lentur

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

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



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

1.2.3 Agregat

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

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

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

1.2.3.1 Klasifikasi Agregat

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

1. Agregat Kasar
Agregat kasar adalah material yang tertinggal pada saringan No. 8. Agregat harus terdiri dari batu pecah atau kerikil dalam keadaan kering,

bebas dari tanah liat, kotoran, zat organik, atau komponen lain yang tidak diinginkan, dan sesuai dengan gradasi yang ditentukan.

2. Agregat Halus

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

1.2.3.2 Gradasi

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

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

1. Gradasi Seragam (Uniform Graded)

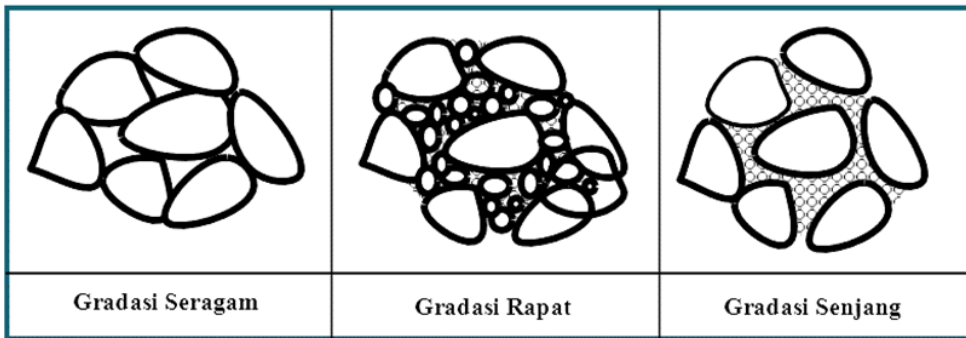
Gradasi seragam (uniform graded) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama, gradasi ini juga dikenal sebagai gradasi terbuka karena kandungan agregat halusnya yang sedikit, sehingga menghasilkan banyak rongga di antara agregat. Campuran komposit dengan gradasi ini menunjukkan permeabilitas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

2. Gradasi Rapat (Dense Graded)

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

3. Gradasi Senjang (Gap Graded)

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



Gambar 2. Ilustrasi Gradasi Agregat

Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Campuran AC-BC

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

1.2.4 Bahan Pengisi (Filler)

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

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

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

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

1.2.5 Spesifikasi Bahan Pengikat

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

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

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

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

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

1.2.6 Karakteristik Campuran Beton Aspal

1.2.6.1 Stabilitas

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

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

Stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan mengusahakan penggunaan:

- Agregat dengan gradasi yang rapat (dense graded)

- Agregat dengan permukaan yang kasar
- Aspal dengan penetrasi rendah
- Aspal dengan jumlah yang mencukupi untuk ikatan antar butir.

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

Penggunaan aspal berlebih mengurangi sifat kedap air lapisan, mempercepat proses oksidasi, dan meningkatkan risiko kerusakan pada perkerasan. Karena VMA yang kecil menciptakan ruang yang terbatas dalam campuran, penggunaan aspal berlebihan membuat aspal tidak lagi mampu melapisi agregat secara memadai (VIM).

1.2.6.2 Durabilitas

Kemampuan beton aspal untuk terhadap berbagai kondisi lingkungan dan beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan signifikan. Beton aspal yang memiliki durabilitas tinggi mampu mempertahankan kekuatannya, ketahanan terhadap deformasi, serta ketahanan terhadap kerusakan akibat air, suhu ekstrem, dan oksidasi, serta menahan keausan akibat pengaruh cuaca dan iklim, seperti udara, air, atau perubahan temperatur.

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 yang terlalu besar dapat mempercepat penuaan aspal dan menurunkan daya tahannya dengan membuat beton aspal padat kurang kedap air. Jika suhu meningkat, VIM yang terlalu kecil akan menyebabkan perkerasan bocor.
- VMA merupakan lapisan aspal yang dihilangkan seluruhnya, volume pori beton aspal padat. VMA tidak memperhitungkan volume pori setiap partikel agregat. Jika agregat bergradasi terbuka atau permukaan aspal lebih tebal, VMA akan meningkat.
- VFB merupakan volume pori beton aspal padat yang terisi oleh aspal, atau volume film/selimut aspal.

1.2.8 Jenis Beton Aspal

Jenis beton aspal yang ada di Indonesia saat ini adalah :

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

- Laston sebagai lapis aus, dikenal dengan nama AC-WC Tebal nominal minimum AC-WC adalah 4 cm.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.9 Rancangan Campuran Beton Aspal

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

Pengujian empiris menjadi dasar dari metodologi perancangan empat tahap:

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

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

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

Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.	90
Rongga dalam campuran (%)	Min.	2

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

1.2.10 Abu Sekam Padi

Sekam padi merupakan produk samping yang melimpah dari hasil penggilingan padi. Selama ini pemanfaatan sekam padi belum dilakukan secara maksimal sehingga hanya digunakan sebagai bahan bakar ataupun sebagai media tanaman. Penanganan sekam padi yang kurang tepat akan menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan. Sekam padi merupakan salah satu biomassa dengan kadar silika yang tinggi. Data ini mengindikasikan bahwa sekam padi sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai prekursor silika alam yang baik dan murah untuk sintesis material berbasis silika seperti zeolit.

Sekam padi yang di bakar sampai menjadi debu memiliki sifat simentasi yang berfungsi meningkatkan kekesataan butir partikel (St. Fauziah Badaron, 2019) Secara tradisional, RHA digunakan sebagai bahan pencuci alat-alat dapur dan bahan bakar dalam pembuatan batu bata. Kulit sekam ini dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses produksi. Kulit sekam terdiri 75% bahan mudah terbakar dan 25% berat akan berubah menjadi RHA .

Jika sekam padi dibakar dalam tungku pembakaran, akan dihasilkan sekitar 55 kg (25%) abu sekam padi (RHA). Sekitar 20% dari berat padi berupa sekam padi, dengan variasi antara 13% hingga 29% dari total komposisi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Al-Alwan et al. (2022), hasil analisis kimia RHA menunjukkan kandungan silika (SiO_2) sebesar 83,10%, alumina (Al_2O_3) sebesar 2,15%, besi oksida (Fe_2O_3) sebesar 1,10%, kalsium oksida (CaO) sebesar 4,70%, magnesium oksida (MgO) sebesar 1,50%, hilang saat pembakaran (LOI) sebesar 1,13%, sulfur trioksida (SO_3) sebesar 1,20%, kalium oksida (K_2O) sebesar 2,96%, natrium oksida (Na_2O) sebesar 0,10%, dan fosfat (P_2O_5) sebesar 2,05%. Penggunaan bahan pengisi secara efisien dapat mengurangi rongga udara dalam campuran dan menurunkan sensitivitas campuran terhadap perubahan suhu. Bahan pengisi mineral terutama digunakan untuk meningkatkan kekuatan kohesif campuran aspal beton, mengisi rongga pada campuran aspal, dan meningkatkan stabilitas campuran aspal secara keseluruhan (Mistry & Kumar Roy, 2021).

1.2.11 Marshall

Untuk menentukan apakah beton aspal memenuhi kriteria mutu, diperlukan uji Marshall. Uji Marshall (juga dikenal sebagai uji stabilitas Marshall atau uji stabilitas

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

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

Uji Marshall mengukur flow (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, yang menunjukkan seberapa baik benda tersebut dapat menahan beban (Shah et al. 2020). Stabilitas kering dan stabilitas basah adalah dua jenis stabilitas yang berbeda, yang merupakan kapasitas benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas basah mengukur ketahanan benda uji terhadap beban dalam lingkungan jenuh air, sedangkan stabilitas kering mengukur ketahanan benda terhadap tegangan dalam lingkungan kering. Parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB, selain stabilitas dan flow. Instrumen pengujian yang dikenal sebagai Mesin Uji Universal digambarkan dalam Gambar 3. Alat ini mampu mengukur flow dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara presisi.

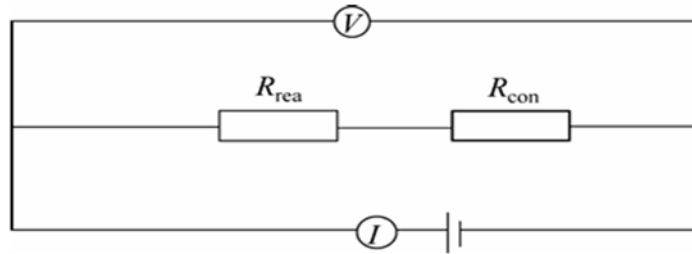


Gambar 3. Universal Testing Mechine

1.2.12 Electrical Resistivity

Resistivitas listrik benda padat membuktikan tingkat kesulitan ion untuk melewati, sehingga properti ini dapat digunakan untuk mengevaluasi resistensi struktural dengan menunjukkan seberapa mudah ion klorida dan CO₂ dapat mendobrak campuran sebelum tingkat kerusakan terjadi dan dimulainya kerusakan. Resistivitas listrik merupakan faktor penting dalam mengevaluasi kepadatan dan pemantauan kekuatan struktural karena mengharuskan benda padat untuk mendapatkan lubang – lubang, retak atau ketegangan. Resistensi listrik digunakan untuk menganalisis resistensi dan untuk melacak Perubahan dalam alur kerja selama ilustrasi standar dari waktu ke waktu.. Karena ini adalah tugas yang menantang, tes ini ideal untuk mengontrol kualitas di tempat kerja.. Pengukuran resistivitas listrik dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis instrumen, teknik pengukuran, tingkat kelembaban, dan frekuensi. Rentang frekuensi yang digunakan untuk menghitung Resistivitas Elektrik (ER) dari beton dalam studi ini berkisar dari 0,5 hingga 1 kHz, seperti dalam literatur. [13-15].

Yang et al. (2013) mendemonstrasikan penerapan metodologi baru dalam menentukan resistivitas listrik aktual sampel aspal dengan menggunakan metode dua elektroda. Hasilnya, enam kelompok aspal dengan kandungan grafit berbeda-beda disiapkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan kandungan grafit menyebabkan penurunan resistivitas kontak yang signifikan. Selain itu, disimpulkan bahwa nilai resistivitas nyata mencapai titik balik ketika kandungan grafit mencapai 3%. Gambar 2.8 menunjukkan skema pengujian resistivity yang dilakukan Yang dkk 2013



Gambar 4. Skema Pengujian Resistivity (Yang et al)

Pengujian yang dilakukan oleh Garcia et al. (2009) bertujuan untuk mengetahui konduktivitas mortar aspal melalui penambahan bahan pengisi dan serat penghantar listrik. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kemungkinan pemanasan sampel melalui daya induksi.

Penelitian yang membahas suhu rendah yang disebabkan oleh kondisi cuaca menyebabkan terjadinya thermal strain akibat kontraksi aspal campuran panas (HMA) Androji', dkk (2016). Penurunan suhu udara luar dapat menyebabkan pembekuan air asin di rongga akibat mencairnya salju dan pengasinan jalan selama pemeliharaan musim dingin. Sehubungan dengan hal tersebut, makalah ini menyajikan pengujian yang dilakukan terhadap nilai resistivitas listrik sampel Marshall berbahan HMA dengan tujuan untuk mencapai potensi peningkatan panas lapisan aspal jenuh pada periode musim dingin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai resistivitas listrik spesifik pada sampel aspal dengan komposisi yang bervariasi, dalam kondisi pengujian yang berbeda-beda. Secara keseluruhan, untuk keperluan pengujian, telah disiapkan 52 campuran aspal dengan komposisi yang beragam, dan diuji pada berbagai kondisi laboratorium yang berbeda. Selama pengujian, dilakukan pengukuran resistivitas listrik pada sampel aspal yang direndam dalam air dengan kadar salinitas yang bervariasi (0%, 10%, 20% dan 30%). Hasil utama menunjukkan bahwa peningkatan kandungan garam terlarut dalam suatu larutan menyebabkan peningkatan konduktivitas listrik pada sampel aspal secara signifikan. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa nilai resistivitas listrik lebih dipengaruhi oleh konektivitas dan bentuk dari rongga udara yang terkandung dalam sampel, daripada jumlah rongga udara itu sendiri. Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan hubungan fungsional antara sifat sampel aspal yang diamati, kandungan salinitas larutan, dan nilai resistivitas listrik spesifik.

Pengukuran resistivitas guna untuk mengetahui hubungan antara sifat volumetrik tertentu campuran aspal dengan komposisi yang bervariasi dengan resistivitas Listrik secara spesifik melalui sampel aspal. Nilai resistivitas listrik spesifik (ρ) diperoleh dengan mengukur resistivitas listrik sampel uji, dengan perhitungan sesuai persamaan berikut:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{L} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

- P = electrical resistivity dari benda uji
- R = resistansi listrik
- s = luas penampang elektroda yang tegak lurus terhadap arus listrik
- L = Ketebalan Sampel Uji

1.2.13 Parameter Dampak Lingkungan

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

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

Kategori ADP menggambarkan pengurangan cadangan global dari sumber daya abiotik yang tidak dapat diperbaharui. Kategori dampak ini terkait dengan ekstraksi bahan mentah abiotik seperti agregat, bijih logam, mineral, tanah, dan lain-lain. Ekstraksi terus-menerus atas zat-zat ini dapat melebihi kapasitas alami bumi, sehingga mengakibatkan ketersediaannya menjadi terbatas dan tidak lagi dapat dimanfaatkan oleh generasi mendatang. Kategori ini mempertimbangkan kelangkaan elemen-elemen yang digunakan.

Dampak AP diakibatkan oleh pengendapan polutan asam, termasuk sulfur dan nitrogen, ke tanah, air, organisme, ekosistem, dan material. Gas asam, termasuk sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), yang dipancarkan selama pembakaran bahan bakar, berinteraksi dengan air di tanah atau atmosfer, sehingga

mengakibatkan terbentuknya "hujan asam." Asam adalah zat yang menghasilkan ion hidrogen (H^+ , yang biasa disebut 'proton') saat berinteraksi dengan air. Ion hidrogen memiliki reaktivitas yang tinggi, yang menyebabkan perubahan komposisi dan sifat fisik zat lain. Akibatnya, pengendapan asam dapat merusak ekosistem dan merusak material.

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

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

Dimana :

E = dampak lingkungan

N_i = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

w_i = berat kategori ke-i (kg/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 $100^\circ C$). 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 (CO_2) 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).

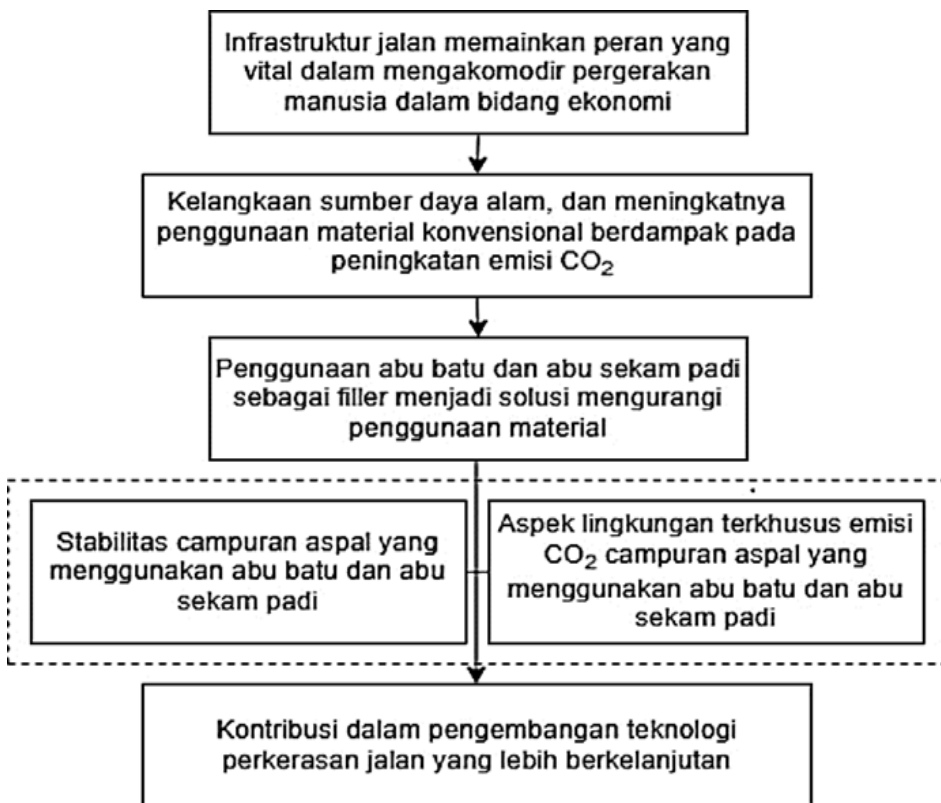
1.2.14 Desain Konseptual

Penelitian ini berfokus pada upaya untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan infrastruktur jalan di Indonesia. Salah satu pendekatan yang diuji adalah dengan memanfaatkan bahan daur ulang dalam campuran perkerasan aspal, khususnya pada lapisan AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course). Studi ini dilatarbelakangi oleh tantangan dalam menyediakan bahan konstruksi yang berkelanjutan dan tahan lama, mengingat pentingnya jalan sebagai infrastruktur

transportasi yang menunjang mobilitas barang dan manusia. Salah satu solusi yang dipertimbangkan adalah penggunaan abu terbang sebagai bahan pengisi dalam campuran aspal. Upaya ini bertujuan untuk melihat dampaknya terhadap nilai resistivitas dari campuran, sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai efektivitas penggunaan SD dan RHA sebagai filler pada campuran aspal. Stabilitas campuran beraspal merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan kualitas konstruksi jalan, dan penelitian ini akan membandingkan nilai stabilitas yang dihasilkan oleh kedua jenis filler tersebut. Selain itu, aspek lingkungan juga menjadi perhatian utama dalam penelitian ini, mengingat semakin tingginya tuntutan untuk menerapkan teknologi konstruksi yang ramah lingkungan. Emisi gas rumah kaca, yang dihasilkan dari penggunaan kedua jenis filler ini, akan diukur dan dianalisis untuk menilai dampak lingkungan dari masing-masing material.

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



Gambar 5. Kerangka Konseptual

1.2.15 Penelitian Terdahulu

Yang et al. (2013) mendemonstrasikan penerapan metodologi baru dalam menentukan resistivitas listrik aktual sampel aspal dengan menggunakan metode dua elektroda. Hasilnya, enam kelompok aspal dengan kandungan grafit berbeda-beda disiapkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan kandungan grafit menyebabkan penurunan resistivitas kontak yang signifikan. Selain itu, disimpulkan bahwa nilai resistivitas nyata mencapai titik balik ketika kandungan grafit mencapai 3%.

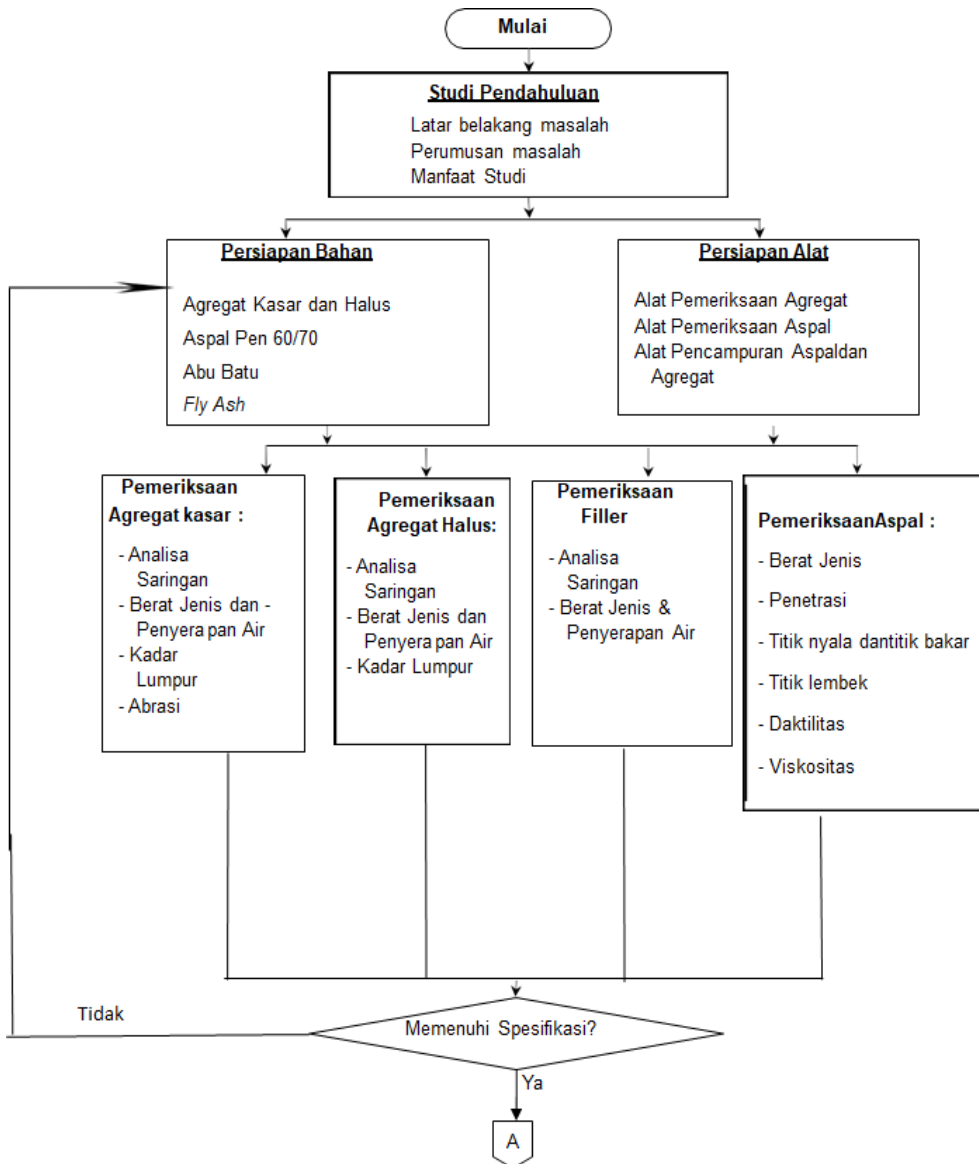
Ivica, dkk (2016), melakukan penelitian yang membahas suhu rendah yang disebabkan oleh kondisi cuaca menyebabkan terjadinya thermal strain akibat kontraksi aspal campuran panas (HMA). Penurunan suhu udara luar dapat menyebabkan pembekuan air asin di rongga akibat mencairnya salju dan pengasinan jalan selama pemeliharaan musim dingin. Sehubungan dengan hal tersebut, makalah ini menyajikan pengujian yang dilakukan terhadap nilai resistivitas listrik sampel Marshall berbahan HMA dengan tujuan untuk mencapai potensi

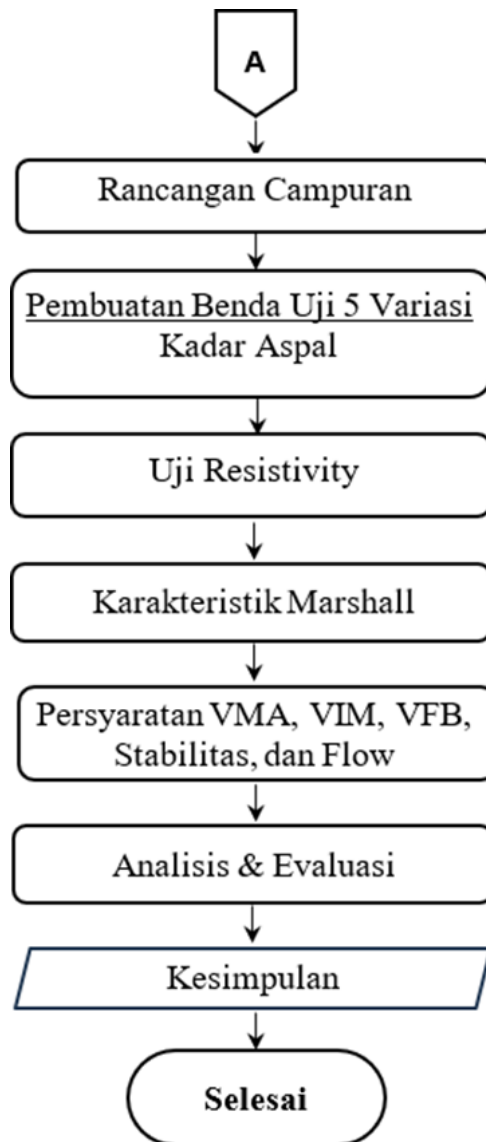
peningkatan panas lapisan aspal jenuh pada periode musim dingin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui resistivitas listrik spesifik sampel aspal dengan komposisi yang bervariasi pada kondisi pengujian yang berubah. Secara total, untuk tujuan pengujian, 52 campuran aspal dengan komposisi berbeda-beda disiapkan dan mengalami perubahan kondisi laboratorium. Selama pengujian, dilakukan pemeriksaan resistivitas listrik sampel aspal yang direndam dalam air dengan salinitas bervariasi (0%, 10%, 20% dan 30%). Hasil utama menunjukkan bahwa peningkatan kandungan garam terlarut dalam suatu larutan menyebabkan peningkatan konduktivitas sampel aspal yang signifikan. Hasil hubungan tersebut menunjukkan bahwa nilai resistivitas listrik lebih dipengaruhi oleh konektivitas dan bentuk kandungan rongga udara dibandingkan jumlahnya. Pengujian yang dilakukan mengarah pada pencapaian hubungan fungsional antara sifat sampel aspal yang diamati, kandungan salinitas larutan, dan resistivitas listrik spesifik.

Dalam menentukan nilai hambatan listrik akibat terjadinya hambatan kontak (Liu, Schlagen, Garcia, & van de Ven, 2010; Liu, Wu, & Yang, 2009). Pengukuran resistivitas guna untuk mengetahui hubungan antara sifat volumetrik tertentu campuran aspal dengan komposisi yang bervariasi dengan resistivitas Listrik secara spesifik melalui sampel aspal.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian





Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

2.2 Lokasi Material

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

2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian

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

2.4 Teknik Pengumpulan Data

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

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

2.5 Persiapan Peralatan dan Pengambilan Sampel

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

Tabel 3. Metode Pengujian Karakteristik

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

2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji

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

Tabel 4. Perhitungan Benda Uji

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

2.7 Perhitungan Perkiraan Bitumen

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

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

Dimana :

P_b = Perkiraan bitumen (kadar aspal)

CA = Gradasi penggabungan saringan no 1 dikurang saringan no 4

RHA = 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 Marshall

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

Uji Marshall mengukur nilai flow (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, yang menunjukkan seberapa baik benda tersebut dapat menahan beban (Shah et al. 2020). Stabilitas kering dan stabilitas basah adalah dua jenis stabilitas yang berbeda, yang merupakan kapasitas benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas basah mengukur ketahanan benda uji terhadap beban dalam lingkungan jenuh air, sedangkan stabilitas kering mengukur ketahanan benda terhadap tegangan dalam lingkungan kering. Parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB, selain stabilitas dan flow. Instrumen pengujian yang dikenal sebagai Mesin Uji Universal digambarkan dalam Gambar 8. Alat ini mampu mengukur flow dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur perpindahan atau deformasi vertikal benda uji selama pengujian yang menghasilkan nilai flow yang menunjukkan besarnya deformasi plastis pada campuran aspal saat diberi beban dan Load cell yang berfungsi memberikan beban yang di terapkan pada benda uji selama pengujian marshall.

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



Gambar 7. Pengujian Marshall

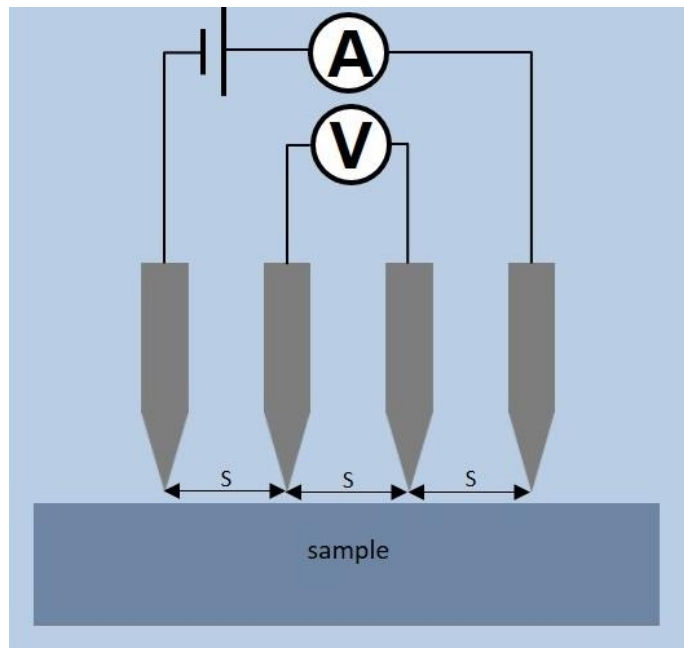
2.9 Pengujian Electrical Resistivity

Pengujian *electrical resistivity* dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Siapkan benda uji;
- Siapkan alat multimeter untuk pembacaan arus pada benda uji;
- Lap permukaan tiap benda uji hingga kondisi SSD;
- Jepit benda uji dengan diapit antara dua plat besi dan *sponge* (**Gambar 3.3**);
- Tunggu hasil pembacaan pada alat multimeter kemudian catat hasilnya.



Gambar 8. Pengujian Electrical Resistivity



Gambar 9. Skema Pengujian Electrical Resistivity

2.10 Dampak Lingkungan dari Campuran Aspal Panas

Sebuah analisis efek insertasi RHA 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 RHA sebagai filler, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan dengan komposisi campuran pada HMA.

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur sains yang terpercaya. Tabel 5 memperlihatkan nilai-nilai ADP, GWP, AP, dan EP untuk material agregat kasar, agregat halus, abu batu, RHA, dan aspal yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

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