

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jalan harus menjadi bagian penting dari infrastruktur transportasi jika ingin meningkatkan ekonomi negara. Transportasi didefinisikan sebagai proses pemindahan sesuatu, biasanya orang atau barang, dari satu tempat, yang disebut asal, ke tempat lain, yang disebut tujuan, dengan menggunakan instrumen tertentu, untuk tujuan tertentu. Penyediaan infrastruktur transportasi darat harus digabungkan dengan penyediaan material untuk pembangunan jalan untuk mencapai tujuan tersebut. Saat ini, perkerasan jalan di Indonesia dibangun dengan cara kaku dan lentur. Bahan pengisi, agregat kasar atau halus, dan aspal biasanya digunakan sebagai pengikat untuk membuat lapisan perkerasan lentur. Penggunaan bahan daur ulang dalam konstruksi transportasi memiliki banyak keuntungan, termasuk konservasi energi dan sumber daya alam, pengurangan sampah, dan pelestarian agregat alami (Zvonarić, Barišić, and Dokšanović 2024). Para pekerja di bidang transportasi dan lingkungan harus terus menerapkan teknologi daur ulang dan penggunaan kembali jika mereka ingin mengurangi penggunaan sumber daya baru seperti bahan bangunan.

Aspal beton, salah satu jenis perkerasan lentur, biasanya digunakan untuk membangun struktur. Perkerasan lentur biasanya terdiri dari kombinasi agregat kasar dan halus, aspal sebagai pengikat, dan lapisan atas, tengah, dan bawah yang terbuat dari beton aspal (Singh and Sahoo 2021). Abu batu (SD) biasanya digunakan sebagai pengisi dalam campuran aspal (Di Schino and Corradi 2020). Produksi abu batu sangat rendah dari pecahan batu alami, terutama jenis pemecah batu yang sudah tua dan mahal. Akibatnya, abu terbang dan abu terbang digunakan sebagai pengisi dalam campuran panas AC-BC dalam penelitian ini.

Saat ini, Departemen Pekerjaan Umum menggunakan kursus campuran aspal panas AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course) atau Asphalt Concrete Wearing Course. Bina Marga dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan telah menyempurnakan tiga bentuk Laston untuk campuran aspal. AC-BC adalah salah satu dari tiga jenis campuran lapisan aspal beton; jenis lainnya adalah AC-WC, AC-BC, dan AC-Base. Metode kepadatan absolut digunakan untuk merencanakan persyaratan baru. AC-BC, singkatan dari Course of Asphalt Concrete Binder, mengacu pada lapisan aspal beton, atau laston, yang digunakan sebagai bahan pengikat. Lapisan dengan gradasi agregat padat ini adalah bagian dari lapisan permukaan yang berada di antara lapisan pondasi atas (Base Course) dan lapisan aus (Wearing Course). Lapisan AC-BC ini menciptakan struktur yang kuat dan stabil yang mampu menahan beban berat, mencegah kerusakan, dan mendistribusikan beban lalu lintas secara merata ke lapisan di bawahnya.

Menurut (Paul, Suresh, and Pal 2021) melakukan penyelidikan penggunaan fly ash dan serbuk kaca sebagai filler atau pengisi pada campuran aspal. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun serbuk kaca memiliki kandungan silika yang lebih tinggi dan nilai stabilitas yang lebih rendah saat terkena kelembaban, penggunaan serbuk kaca juga dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal saat menggunakan fly ash sebagai bahan pengisi. Flyash, yang digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga uap utama di Indonesia, adalah bahan abu berukuran butiran yang halus dan berwarna keabu-abuan yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Dalam campuran beton aspal, bahan pengisi mineral digunakan untuk meningkatkan stabilitas campuran, meningkatkan daya ikat beton aspal, dan mengisi rongga apa pun dalam campuran.

Salah satu cara untuk mengurangi emisi CO₂ dari proses pembangunan adalah dengan menggunakan material yang lebih ramah lingkungan, seperti filler yang menggunakan abu batu bara sebagai pengganti material konstruksi. Menggunakan abu batu bara adalah salah satu cara untuk menangani banyak abu yang tertinggal setelah pembakaran batu bara. Meskipun tidak memiliki nilai ekonomi, penggunaan ini dapat setidaknya mengurangi biaya penanganan limbah (Hou et al. 2024). Meskipun tumpukan abu dapat mencemari air tanah, penimbunan dan pembuangan abu batu bara memiliki efek yang serupa, karena abu batu bara dikumpulkan di tempat dan mencemari udara dan curah hujan sebagai partikulat. Dengan demikian, penggunaan abu batu bara dapat mengurangi biaya produksi dan efek negatif penambangan bahan baku. Selain itu, penggunaan abu batu bara dapat mengurangi emisi gas karbon dioksida yang berbahaya. Ini disebabkan oleh fakta bahwa semen berkurang, yang merupakan salah satu sumber utama emisi karbon di industri konstruksi. Untuk mengurangi dampak ini, abu batubara digunakan sebagai bahan baku untuk semen, bahan bangunan, bahan pengisi untuk campuran perkerasan jalan, dan sebagainya. Penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang dapat meningkatkan kinerja campuran aspal, meningkatkan ketahanan lapisan beton aspal terhadap cuaca dan beban kendaraan yang lewat (Mistry, Karmakar, and Kumar Roy 2019)(Choi et al. 2020).

Karena jalan aspal yang sudah lama dan hasil penelitian sebelumnya, pengujian laboratorium diperlukan untuk mengetahui bagaimana penggunaan abu batu dan abu terbang sebagai bahan pengisi berdampak pada sifat campuran aspal. Penelitian ini bergantung pada tipe kombinasi AC-BC Laston. Secara langsung memengaruhi ketahanan dan keawetan perkerasan jalan, lapisan AC-BC menghubungkan lapisan pondasi dengan lapisan aus, mendistribusikan beban lalu lintas secara merata dan melindungi lapisan di bawahnya. Ini membuat lapisan AC-BC sangat penting untuk konstruksi dan fungsionalitas perkerasan jalan, terutama untuk jalan raya dengan banyak lalu lintas. Sebagai latar belakang untuk melakukan penelitian di laboratorium, saya menulis penelitian ini dalam tulisan dengan judul: **“Analisis Resistivity Pada Campuran Aspal Panas (AC-BC) Yang Tersusun Dari Fly Ash Dan Abu Batu Sebagai Filler”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan, berdasarkan uraian di atas, dirumuskan sebagai berikut:

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

1.1.2 Tujuan Penelitian

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

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas tentang penggunaan limbah sebagai Filler pada campuran aspal AC-BC yang dievaluasi berdasarkan nilai resistivity. Selain itu, diharapkan bahwa penelitian ini akan bermanfaat bagi industri konstruksi, khususnya konstruksi jalan raya. Jika hasilnya positif, kami berharap dapat diterapkan pada konstruksi jalan raya di Indonesia.

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 dan fly ash
- Fly Ash yang didatangkan dari PLTU Kabupaten Barru Sulawesi Selatan
- Dampak lingkungan diperhitungkan dari setiap campuran yang dipersiapkan dalam penelitian ini.
- Gradasi campuran mengikuti spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6.
- Pengujian material yang dilakukan mengacu pada standar SNI.

1.2. Teori

1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

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

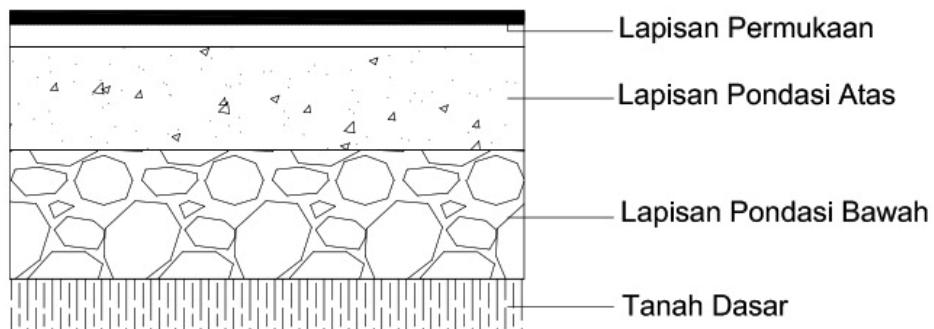
Setelah beberapa waktu digunakan, permukaan jalan yang direkayasa pasti akan kehilangan kinerja dan kualitasnya. Kerusakan yang terjadi di jalan tidak dapat dihindari (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 19/PRT/M/2011 2011).

Temuan Thomas Telford (1757–1834) dan Jhon London Mac Adam (1756–1836) memulai perkembangan konstruksi jalan yang digunakan di seluruh dunia. Dengan aspal sebagai bahan pengikat, struktur ini diberi lapisan aus, dan metode ini digunakan untuk membangun jalan di seluruh dunia. Konstruksi perkerasan jalan menggunakan aspal panas (Hot Mix) adalah kemajuan berikutnya. Perkerasan lentur adalah jenis perkerasan ini. (Robert 2020)

1.2.2 Perkerasan Lentur

Jalan dengan beban lalu lintas ringan hingga sedang, seperti jalan perkotaan, jalan dengan sistem utilitas di bawahnya, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan yang dibangun secara bertahap, biasanya menggunakan perkerasan lentur (Krisdiyanto, Dewi, and Wijayanto 2022). Aspal itu sendiri adalah bahan yang berbentuk padat sampai agak padat yang berwarna hitam atau coklat tua di suhu ruang. Selama suhu tertentu, aspal dapat menjadi lunak atau cair dan dapat membungkus partikel agregat saat membuat aspal beton. Jika suhu turun, aspal akan mengeras dan mengikat partikel agregat, sifat termoplastisnya berubah karena panas dan umur. Aspal menjadi rapuh dan kaku, sehingga daya ikatnya terhadap agregat berkurang. Jika sifat-sifat aspal dikuasai dan prosedur pelaksanaan dilakukan dengan benar, perubahan ini dapat diatasi atau dikurangi.

Konstruksi perkerasan lentur memerlukan penempatan berbagai lapisan pada tanah dasar yang dipadatkan. Lapisan-lapisan ini menyerap dan memindahkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya, memastikan beban tanah dasar lebih rendah daripada lapisan permukaan dan tetap kuat. Struktur perkerasan lentur terdiri dari:



Gambar 1. Komponen Perkerasan Lentur

1.2.3 Agregat

Formasi kerak bumi yang keras dan padat, dalam bentuk massa atau fragmen yang besar, dikenal sebagai agregat. Sifat agregat dan hasil pencampurannya dengan material lain menentukan daya dukung, keawetan, dan kualitas perkerasan jalan. Ini karena agregat, yang merupakan komponen utama perkerasan jalan, mengandung 90 hingga 95 persen persentase berat atau 75 hingga 85 persen persentase volume.

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

Komposisi agregat sangat penting untuk kapasitas perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas dan kondisi cuaca, sehingga kualitasnya sebagai material perkerasan jalan ditentukan oleh karakteristik fisik agregat. Dalam hal ini, evaluasi berbagai aspek agregat diperlukan, termasuk kebersihan, kekerasan, gradasi, 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 di saringan No. 8. Agregat harus terdiri dari batu pecah atau kerikil yang kering, bebas dari tanah liat,

kotoran, zat organik, atau bahan lain yang tidak diinginkan, dan disusun dengan gradasi yang ditentukan.

2. Agregat Halus

Agregat halus adalah zat yang pada dasarnya melewati saringan nomor 8 dan kemudian disimpan di saringan nomor 200. Tugas utama agregat halus adalah meningkatkan stabilitas campuran dan mengurangi deformasi permanen dengan memungkinkan partikel untuk saling mengunci dan bergesekan satu sama lain.

1.2.3.2 Gradasi

Menurut semua spesifikasi perkerasan, partikel agregat harus dalam proporsi tertentu untuk masing-masing ukuran dan dalam rentang ukuran tertentu. Gradasi agregat adalah tingkat distribusi dan variasi ukuran butir agregat ini. Gradasi dapat ditentukan dengan melakukan analisis saringan, di mana sampel agregat harus lolos dari saringan tertentu. Jenis gradasi yang berbeda pada campuran aspal ditunjukkan pada Gambar 2.

Spesifikasi gradasi campuran AC-BC ditunjukkan pada Tabel 1. Gradasi agregat ditunjukkan dalam persentase berat masing-masing contoh yang lolos pada saringan tertentu. Agregat yang lolos atau tertahan dihitung di masing-masing saringan. Silvia (1990) mengatakan bahwa ada tiga jenis gradasi agregat: gradasi seragam (dinilai uniform), gradasi rapat (dinilai dense), dan gradasi senjang (dinilai gap).

1. Gradasi Seragam (Uniform Graded)

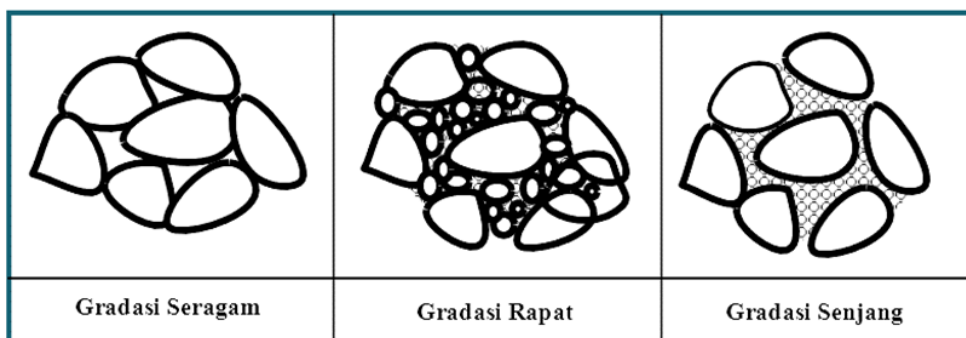
Gradasi seragam (uniform graded) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama. Karena kandungan agregat halus yang sedikit, ada banyak rongga di antara agregat. Permeabilitas tinggi, stabilitas rendah, dan densitas massal yang berkurang adalah karakteristik campuran komposit dengan gradasi ini.

2. Gradasi Rapat (Dense Graded)

Gradasi rapat (dense graded) adalah gradasi padat yang mencakup berbagai ukuran partikel dari kasar hingga halus. Ini juga disebut sebagai gradasi kontinu atau gradasi baik, dan ketika kedua gradasi bergabung, mereka menunjukkan stabilitas yang baik dan relatif kedap air.

3. Gradasi Senjang (Gap Graded)

Jenis gradasi agregat yang disebut gradasi senjang terdiri dari sejumlah kecil fraksi agregat yang hilang atau tidak lengkap.



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)

Abu terbang, semen portland, dan kapur terhidrasi adalah bahan-bahan yang dapat lolos saringan no. 200 (0,075 mm) yang membentuk filler. Meskipun filler dapat menurunkan sensitivitas suhu dan jumlah rongga udara dalam campuran, harus digunakan hanya pada tingkat yang bermanfaat. Jika terlalu banyak filler dalam campuran, beban lalu lintas akan membuat campuran menjadi getas dan mudah pecah. Sebaliknya, jika konsentrasi filler terlalu rendah, campuran akan menjadi lunak. Jika filler selain semen digunakan, kisaran idealnya adalah 1% hingga 3%. Perbandingan antara kadar filler dan aspal dalam campuran disebut sebagai porsi aspal.

Filler melakukan dua hal untuk campuran aspal. Pertama, mereka mengubah gradasi pasir, meningkatkan kepadatan campuran dengan lebih banyak titik kontak antara butiran partikel. Dengan demikian, jumlah aspal yang dibutuhkan untuk mengisi rongga yang tersisa pada campuran berkurang. Sifat mortar ini dipengaruhi oleh kualitas pasir, dosis campuran aspal, dan binder. Di sisi lain, fungsi kedua 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, juga dikenal sebagai aspal, adalah zat termoplastik yang akan meleleh dan membeku lagi ketika dipanaskan hingga suhu tertentu (Manuskrip Aspal Bercampur Panas, Buku 1, Petunjuk Umum). Dia memiliki warna hitam kecokelatan. Aspal adalah komponen yang sangat kecil dalam pembuatan perkerasan lentur, biasanya hanya 4–10 persen dari persentase berat atau 10–15 persen dari volume, tetapi itu adalah komponen yang mahal dalam proses. Aspal dari proses penyulingan minyak bumi adalah sumber aspal yang paling sering digunakan di dunia saat ini, selain aspal yang ditemukan secara alami di Pulau Buton.

Beton aspal adalah jenis jalan yang terbuat dari aspal dan agregat, dengan atau tanpa bahan lain. Instalasi pencampuran (AMP) menggabungkan bahan-bahan untuk membuat beton aspal pada suhu tertentu, menyebarkannya, dan memadatkannya di tempat yang diinginkan. Suhu pencampuran dipengaruhi oleh jenis aspal yang akan digunakan. Beton aspal campuran panas dibuat dengan mencampur semen aspal pada suhu antara 145° dan 155° Celcius. Istilah lain untuk campuran ini adalah campuran panas.

Tiga jenis campuran beraspal panas: bergradasi rapat, senjang, dan terbuka. Tebal penghamparan minimal untuk setiap campuran sangat bergantung pada ukuran agregat maksimum yang digunakan. Campuran beraspal yang padat harus lebih dari dua kali ukuran agregat maksimum yang digunakan.

Dalam penelitian ini, jenis beton aspal campuran panas yang ditinjau adalah AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course) atau Lapis Aus Aspal Beton. AC-BC adalah salah satu dari tiga jenis campuran lapis aspal beton, AC-Base, AC-WC, dan AC-BC. Bina Marga dan Pusat Litbang Jalan meningkatkan rencana spesifikasi campuran beraspal untuk ketiga Laston tersebut. Pendekatan kepadatan mutlak digunakan dalam perencanaan spesifikasi baru. Lapisan aspal beton (laston) sebagai bahan pengikat, yang disebut AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course), merupakan bagian dari lapis permukaan di antara lapis pondasi atas (Base Course) dan lapis aus (Wearing Course). Lapisan ini biasanya digunakan di jalan dengan banyak lalu lintas.

Dalam penggunaan, campuran aspal panas AC-BC digunakan sebagai lapisan di antara perkerasan untuk mencegah air dari atas masuk ke pondasi. Ukuran agregat maksimum campuran adalah 25,4 milimeter, tebal lapisan padat minimal 6,0 milimeter, dan toleransi tebal tiap lapisan campuran beraspal tidak lebih dari 4,0 milimeter. Dengan demikian, campuran AC-BC peka terhadap perubahan dalam proporsi campuran.

1.2.6 Karakteristik Campuran Beton Aspal

1.2.6.1 Stabilitas

Kemampuan perkerasan untuk menahan tekanan lalu lintas tanpa mengalami kerusakan permanen seperti pendarahan, buckling, atau rutting dikenal sebagai stabilitas. Situasi tersebut stabil berdasarkan jumlah lalu lintas dan berat kendaraan di jalan. Jalan raya dengan volume lalu lintas tinggi, yang sebagian besar digunakan oleh kendaraan besar, membutuhkan stabilitas yang lebih baik daripada jalan raya dengan volume lalu lintas yang sebagian besar digunakan oleh mobil penumpang.

Terlalu banyak stabilitas menyebabkan lapisan aspal menjadi rendah, kaku, dan mudah retak karena volume antar batu yang kurang. Akibatnya, lapisan aspal tipis terbentuk dan ikatan aspal mudah longgar, yang 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) dengan rongga kecil yang terbentuk oleh agregat yang bergradasi baik memiliki 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 oksidasi lebih mudah terjadi dan menyebabkan kerusakan pada lapisan perkerasan.

Kelebihan aspal menurunkan sifat kedap air, mempercepat oksidasi, dan meningkatkan kemungkinan kerusakan pada lapisan perkerasan. Penggunaan aspal yang berlebihan menyebabkan agregat (VIM) tidak dapat menutupi dengan baik karena VMA yang kecil dan ruang campuran yang sangat kecil.

1.2.6.2 Durabilitas

Daya tahan beton adalah kemampuan beton untuk menahan beban cuaca dan iklim, seperti perubahan udara, air, atau suhu, serta beban lalu lintas terus-menerus, seperti berat kendaraan dan gesekan antara roda dan permukaan jalan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi durabilitas lapisan aspal beton adalah:

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

1.2.6.3 Workability

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

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

1.2.7 Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal Yang Telah di Padatkan

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

Parameter yang biasa digunakan adalah:

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

1.2.8 Jenis Beton Aspal

Jenis beton aspal yang ada di Indonesia saat ini adalah :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.9 Rancangan Campuran Beton Aspal

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

Pengujian empiris menjadi dasar dari metodologi perancangan empat tahap:

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

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

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

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

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

1.2.10 Abu Terbang Batu Bara (Fly Ash)

Abu terbang batu bara adalah sisa pembakaran batu bara yang mengubah bahan mineral. Dua jenis abu yang dibuat ketika batu bara dibakar di pembangkit listrik adalah abu terbang (Fly Ash) dan abu dasar (Bottom Ash). Abu dasar terkumpul

dari dasar tungku dan tertinggal, sementara gas buang membawa abu terbang dari batu bara. Istilah "terak" mengacu pada bagian abu dasar yang telah meleleh.

Fly ash batubara adalah limbah yang terdiri dari partikel halus yang dihasilkan dari pembakaran batubara. Kehalusan dan gradasi fly ash batubara dapat memenuhi persyaratan gradasi AASTHO M17 untuk mineral filler. Digunakan dalam campuran aspal beton untuk mengisi rongga, meningkatkan daya ikat aspal beton, dan meningkatkan stabilitas campuran. Sebagian besar limbah yang dihasilkan oleh industri Produk Pembakaran Batubara adalah abu terbang (FA). Bahan-bahan tersebut dapat menyebabkan masalah besar seperti polusi tanah, air, dan paru-paru serta mengganggu siklus alam jika dibuang secara tidak tepat. Jumlah abu terbang yang digunakan dari pembakaran batu bara berkisar antara 3 hingga 90%, tergantung pada wilayahnya. Hasil menunjukkan bahwa 90% abu terbang digunakan kembali di UE, 60% di Tiongkok dan India, dan 50% di AS. Dengan demikian, jelas bahwa banyak abu terbang masih dibuang ke tempat pembuangan sampah, kolam abu, dan laguna. Tetapi penggunaan fly ash yang efektif akan menguntungkan ekonomi dan lingkungan.

Akibatnya, sangat jelas bahwa banyak abu terbang masih dibuang ke tempat pembuangan sampah, kolam abu, dan laguna. Tetapi penggunaan fly ash yang efektif akan menguntungkan ekonomi dan lingkungan. Pertama dan terpenting, pembangkit listrik akan menghindari biaya tambahan untuk membuang limbah abu terbang. Selain itu, abu terbang dapat digunakan sebagai pengganti berbagai sumber daya alam. Oleh karena itu, teknologi industri baru harus dikembangkan untuk memaksimalkan pemanfaatan fly ash. Teknologi ini dapat digunakan untuk stabilisasi tanah, membangun jalan, membuang lubang bor penambangan, menyerap CO₂, dan sintesis zeolit. Menurut penelitian, fly ash juga dapat digunakan sebagai semen.

Dalam campuran aspal, filler memiliki dua tujuan. Proporsi debu, yang juga dikenal sebagai rasio filler terhadap kandungan aspal dalam campuran, adalah kisaran terbaik untuk filler selain semen dan biasanya berkisar antara 1 dan 3%. Pertama, ia mengubah gradasi pasir, meningkatkan kepadatan campuran dengan menambah titik kontak antara butiran partikel. Ini berarti bahwa jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi ruang yang tersisa dalam campuran berkurang. Karakteristik awal pasir, jumlah dosis dalam campuran aspal, dan viskositas pasta atau binder yang digunakan memengaruhi sifat mortar ini. Dengan mempertimbangkan proporsi agregat halus, filler, dan aspal yang menguntungkan dalam mortar, peran kedua memainkan peran penting dalam memengaruhi kinerja filler. Dalam penelitian berjudul "Penambahan Bahan Pengisi Fly Ash pada Campuran Aspal Beton Lapisan Aus", bahan pengisi digunakan pada campuran dengan persentase 1%, 1,5%, dan 2%, sesuai dengan persyaratan Bina Marga. PLTU Suralaya di Merak, Banten, menghasilkan fly ash ini melalui pembakaran batu bara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua karakteristik nilai Marshall KAO memenuhi persyaratan Bina Marga. Penelitian tersebut menyarankan untuk

menambahkan fly ash ke campuran aspal beton untuk mengisi lapisan aus (Al Qurny, Hagni Puspito, and Tinumbia 2022).

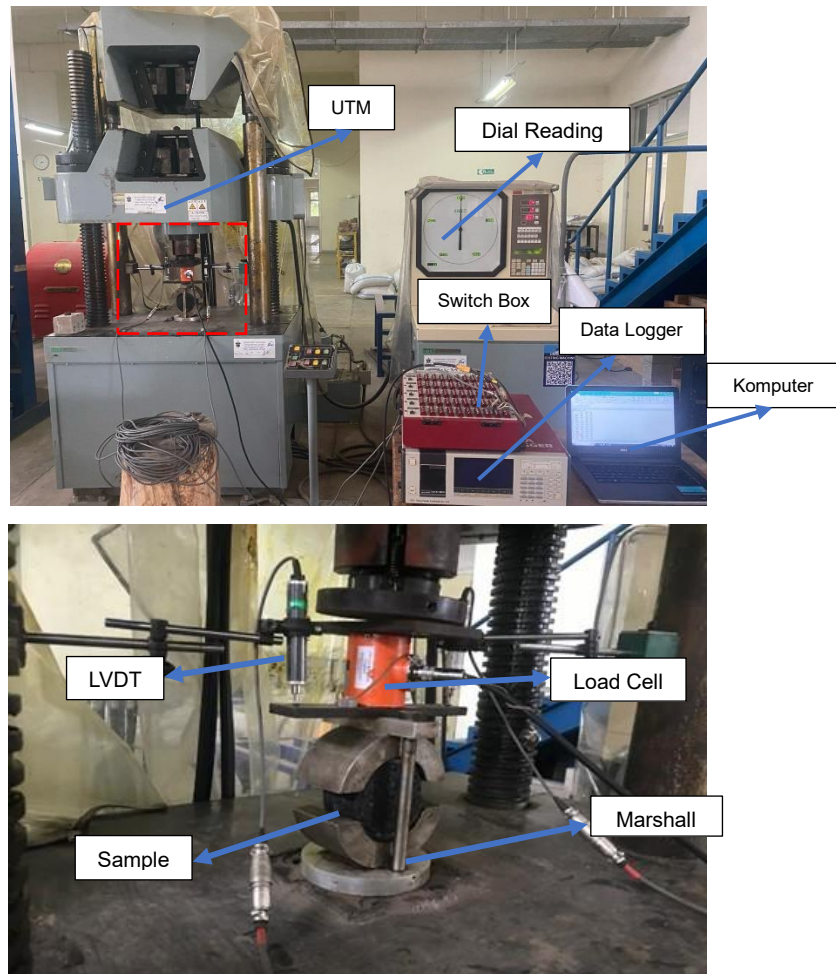
Dalam penelitian ini, limbah abu batubara digunakan sebagai penambah pada campuran laston. Lima belas benda uji dengan kadar aspal 5% hingga 7% direndam dalam air bersuhu 600 °C selama tiga puluh hingga empat puluh menit. Proses perendaman ini dilakukan dengan tujuan untuk mencapai kadar aspal yang ideal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan filler abu batubara tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap kekuatan campuran. Bahkan, kadar aspal ideal dengan filler abu batubara hanya 6,55% lebih tinggi daripada kadar aspal dengan filler yang lebih banyak digunakan (Sugeha, Eti, and Rudi 2018).

1.2.11 Marshall

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

Uji Marshall adalah salah satu metode untuk membuat desain yang berhasil. Ini adalah teknik laboratorium yang mengukur kinerja campuran aspal panas. Alat uji Marshall digunakan untuk mengukur stabilitas dan pelelehan campuran (Azizah, Andry, and Pradana 2024). Bruce Marshall dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi menciptakan metode ini pada tahun 1940-an dan distandarisasi dalam ASTM D 1559-89. Uji stabilitas dan aliran dilakukan pada berbagai benda uji dengan kadar aspal yang berbeda. Tulisan ini mengutip SNI 06-2489-1991, yang menjelaskan metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall. Sebelum melakukan pengujian Marshall, benda uji direndam dalam penangas air yang dipanaskan hingga mencapai suhu 60 derajat Celcius selama sekitar tiga puluh menit (Bina Marga 2003).

Uji Marshall mengukur aliran (deformasi plastik) dan stabilitas benda uji, menunjukkan kapasitas benda tersebut untuk menahan beban (Shah et al. 2020). Dua kategori stabilitas, stabilitas basah dan stabilitas kering, menentukan kemampuan benda uji untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Dalam lingkungan jenuh air, ketahanan benda uji terhadap beban disebut stabilitas basah, sedangkan ketahanan benda uji terhadap tegangan disebut stabilitas kering. Selain stabilitas dan aliran, parameter Marshall lainnya adalah VIM, VMA, dan VFB. Gambar 3 menunjukkan instrumen pengujian yang disebut Mesin Uji Universal, yang memiliki kemampuan untuk mengukur aliran dan stabilitas untuk menentukan ketahanan benda uji terhadap beban tumpuan. Untuk mengukur deformasi aksial secara akurat, pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT).



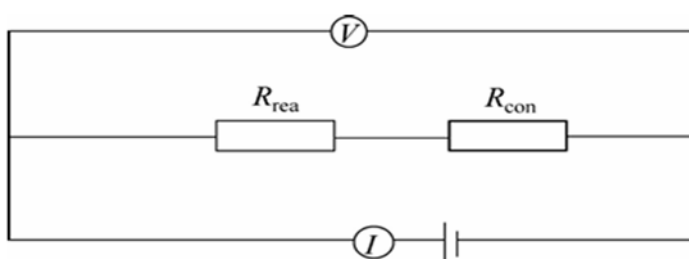
Gambar 3. Universal Testing Mechine

1.2.12 Electrical Resistivity

Resistivitas listrik benda padat mengharuskan benda padat untuk menghasilkan lubang, yang berarti bahwa properti ini sangat penting untuk mengevaluasi kepadatan dan memantau kekuatan struktural karena menunjukkan seberapa mudah ion klorida dan CO₂ dapat mendobrak campuran sebelum tingkat kerusakan muncul dan memulai kerusakan. Tes ini ideal untuk mengontrol kualitas di tempat kerja karena ini adalah tugas yang sulit. Jenis instrumen, metode pengukuran, tingkat kelembaban, dan frekuensi adalah beberapa faktor yang memengaruhi pengukuran resistivitas listrik. Dalam penelitian ini, rentang frekuensi

yang digunakan untuk menghitung resistivitas elektrik (ER) beton berkisar antara 0,5 dan 1 kHz, seperti yang dilaporkan dalam literatur sebelumnya.

(Yang, Li, and Wang 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, Li, and Wang 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.

Androji, 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, Schlangen, 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. 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

Sektor transportasi jalan raya seringkali menghadapi masalah anggaran yang tidak memadai untuk pemeliharaan perkerasan jalan, yang menyebabkan jadwal pemeliharaan jangka panjang yang hemat biaya. Penggunaan bahan baku dan bahan bakar yang digunakan selama kegiatan pemeliharaan merupakan salah satu sumber utama emisi CO₂.

Potensi Pemanasan Global (GWP), Potensi Depleksi Abiotik (ADP), Potensi Pengasaman (AP), dan Potensi Eutrofikasi (EP) adalah metrik standar untuk menilai dampak lingkungan. GWP terkait dengan semua emisi gas rumah kaca, termasuk karbon dioksida dan metana; keduanya memiliki efek negatif pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. "Gas rumah kaca" seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang dihasilkan oleh matahari. Ini dikenal sebagai perubahan iklim. Gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit dapat disebabkan oleh peningkatan suhu global ini. Sebagian besar penelitian ilmiah setuju bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki efek yang signifikan terhadap iklim.

Pengurangan jumlah bahan baku yang tidak dapat diperbaharui di seluruh dunia digambarkan dalam kategori ADP. Kategori efek ini berkaitan dengan ekstraksi bahan abiotik murni, seperti agregat, bijih logam, mineral, tanah, dan sebagainya. Ada kemungkinan bahwa ekstraksi zat-zat tersebut menunjukkan bahwa kapasitas

alami Bumi telah dipenuhi, membuatnya tidak dapat digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan komponen yang dibahas.

Pengendapan polutan asam seperti sulfur dan nitrogen ke tanah, air, hewan, ekosistem, dan material menyebabkan AP. "Hujan asam" terjadi ketika gas asam, seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x), dilepaskan dari pembakaran bahan bakar dan berinteraksi dengan air di tanah atau atmosfer. Dalam interaksi dengan air, asam menghasilkan ion hidrogen (H^+ , atau "proton"), yang memiliki reaktivitas yang tinggi, yang mengubah komposisi dan sifat fisik zat lain. Akibatnya, pengendapan asam dapat menyebabkan kerusakan pada material dan ekosistem.

Semua efek yang disebabkan oleh tingkat makronutrien (fosfor dan nitrogen) yang tinggi di lingkungan, yang menyebabkan produksi biomassa yang tinggi di ekosistem darat dan akuatik, termasuk dalam kategori EP ini. Polutan udara, air limbah, dll. Meskipun fosfat dan nitrat sangat penting bagi kehidupan, peningkatan konsentrasi mereka dalam air menyebabkan eutrofikasi, atau overnutrifikasi, yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi jumlah oksigen dalam air, dan merusak ekosistem. Pupuk dan emisi nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bahan bakar fosil adalah sumbernya. (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)

Dianggap bahwa dampak lingkungan yang paling signifikan dihasilkan dari pembangunan jalan, terutama yang dilakukan dengan metode campuran aspal panas. Ketika material dipertahankan pada suhu tinggi (lebih dari 100°C), jumlah energi yang diperlukan untuk memproses campuran aspal panas meningkat. Sumber utama energi ini adalah pembakaran bahan bakar fosil. Sebagaimana dijelaskan oleh (Fadholah, Setyawan, and Suryoto 2017) Proses pemanfaatan material perkerasan jalan terdiri dari lima tahap: ekstraksi, produksi, konstruksi, pemeliharaan, dan daur ulang. Studi ini berkonsentrasi pada analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (CO_2) yang terkait dengan proses konstruksi perkerasan jalan tertentu, seperti tahap produksi campuran, pengangkutan campuran, dan proses penyebaran dan pemadatan (Fadholah, Setyawan, and Suryoto 2017).

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

Tabel 3. Data Dampak Lingkungan Dari Produksi HMA

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

1.2.14 Desain Konseptual

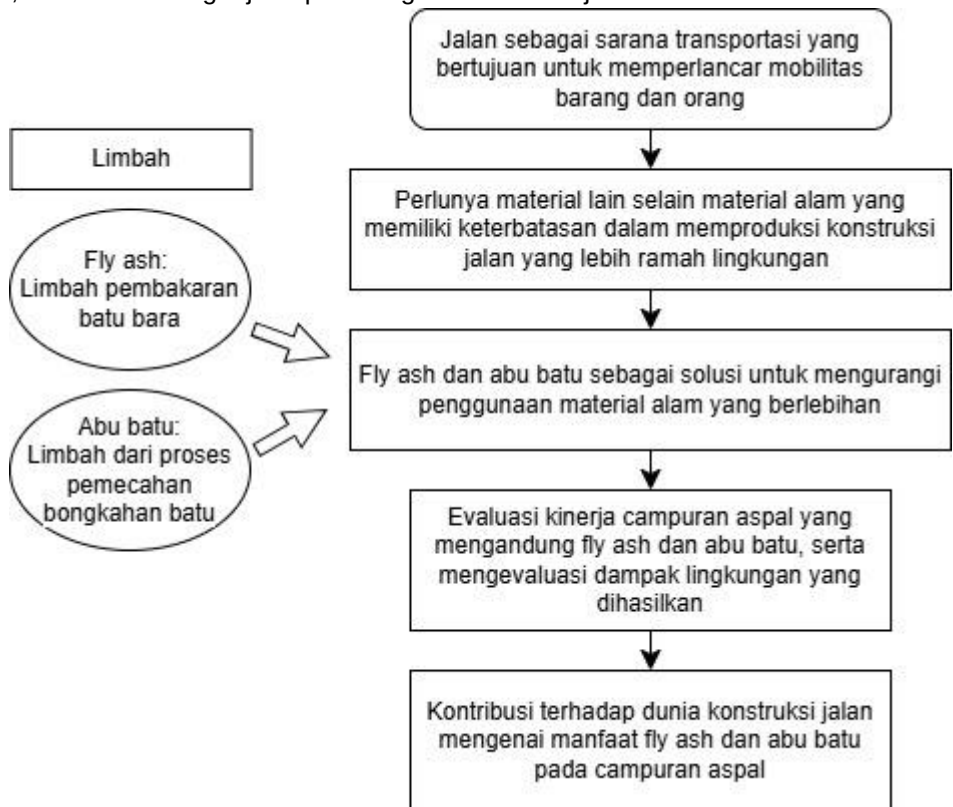
Konsep penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan infrastruktur jalan di Indonesia dengan menggunakan bahan daur ulang dalam campuran perkerasan aspal, khususnya pada lapisan AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course). Karena pentingnya jalan sebagai infrastruktur transportasi untuk mengangkut barang dan orang, penelitian ini menekankan masalah yang terkait dengan penyediaan bahan konstruksi yang berkelanjutan dan tahan lama. Untuk melihat nilai resistivity campuran dan mengurangi masalah lingkungan, abu terbang dapat ditambahkan ke campuran aspal sebagai pengisi.

Studi ini didorong oleh inovasi dalam teknologi konstruksi jalan yang dapat menggabungkan produk sampingan industri seperti abu terbang, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa abu terbang dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal, yang merupakan alternatif pengisi agregat alami. Namun, kita juga harus mempertimbangkan dampak yang ditimbulkannya pada lingkungan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi nilai resistivity dan efek lingkungan dari penggunaan abu terbang dalam kombinasi AC-BC.

Penggunaan fly ash dan abu batu dapat memengaruhi stabilitas jalan dan lingkungan, yang merupakan salah satu masalah utama yang dihadapi. Dengan menggunakan voltmeter, penelitian ini akan mengukur pengaruh kedua filler ini terhadap kekuatan dan daya tahan terhadap resistivity. Penelitian ini juga akan memeriksa dampak pada lingkungan, termasuk emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari berbagai campuran aspal.

Terakhir, tujuan penelitian ini adalah untuk membantu konstruksi jalan raya di Indonesia dengan memberikan bukti empiris tentang manfaat penggunaan limbah industri dalam konstruksi. Jika penelitian ini berhasil, lebih banyak orang akan dapat menggunakan abu terbang dan abu batu untuk mengisi campuran aspal. Ini akan

mengurangi ketergantungan kita pada sumber daya alam, mengurangi emisi karbon dioksida, dan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.



Gambar 5. Kerangka Konseptual

1.2.15 Penelitian Terdahulu

(Yang, Li, and Wang 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%.

(Androjić and Mikulić 2018) 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

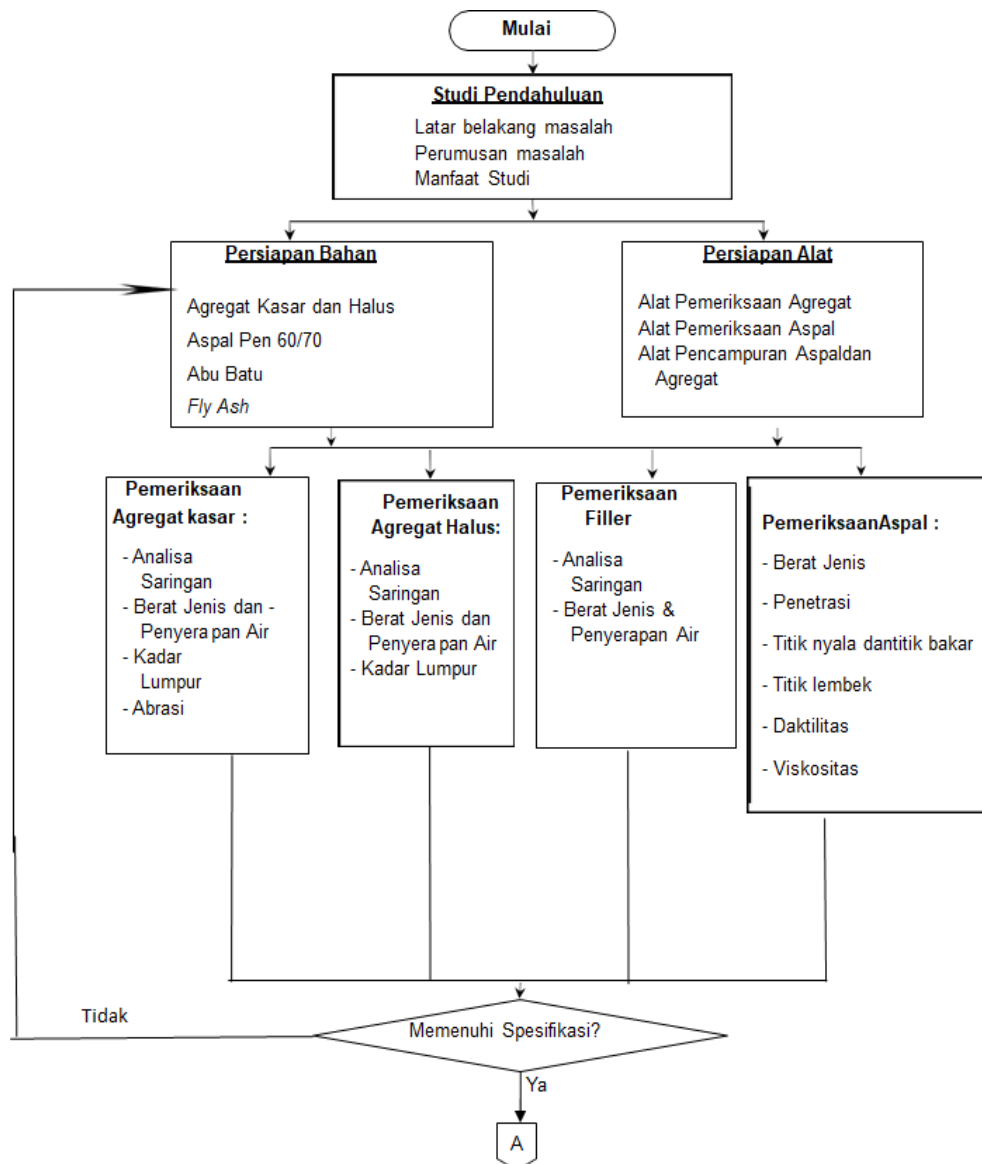
tersebut, makalah ini menyajikan pengujian yang dilakukan terhadap nilai resistivitas listrik sampel Marshall berbahan HMA dengan tujuan untuk mencapai potensi peningkatan panas lapisan aspal jenuh pada periode musim dingin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui resistivitas listrik spesifik 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.

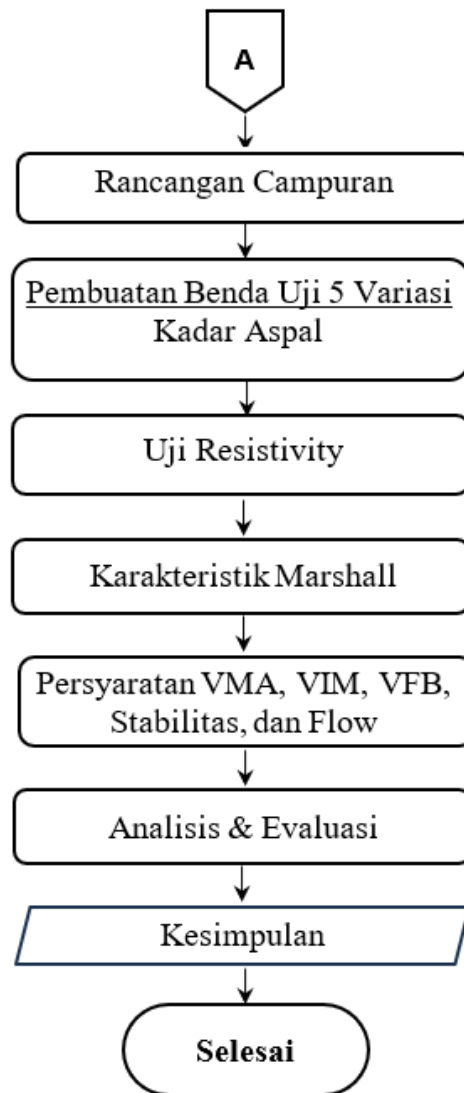
Dalam menentukan nilai hambatan listrik akibat terjadinya hambatan kontak (Liu et al. 2010). Pengukuran resistivitas guna untuk mengetahui hubungan antara sifat volumetrik tertentu campuran aspal dengan komposisi yang bervariasi dengan resistivitas Listrik secara spesifik melalui sampel aspal.

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, sedangkan fly ash diperoleh dari PLTU Kabupaten Barru.

2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Penelitian Eco Material, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, selama dua bulan dimulai pada bulan 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 Jenderall Bina Marga, yaitu Manual Pemeriksaan Bahan Jalan (MPBJ).

Tabel 4. Metode Pengujian Karakteristik

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

2.6 Penentuan Jumlah Benda Uji

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

Tabel 5. Perhitungan Benda Uji

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

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

Dimana :

P_b = Perkiraan bitumen (kadar aspal)

CA = Gradasi penggabungan saringan no 1 dikurang saringan no 4

FA = Gradasi penggabungan saringan no 4 dikurang saringan no 200

F = Agregat halus yang lolos saringan No. 200

K = Nilai konstanta 0.5 – 1.0

2.8 Pengujian 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

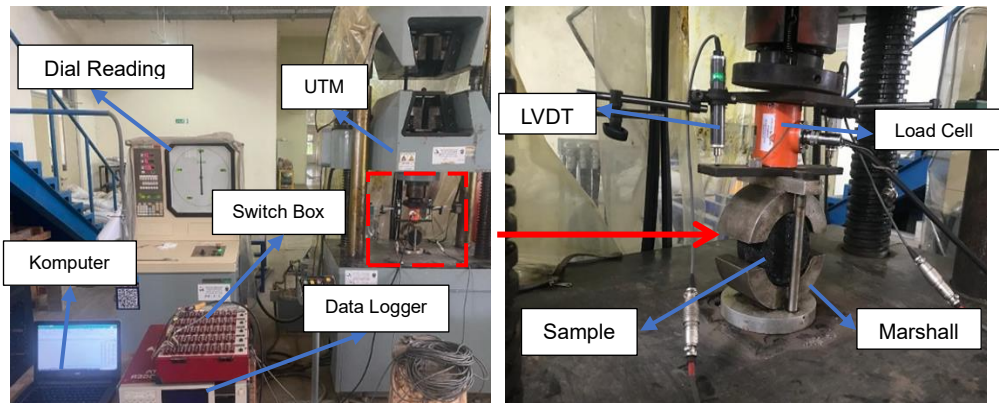
flow campuran (Azizah, Andry, and Pradana 2024). Metode ini diciptakan pada tahun 1940-an oleh Bruce Marshall dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi dan distandarisasi dalam ASTM D 1559-89. Stabilitas dan flow diuji pada beberapa benda uji dengan kadar aspal yang bervariasi. Pengujian ini 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 diterapkan 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.

Stabilitas merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk menilai kualitas campuran aspal dalam menghadapi tekanan dan beban dari lalu lintas kendaraan. Konsep stabilitas mengacu pada kemampuan campuran aspal untuk mempertahankan bentuknya tanpa mengalami deformasi permanen yang signifikan saat menerima beban vertikal. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa campuran aspal memiliki kekuatan struktural yang baik, sehingga mampu mendistribusikan beban kendaraan secara merata dan mencegah kerusakan seperti alur (rutting) atau sobekan (tearing) pada permukaan jalan. Dengan demikian, campuran aspal yang memiliki stabilitas tinggi cenderung lebih tahan lama dan

memberikan kenyamanan berkendara, khususnya pada jalan yang dilalui kendaraan berat atau berkecepatan tinggi.



Gambar 7. Pengujian Marshall

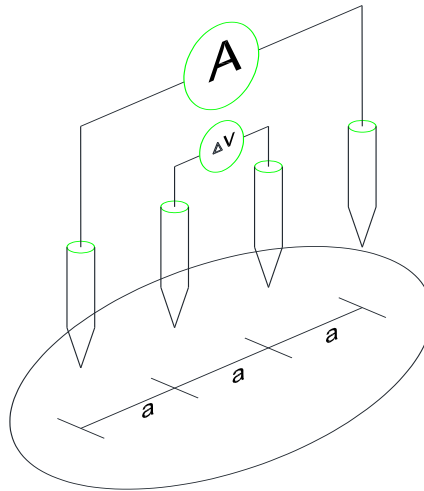
2.9 Pengujian Electrical Resistivity

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 Environment Performance dari Campuran Aspal Panas

Efek abu batu (SD) dan fly ash (FA) pada konsumsi energi yang diperlukan untuk membuat campuran aspal sebagai filler serta GWP, ADP, EP, dan AP dipelajari. Nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan dengan komposisi campuran pada HMA untuk memprediksi kriteria penerimaan SD dan FA sebagai filler.

Selanjutnya, faktor dampak lingkungan untuk 1 m³ (campuran CB) dihitung dengan mengalikan jumlah pembentuk CB. Dalam bagian ini, GWP_{mix}, ADP_{mix}, ODP_{mix}, PoCP_{mix}, AP_{mix}, dan EP_{mix} ditentukan.

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)