

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pada tahap awal perkembangannya, jalan raya merupakan jalur tapak alami yang terbentuk oleh perpindahan manusia dan hewan antarwilayah, kemudian disempurnakan menjadi lintasan sederhana yang diratakan untuk memfasilitasi perjalanan. Penemuan roda menandai perubahan fungsi yang signifikan, menjadikan jalan sebagai prasarana krusial bagi aktivitas perdagangan dan mobilitas. Selanjutnya, revolusi industri dan hadirnya kendaraan bermotor menuntut lahirnya standar baru dalam perancangan dan pengelolaan jalan. Dalam konteks modern, jalan raya dipahami sebagai sistem rekayasa yang kompleks tersusun atas lapisan-lapisan pondasi yang dirancang secara ilmiah, dilapisi permukaan perkerasan yang halus, serta dilengkapi rambu dan marka guna menjamin keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi bagi seluruh penggunaannya (Lay,1992)

Pelaksanaan pekerjaan jalan membutuhkan perencanaan yang tepat dan akurat sesuai dengan kondisi di lapangan. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pembangunan jalan diantaranya adalah tingkat pelayanan dan fungsi kapasitas jalan seperti bangunan pelengkap untuk prasarana lalu lintas (Maulidya, 2018). Pengaspalan sering kali dilakukan melalui pembentukan perkerasan lentur, dengan bahan pengisi sebagai komponen penting dalam proses tersebut. Sebagai hasil dari proses penghancuran batu alam, bisnis infrastruktur transportasi telah lama menggunakan debu batu (SD) di wilayah yang memiliki sumber daya batu yang melimpah. Secara khusus, pembangunan jalan fleksibel telah dilakukan dengan memanfaatkan cara tradisional. Meskipun demikian, masih ada wilayah yang tidak memiliki cadangan batu dan pasir lokal yang cukup, yang mengakibatkan impor batu dan SD dari sumber luar. Hal ini mengakibatkan peningkatan besar dalam biaya yang terkait dengan pembuatan jalan fleksibel. (Kemmla Dewi & Aris Krisdiyanto, 2023).

Aspal Campuran Panas (Hot Mix Asphalt / HMA) memainkan peran penting dalam infrastruktur jalan modern karena sifatnya yang unggul, seperti daya tahan, kestabilan, dan fleksibilitas, sehingga menjadikannya pilihan utama untuk permukaan jalan di seluruh dunia, mencakup sekitar 95% jalan beraspal. HMA adalah material komposit yang terutama terdiri atas agregat yang diikat oleh aspal sebagai pengikat, dan dirancang untuk menahan beban lalu lintas serta pengaruh lingkungan sepanjang masa layannya. Namun, meningkatnya kekhawatiran terhadap degradasi lingkungan, eksploitasi sumber daya, dan keberlanjutan material konstruksi telah mendorong perlunya pendekatan inovatif dalam desain campuran



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

pendekatan tersebut adalah penggunaan Recycled Concrete yaitu hasil daur ulang limbah konstruksi dan pembongkaran sebagai alternatif berkelanjutan pengganti agregat alam. RCA terbukti memiliki sifat mekanis yang memadai sekaligus mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan produksi aspal (Suzuki, 2014a, 2015a). Kombinasi keunggulan kinerja dan

keberlanjutan menjadikan RCA sebagai material yang menjanjikan dalam pengembangan infrastruktur yang ramah lingkungan.

Perilaku mekanik HMA yang mengandung RCA dipengaruhi oleh karakteristik unik RCA itu sendiri, khususnya keberadaan mortar sisa pada permukaan partikel daur ulang. Mortar ini umumnya memiliki porositas dan daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alam, sehingga dapat menimbulkan variabilitas kinerja HMA, terutama dalam hal daya tahan, ketahanan terhadap retak, dan kerentanan terhadap kelembapan (Pasandín & Pérez, 2013, 2014b) Meskipun tantangan teknis tersebut ada, RCA tetap menarik perhatian karena manfaat lingkungannya. Penggunaannya mendukung ekonomi sirkular dengan mengalihkan limbah dari tempat pembuangan akhir dan mengurangi permintaan agregat alam. Bila diproses dan dirancang dengan baik, RCA dapat menghasilkan campuran aspal dengan sifat mekanis yang sebanding dengan campuran berbasis agregat konvensional (Kareem et al., 2018). Oleh karena itu, meskipun masih terdapat tantangan teknis, urgensi lingkungan memperkuat alasan untuk mengeksplorasi dan mengoptimalkan penggunaan RCA dalam campuran aspal.

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) adalah metode uji non-destruktif yang banyak digunakan dalam ilmu material dan teknik sipil untuk mengevaluasi kualitas internal, keseragaman, dan homogenitas bahan semen serta campuran aspal. Metode ini mengukur waktu yang dibutuhkan pulsa ultrasonik untuk melewati suatu material; kecepatan yang lebih tinggi menunjukkan kerapatan dan integritas material yang lebih baik. Dalam HMA yang dimodifikasi dengan RCA, UPV menjadi alat yang berguna untuk mendeteksi ketidakseragaman atau kelemahan yang diakibatkan oleh variabilitas sifat RCA. Meskipun nilai UPV spesifik bergantung pada proporsi campuran dan jenis material yang digunakan, metode ini memungkinkan perbandingan antar-campuran dan membantu menentukan kelayakan serta potensi kinerja material (Al-Mufti & Fried, 2017; Kareem et al., 2018). Relevansinya tidak hanya dalam menilai kualitas konstruksi, tetapi juga dalam memprediksi daya tahan jangka panjang dan performa struktural.

Parameter akustik penting lainnya adalah impedansi akustik, yang didefinisikan sebagai hasil kali antara densitas material dan kecepatan gelombang di dalamnya. Dalam konteks material aspal, impedansi berfungsi sebagai indikator kekakuan dan kemampuan untuk mentransmisikan gelombang mekanik, yang keduanya penting bagi integritas struktural dan daya tahan perkerasan. Impedansi yang tinggi biasanya berkorelasi dengan kekakuan tinggi, yang menguntungkan untuk daya dukung beban. Namun, penggunaan RCA dan material daur ulang lainnya dapat mengubah karakteristik impedansi HMA karena perbedaan densitas dan struktur internal material (Jiang et al., 2018; Pasandín & Pérez, 2014b). Oleh



ukuran impedansi memberikan wawasan tambahan tentang campuran aspal yang dimodifikasi dan kesesuaiannya untuk lalu lintas dan iklim.

ngka pengujian non-destruktif tersebut, Effective Flow Resistivity sebagai parameter turunan yang merepresentasikan tahanan aliran cairan pori campuran aspal, yang secara kumulatif dipengaruhi oleh

densitas massa dan kecepatan rambat gelombang; nilai EFR yang lebih tinggi umumnya menunjukkan pemadatan dan kontinuitas matriks yang lebih baik, sedangkan penurunan EFR mengindikasikan struktur yang lebih terbuka dan berpotensi meningkatkan kapasitas redaman akustik (Biligiri & Kaloush, 2009; Biligiri & Way, 2014; Singh et al., 2023).

Selain parameter akustik dan struktural, karakteristik volumetrik juga fundamental bagi performa campuran aspal. Voids in Mixture (VIM) mengacu pada total rongga udara dalam campuran yang dipadatkan, yang berdampak langsung pada daya tahan, kerentanan terhadap kelembapan, dan permeabilitas. Voids in Mineral Aggregate (VMA) adalah ruang kosong dalam kerangka agregat yang tersedia untuk diisi oleh aspal, sementara Voids Filled with Bitumen (VFB) menunjukkan sejauh mana VMA tersebut telah terisi oleh binder. Ketiga parameter ini saling bergantung dan sangat penting untuk menentukan kemudahan pemadatan, kestabilan, dan ketahanan lelah campuran (Lagos-Varas et al., 2022; Zou et al., 2023) Keseimbangan antara VIM, VMA, dan VFB diperlukan agar campuran memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan, terutama bila material daur ulang digunakan dalam komposisinya.

Penggunaan material daur ulang seperti RCA serta penyesuaian kadar aspal dalam desain campuran dapat secara signifikan memengaruhi ketiga parameter tersebut. Peningkatan kadar aspal biasanya memperkuat kohesi campuran dan mengurangi retak dengan meningkatkan fleksibilitas dan sifat adhesif. Namun, kandungan binder yang berlebihan dapat menyebabkan rutting (aluran) dan mengurangi rongga udara, yang pada akhirnya berdampak negatif pada daya tahan dan kemampuan penyerapan suara. Campuran yang lebih padat dan kurang pori akan cenderung memantulkan suara. (Lagos-Varas et al., 2022; Xing et al., 2022; Zou et al., 2023) oleh karena itu, kalibrasi kadar aspal yang cermat diperlukan untuk mencapai keseimbangan antara performa mekanik dan akustik, khususnya pada campuran yang menggunakan material daur ulang.

Penelitian terbaru juga menyoroti peran filler mineral, seperti Semen Portland Komposit (PCC), dalam meningkatkan kualitas campuran aspal. PCC adalah semen campuran yang mengandung klinker, abu terbang, dan material pozzolan lainnya. Kehadirannya dalam campuran terbukti dapat meningkatkan daya tahan, kekakuan, dan ketahanan terhadap kelembapan. PCC membantu memperkuat adhesi antara binder dan agregat, mengurangi potensi stripping, serta meningkatkan umur lelah perkerasan (Dulaimi et al., 2017; Pasandín & Pérez, 2015b). Peningkatan ini sangat relevan saat RCA digunakan, karena PCC dapat menutupi kekurangan RCA, seperti porositas tinggi dan ikatan antar-partikel yang lemah.

Meskipun manfaat RCA dan PCC telah didokumentasikan secara luas, penelitian masih membahas keduanya secara terpisah. Sangat penting untuk mengeksplorasi efek gabungan RCA dan PCC dalam satu penelitian yang lebih sedikit lagi yang menganalisisnya dari sudut pandang yang mencakup karakteristik volumetrik, mekanik, dan akustik. Kesenjangan ini membatasi pemahaman terhadap interaksi antara RCA dan PCC yang dapat menghambat pengembangan campuran yang optimal secara



kinerja maupun keberlanjutan (Pasandín & Pérez, 2014b, 2015a).

Beberapa studi sebelumnya mengusulkan bahwa penggunaan gabungan pengukuran seperti UPV untuk kualitas struktural, dan impedansi untuk kekakuan, untuk kemampuan meredam suara dapat menjadi pendekatan holistik dalam mengevaluasi performa material aspal maju. Misalnya, UPV bermanfaat dalam menilai konsistensi internal dan kerapatan, sementara impedansi memberikan gambaran tentang ketahanan gelombang dan kekuatan mekanis (Yan et al., 2013). Jika digunakan secara terpadu, ketiga parameter ini dapat menjadi kerangka evaluasi yang kuat untuk desain material perkerasan berkelanjutan yang memanfaatkan sumber daya daur ulang tanpa mengorbankan kualitas (Costa et al., 2020).

Di sisi lain, Damping Acoustical Measurement Parameter (DAMP) diperkenalkan sebagai indeks akustik tak berdimensi yang merangkum kemampuan campuran HMA untuk mendisipasi energi gelombang suara melalui mekanisme disipasi internal, seperti gesekan viskoelastik dalam mastic, kehilangan energi pada kontak antar-agregat, dan aliran udara di dalam pori; nilai DAMP yang lebih tinggi secara umum berkorelasi dengan kapasitas peredaman yang lebih baik dan sering kali berhubungan terbalik dengan tahanan aliran atau impedansi (EFR dan Z), sehingga memberikan cara yang ringkas untuk membandingkan berbagai desain campuran maupun konfigurasi lapisan dalam konteks pengendalian kebisingan lalu lintas (Ongel & Harvey, 2010; Rochat & Read, 2013; Biligiri & Way, 2014).

Dari uraian tersebut diatas menjadi latar belakang untuk mengadakan penelitian di laboratorium dan menuliskannya dalam bentuk tulisan dengan judul : **“Pemanfaatan Limbah Beton Daur Ulang Dan Semen Sebagai Filler Untuk Meningkatkan Kerapatan Serta Mengevaluasi Sifat Akustik Pada Campuran Aspal Berkelanjutan”**.

### 1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh gabungan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dan Semen Portland Composite Cement (PCC) terhadap parameter volumetrik, dan sifat akustik Hot Mix Asphalt, khususnya dengan variasi kadar aspal dan ketebalan lapisan.

### 1.1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kadar aspal, ketebalan lapisan, dan penggunaan RCA serta PCC terhadap karakteristik volumetrik, sifat mekanik m, serta kinerja akustik, untuk menghasilkan desain campuran HMA yang nis dan berkelanjutan.



### Penelitian

ini memberikan kontribusi pada pengembangan desain HMA daur ulang dengan mempertimbangkan kinerja struktural, akustik, sekaligus menyediakan kerangka evaluasi multi-parameter yang

dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan perkerasan jalan ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi, khususnya konstruksi jalan raya. Apabila penelitian ini mendapatkan hasil yang positif, semoga dapat digunakan pada konstruksi jalan raya di Indonesia.

#### 1.1.4 Batasan Masalah

Penelitian terkait bubuk beton daur ulang sangat luas, sehingga perlu untuk membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah.

1. Penelitian yang dilakukan berbentuk eksperimental di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
2. Beton daur ulang diperoleh dari limbah beton di laboratorium dengan mutu beton 20-40 MPa di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
3. Jenis aspal yang digunakan yaitu aspal minyak dengan penetrasi 60/70. Lapisan yang diuji lapisan aspal AC-BC.
4. Filler yang digunakan adalah semen PCC
5. Gradasi campuran mengikuti spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6, dan pengujian material yang dilakukan mengacu pada standar SNI.
6. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan volume campuran dengan jumlah sampel terbatas, dan tidak mencakup uji dalam skala besar atau aplikasi langsung pada proyek konstruksi

### 1.2 Landasan Teori

#### 1.2.1. Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

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



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

gan konstruksi jalan yang digunakan di seluruh dunia diawali oleh mbangkan oleh Thomas Telford (1757-1834) dan John London (1836). Konstruksi tersebut dilapisi dengan lapisan aus di mana sebagai bahan pengikatnya, dan teknologi ini kemudian diterapkan sebagai konstruksi jalan global. Selanjutnya, metode konstruksi

perkerasan jalan dengan menggunakan campuran aspal panas (Hot Mix) dikembangkan, dan jenis perkerasan ini dikenal sebagai perkerasan lentur. Saat ini, teknologi perkerasan kaku (rigid pavement) telah dikembangkan sebagai alternatif pengganti perkerasan lentur (flexible pavement). Perkerasan kaku adalah perkerasan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat sehingga memiliki tingkat kekakuan yang relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkerasan lentur, sehingga lebih sering disebut sebagai perkerasan kaku (Woro Sukarno, 2022). Karena kemajuan teknologi dan pembangunan di segala bidang maka jalan mengalami perkembangan sesuai dengan tingkat penggunaan, fungsi, dan klasifikasinya serta segi konstruksinya. Berdasarkan fungsinya jalan dapat dibedakan atas :

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

### 1.2.2. Efek Kebisingan Ban terhadap Karakteristik dan Desain Permukaan Jalan Raya

Kebisingan lalu lintas pada kecepatan menengah–tinggi terutama dipicu interaksi ban–perkerasan: pada skala mikro, kontak telapak aspal memunculkan gesekan dan “stick–slip”, sedangkan pada skala pori/tekstur, aliran kompresi udara di celah dan rongga memicu “air-pumping” serta radiasi gelombang bunyi; besarnya dipengaruhi kecepatan, beban sumbu, pola telapak, kekakuan ban, dan kondisi lingkungan (kering/basah, temperatur) yang mengubah mekanika kontak dan aliran (Peng et al., 2022; Bozkurt et al., 2022; Li et al., 2025). Karakter akustik permukaan ditentukan kombinasi tekstur (makro/mega), kadar rongga dan konektivitas pori, kekakuan dinamis, serta arsitektur lapis; perkerasan berpori (OGFC/PA) bertindak sebagai penyerap melalui *visco-inertial losses*, tetapi sensitif terhadap penyumbatan pori dan penuaan sehingga memerlukan pemeliharaan (Li et al., 2024; Wu et al., 2023). Desain berlapis seperti *double-layer porous asphalt* memperluas pita frekuensi yang diredam, sementara pengaturan ketebalan dan modulus mengendalikan komponen getar-struktur; pemanfaatan pendekatan ini perlu menyeimbangkan target akustik dengan stabilitas, ketahanan aus, dan keselamatan operasional (Liao et al., 2024; Castro-Fresno et al., 2024).



#### 1 Aspal

aspal yang digunakan di Indonesia mencakup beberapa variasi isesuaikan dengan fungsi dan kondisi lalu lintas jalan. Laston (ton) merupakan beton aspal bergradasi menerus yang umum digunakan dengan beban lalu lintas berat dan memiliki stabilitas tinggi

sebagai karakteristik utama, dengan tebal nominal minimum 4–6 cm tergantung fungsinya, meliputi AC-WC (lapis aus, tebal minimum 4 cm), AC-BC (lapis pengikat, tebal minimum 5 cm), dan AC-Base (lapis pondasi, tebal minimum 6 cm). Laston (Lapis Tipis Aspal Beton) atau Hot Rolled Sheet (HRS) menggunakan gradasi senjang dengan karakteristik durabilitas dan fleksibilitas tinggi, terdiri dari HRS-WC (lapis aus, tebal minimum 3 cm) dan HRS-Base (lapis pondasi, tebal minimum 3,5 cm). Latasir (Lapisan Tipis Aspal Pasir) dirancang untuk jalan lalu lintas ringan di wilayah dengan ketersediaan agregat kasar terbatas, memiliki ketahanan alur rendah sehingga tidak disarankan untuk lalu lintas berat atau tanjakan, dikenal juga sebagai Sand Sheet (SS) atau Hot Rolled Sand Sheet (HRSS) dengan variasi HRSS-A (tebal nominal 1,5 cm) dan HRSS-B (tebal nominal 2 cm, gradasi lebih kasar). Lapis perata digunakan untuk meratakan dan membentuk penampang melintang pada permukaan jalan yang ada, dapat dibuat dari semua jenis beton aspal namun diberi tanda huruf “L” untuk membedakannya, misalnya AC-WC (L), AC-BC (L), atau AC-Base (L). SMA (Split Mastic Asphalt) merupakan beton aspal bergradasi terbuka dengan lapisan aspal tebal dan tambahan fiber selulosa untuk menstabilkan kadar aspal tinggi, diaplikasikan pada jalan dengan beban lalu lintas berat, tersedia dalam tipe SMA 0/5 (tebal 1,5–3 cm), SMA 0/8 (tebal 2–4 cm), dan SMA 0/11 (tebal 3–5 cm). HSMA (High Stiffness Modulus Asphalt) adalah beton aspal yang menggunakan aspal berpenetrasi rendah 30/40 untuk meningkatkan kekakuan, terutama digunakan pada perkerasan jalan yang menanggung beban lalu lintas berat.

#### 1.2.4. Rancangan Campuran Aspal Beton

Campuran beton aspal merupakan kombinasi antara agregat dan aspal, dengan atau tanpa bahan tambahan, di mana agregat umumnya diambil dari lokasi terdekat dengan area penggunaannya untuk efisiensi dan kesesuaian karakteristik material. Di Indonesia, perancangan campuran umumnya dilakukan dengan metode empiris menggunakan alat Marshall, yang melibatkan serangkaian tahapan terstruktur. Tahap awal mencakup pengujian sifat agregat dan aspal untuk memastikan kualitas material yang digunakan. Selanjutnya, campuran dirancang di laboratorium untuk menghasilkan rumus campuran rancangan atau Design Mix Formula (DMF) yang kemudian dikalibrasi dengan instalasi pencampuran yang akan dipakai. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan percobaan produksi di instalasi pencampuran, dilanjutkan dengan proses penghamparan dan pemadatan campuran percobaan guna memastikan bahwa kinerja campuran sesuai dengan spesifikasi teknis dan kondisi lapangan yang diharapkan.



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

**Tabel 1** Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-Sifat Campuran	Laston		
	AC-WC	AC-BC	AC-Base
Tebal per bidang		75	112
Ukuran ayakan 0,075 mm	Min.		0,6
Kadar aspal	Maks		1.4
Ukuran campuran (%)	Min.		3.0

	Maks	5.0	
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800	1800
	Min.	2	3
Pelelehan (mm)	Maks	4	6
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.	90	
Rongga dalam campuran (%)	Min.	2	

Sumber : Spesifikasi Umum 2025 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan

### 1.2.5. Recycled Concrete Aggregate (RCA)

Pelaksanaan daur ulang agregat beton (*Recycled Concrete Aggregate/RCA*) didasarkan pada prinsip konstruksi berkelanjutan dan efisiensi sumber daya alam, mengingat meningkatnya tekanan terhadap industri konstruksi untuk meminimalkan limbah dan dampak lingkungan. Penggunaan RCA menawarkan manfaat signifikan, seperti pengurangan konsumsi agregat alami dan jejak karbon produksi beton, meskipun sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanisnya umumnya lebih rendah dibanding agregat alami dan memerlukan perhatian khusus dalam desain campuran (Wan et al., 2012; Manzi et al., 2013; W. Zhao et al., 2011; Liu & Peng, 2019; Qureshi et al., 2016). Mortar lama yang melekat pada RCA memiliki porositas dan reaktivitas kimia lebih tinggi dibanding NA, sering terkontaminasi material lain, serta berpotensi menurunkan kekuatan mekanis dan durabilitas beton akibat retakan mikro. Variabilitas sifat RCA sangat dipengaruhi oleh proporsi campuran, kekuatan beton induk, lama penggunaan, dan kondisi paparan, sehingga diperlukan karakterisasi fisikokimia secara menyeluruh sebelum digunakan kembali. Meskipun demikian, dari aspek ketahanan terhadap benturan dan keausan, RCA dapat memiliki performa setara atau lebih baik dibanding NA, dan penggunaannya dalam campuran aspal panas (HMA) semakin diminati. Lapisan aspal pada RCA diyakini mampu mengurangi pelepasan bahan kimia dari mortar lama, dan penelitian menunjukkan bahwa RCA dari beton konvensional layak digunakan dalam HMA, meskipun kinerja RCA dari beton berkekuatan rendah masih jarang diteliti. Penelitian ini berfokus pada karakterisasi sifat fisikokimia dan mekanik RCA dari beton fondasi berkekuatan rendah serta evaluasi kinerja HMA dengan variasi proporsi substitusi RCA, dengan tujuan memberikan panduan teknis untuk pemanfaatan RCA secara efektif dan berkelanjutan dalam konstruksi perkerasan lentur.

### 1.2.6. Agregat



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

Agregat umumnya didefinisikan sebagai formasi dari kerak bumi yang stik keras dan padat, baik dalam bentuk massa besar maupun ng berfungsi sebagai komponen utama dalam perkerasan jalan 0–95% berdasarkan berat atau 75–85% berdasarkan volume, ung, ketahanan, dan kualitas perkerasan jalan sangat ditentukan agregat serta komposisinya dengan material lain (Induwati et al., merican Society for Testing and Materials (ASTM), agregat

merupakan bahan yang terbentuk dari mineral padat dalam bentuk massa besar atau fragmen kecil, berupa material berbutir yang terdiri dari komposisi mineral seperti pasir, kerikil, batu pecah, atau mineral lain, yang dapat berasal dari sumber alami maupun hasil pengolahan dan digunakan sebagai komponen utama konstruksi jalan (Akbar et al., 2021) Kemampuan perkerasan jalan memikul beban lalu lintas dan bertahan terhadap pengaruh cuaca bergantung pada sifat-sifat agregat, sehingga pemeriksaan terhadap karakteristik fisiknya meliputi gradasi, kebersihan, kekerasan, ketahanan, bentuk butir, tekstur permukaan, porositas, daya serap air, berat jenis, dan daya pelekatan dengan aspal menjadi hal yang esensial. Berdasarkan ukuran partikel, agregat dibedakan menjadi agregat kasar, yaitu agregat yang tertahan pada saringan No. 8 dan harus berupa batu pecah atau kerikil yang kering, bersih dari lempung, kotoran, bahan organik, maupun material lain yang tidak diinginkan, serta mendekati gradasi yang ditetapkan; dan agregat halus, yaitu material yang lolos saringan No. 8 namun tertahan pada saringan No. 200, yang dapat berupa pasir, batu pecah, atau kombinasi keduanya, dengan fungsi utama meningkatkan kuat tekan dan mengurangi deformasi permanen melalui mekanisme interlocking dan gesekan antar partikel. Seluruh spesifikasi perkerasan mensyaratkan distribusi ukuran partikel agregat dalam rentang tertentu dengan proporsi yang terukur, di mana gradasi agregat ditentukan melalui analisis saringan untuk memastikan distribusi ukuran yang sesuai (Farida & Noer Hakim, 2021). Menurut Silvia (1990), gradasi agregat terbagi menjadi tiga jenis, yaitu gradasi seragam (uniform graded) atau terbuka (open graded) yang memiliki ukuran butir hampir sama dengan sedikit agregat halus sehingga menghasilkan rongga besar, permeabilitas tinggi, stabilitas rendah, dan berat isi kecil; gradasi rapat (dense graded) atau menerus (well graded) yang mengandung butiran dari kasar hingga halus sehingga menghasilkan campuran dengan stabilitas tinggi dan relatif kedap air; serta gradasi senjang (gap graded) yang kehilangan atau memiliki jumlah sangat sedikit pada salah satu fraksi ukuran agregat tertentu, sehingga distribusi ukuran butirnya tidak lengkap. (Induwati et al., 2023)..(Farida & Noer Hakim, 2021).

### 1.2.7. Bahan Pengisi (*Filler*)

Penggunaan Portland Composite Cement (PCC) sebagai bahan pengisi (filler) pada campuran aspal menawarkan manfaat kinerja dan ketersediaan. Filler didefinisikan sebagai material yang lolos saringan No.200 (0,075 mm) mencakup kapur hidrat, abu terbang, semen Portland, dan abu batu yang menurunkan sensitivitas campuran terhadap suhu serta mengurangi rongga udara (Yando, 2023). Proporsinya harus dijaga: kadar berlebih membuat campuran getas dan rentan retak akibat lalu lintas, sedangkan kadar terlalu rendah melembek pada suhu tinggi.



oleh dust proportion/dust binder ratio ( $\approx 0,6-1,2$  terhadap kadar ditempuh dengan memodifikasi gradasi halus untuk menambah , mengurangi rongga yang harus diisi aspal, dan mengoptimalkan iarti, 2024). Mengacu pada SNI 15-2049-2004 (Semen Portland), ialah semen hidrolis dari penggilingan terak kaya kalsium silikat senyawa kalsium sulfat rujukan ini menegaskan sifat dasar

material yang kerap dipakai sebagai filler.

Dalam konteks ini, PCC berperan bukan sebagai pengikat hidrolis seperti pada beton, melainkan sebagai partikel mineral halus yang memodifikasi reologi mastic. Kehalusan dan luas permukaannya menaikkan viskositas mastic, memperbaiki stabilitas campuran, serta membantu pengisian pori mikro (Rahmawati et al., 2025). Sifat kimia (alkalinitas CaO) meningkatkan adhesi aspal–agregat dan ketahanan terhadap pengelupasan kelembaban (Ahmad & Putra, 2025), sementara berat jenis dan bentuk partikel memengaruhi kepadatan serta voids in mineral aggregate (VMA) (Y. Dengan demikian, pemilihan PCC sebagai filler menuntut pengendalian kadar dan parameter mutu (kelulusan No.200, kehalusan, berat jenis) agar tercapai keseimbangan antara stabilitas suhu tinggi, ketahanan retak, dan workability campuran (Yuniarti, 2024; Alfarikhi et al., 2024).

### 1.2.8. Spesifikasi Bahan Pengikat

Aspal atau bitumen didefinisikan sebagai material berwarna hitam kecoklatan yang memiliki sifat termoplastik, yang berarti material ini dapat mencair ketika dipanaskan hingga suhu tertentu dan mengeras kembali ketika suhunya menurun (Manual Perkerasan Campuran Beraspal Panas, Buku 1, Petunjuk Umum). Dalam konstruksi perkerasan lentur, aspal digunakan sebagai salah satu komponen minor dengan proporsi umumnya berkisar antara 4 - 10% berdasarkan berat atau 10 - 15% berdasarkan volume, meskipun harganya relatif mahal. Aspal yang digunakan saat ini umumnya diperoleh melalui proses distilasi minyak bumi, namun aspal alam dari Pulau Buton juga semakin sering dimanfaatkan.

Beton aspal dibuat melalui proses pencampuran agregat dan aspal, baik dengan atau tanpa bahan tambahan. Material-material tersebut dicampur di instalasi pencampuran pada suhu tertentu, kemudian diangkut ke lokasi, dan dihamparkan serta dipadatkan. Suhu pencampuran ditentukan sesuai dengan jenis aspal yang digunakan. Jika semen aspal digunakan, suhu pencampuran umumnya berada antara 145°C hingga 155°C, sehingga campuran ini disebut sebagai beton aspal campuran panas atau hotmix. Berdasarkan gradasinya, campuran aspal panas ini dibedakan menjadi tiga jenis: campuran dengan gradasi rapat, gradasi senjang, dan gradasi terbuka. Ketebalan minimum penghamparan setiap jenis campuran sangat bergantung pada ukuran maksimum agregat yang digunakan. Ketebalan padat campuran aspal harus lebih dari dua kali ukuran butir agregat maksimum yang digunakan. Beberapa jenis beton aspal campuran panas telah diterapkan, namun dalam penelitian ini, jenis yang ditinjau adalah AC-BC (*Asphalt Concrete-Bearing Course*).

Lapis aspal beton (laston), yang dikenal sebagai AC-BC (*Asphalt Concrete*) diterapkan sebagai bagian dari lapisan permukaan yang terdiri dari lapisan pondasi atas (*Base Course*) dan lapis aus (*Wearing Course*). Lapis ini menggunakan agregat dengan gradasi rapat atau menerus dan diterapkan pada jalan yang menahan beban lalu lintas berat. AC-BC merupakan lapisan antara dalam struktur perkerasan untuk mencegah perpindahan permukaan ke lapisan pondasi. Campuran aspal panas AC-BC



memiliki ukuran agregat maksimum sebesar 25,4 mm, dengan ketebalan minimum lapisan padat sebesar 6,0 cm. Toleransi ketebalan pada setiap lapisan campuran aspal tidak boleh melebihi 4,0 mm (Kewa, Handayani, dan Anis 2024). Hal ini membuat campuran AC-BC sangat sensitif terhadap variasi dalam proporsi campurannya.

### 1.2.9. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan Impedansi Akustik

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) merupakan metode pengujian non-destruktif yang digunakan untuk menilai kualitas internal material padat, termasuk campuran aspal, dengan mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui media tersebut. Prinsip dasarnya adalah bahwa gelombang ultrasonik akan merambat lebih cepat pada material yang padat, homogen, dan memiliki ikatan antar partikel yang baik, sedangkan keberadaan rongga udara, retakan, atau ketidakhomogenan akan memperlambat rambatan gelombang. Dalam konteks campuran aspal berkelanjutan yang menggunakan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dan semen sebagai filler, nilai UPV dapat menjadi indikator tingkat kerapatan dan kualitas ikatan antar agregat yang dipengaruhi oleh sifat fisik RCA dan distribusi filler di dalam matriks aspal. Penggunaan RCA dengan porositas lebih tinggi dibanding agregat alami dapat memengaruhi kecepatan rambat gelombang, sehingga interpretasi hasil UPV perlu mempertimbangkan karakteristik material daur ulang tersebut.

Impedansi akustik (acoustic impedance) merupakan parameter turunan dari pengukuran UPV yang didefinisikan sebagai hasil perkalian antara massa jenis material dan kecepatan rambat gelombang ultrasonik di dalamnya. Nilai impedansi akustik memberikan gambaran resistensi material terhadap perambatan gelombang suara atau getaran, di mana material dengan kerapatan dan kekakuan tinggi akan memiliki impedansi lebih besar. Dalam analisis campuran aspal yang mengandung RCA dan semen sebagai filler, impedansi akustik dapat digunakan untuk mengevaluasi konsolidasi struktural campuran, potensi refleksi gelombang pada batas antar material, serta kaitannya dengan sifat mekanis dan akustik, seperti kemampuan meredam kebisingan. Oleh karena itu, kombinasi pengukuran UPV dan impedansi akustik memberikan pendekatan komprehensif dalam menilai kualitas, homogenitas, dan performa campuran aspal berkelanjutan secara non-destruktif, mendukung pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan dan efisien.

### 1.2.10. Sifat Volumetrik dari Campuran Beton Aspal

Sifat volumetrik merupakan indikator utama dalam menilai kualitas dan stabilitas kinerja campuran aspal, yang berperan penting dalam mendukung ketahanan jangka panjang perkerasan. Tiga parameter utama yang digunakan adalah Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Mineral Aggregate Filler (VIM), dan Voids Filled with Mineral Filler (VFM). VMA menggambarkan persentase volume rongga udara yang ada dalam campuran aspal padat; nilai ini harus dijaga dalam kisaran 3–5% untuk memastikan campuran memiliki permeabilitas berlebihan yang mempercepat air dan udara, serta menghindari risiko bleeding pada suhu tinggi. VIM menunjukkan persentase volume total rongga antar butir agregat yang dapat



diisi oleh aspal dan udara; nilai minimal yang direkomendasikan adalah 14% untuk memastikan pelapisan agregat yang memadai dan mempertahankan fleksibilitas campuran. VFB merupakan persentase bagian VMA yang terisi oleh aspal, yang mencerminkan efisiensi pengisian rongga; nilai optimal berada pada rentang 65–75% untuk menjaga keseimbangan antara stabilitas struktural dan daya lentur campuran.

Penggunaan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dalam campuran berpotensi memengaruhi sifat volumetrik karena porositas dan daya serap aspal yang tinggi pada mortar lama yang melekat. Penelitian menunjukkan bahwa proporsi RCA yang tinggi cenderung meningkatkan VIM dan menurunkan VFB, sementara VMA dapat mengalami penurunan signifikan pada kadar RCA tertentu. Meski demikian, campuran dengan RCA hingga 33% masih dapat memenuhi kriteria desain seperti Superpave, asalkan pengaturan kadar aspal dan metode pemadatan dilakukan secara cermat. Pemahaman yang mendalam mengenai hubungan antara VIM, VMA, dan VFB sangat penting dalam perancangan campuran aspal berkelanjutan, terutama yang memanfaatkan RCA dan semen sebagai filler, guna memastikan hasil yang stabil, tahan lama, serta memenuhi persyaratan teknis untuk lapisan perkerasan jalan.

#### 1.2.11. Damping Acoustical Measurement Parameter

Damping Acoustical Measurement (DAMP) adalah suatu indeks akustik tak berdimensi yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan suatu material atau sistem dalam meredam energi gelombang suara. Secara konseptual, DAMP merepresentasikan sejauh mana energi akustik yang datang ke permukaan material dapat dikurangi melalui mekanisme disipasi internal, seperti gesekan viskoelastik dalam mastic, kehilangan energi pada kontak antar-agregat, serta aliran udara di dalam pori-pori mikro dan makro. Nilai DAMP yang lebih tinggi secara umum diinterpretasikan sebagai kapasitas peredaman yang lebih baik, sehingga material dengan DAMP besar cenderung lebih efektif mengurangi pantulan suara, getaran, dan kebisingan yang ditransmisikan. Dalam konteks rekayasa material, DAMP berguna sebagai parameter ringkas untuk membandingkan berbagai komposisi campuran atau konfigurasi lapisan tanpa harus selalu kembali ke detail spektrum frekuensi atau respon dinamis penuh. Indeks ini juga relevan untuk mendukung perancangan perkerasan jalan, panel akustik, atau elemen bangunan lain yang menuntut kinerja akustik tertentu, karena memungkinkan korelasi langsung antara karakteristik fisik–mikrostruktural material dengan perilaku peredaman yang terukur. Dengan demikian, DAMP berfungsi sebagai jembatan antara pengukuran akustik eksperimental dan pengambilan keputusan desain yang praktis.



#### Pustaka

##### Jahulu Terkait Pengaruh RCA Terhadap Campuran Aspal

elitian (Pasandín & Pérez, 2014, 2015; Qasrawi & Asi, 2016),  
*ycled Concrete Aggregate (RCA) dalam Hot Mix Asphalt (HMA)*  
erikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat volumetrik dan

kinerja mekanik campuran. Keunikan RCA terletak pada adanya lapisan mortar lama yang melekat di permukaan agregat, yang memiliki porositas tinggi dan daya serap aspal besar. Kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan Voids in Mix (VIM) dan penurunan Voids Filled with Bitumen (VFB) apabila kadar aspal tidak disesuaikan dengan tepat. Peningkatan VIM berimplikasi pada bertambahnya permeabilitas campuran, yang mempercepat degradasi akibat infiltrasi air, oksidasi pengikat, dan retakan mikro yang timbul karena beban lalu lintas berulang. Sebaliknya, penurunan VFB dapat mengurangi stabilitas struktural dan menurunkan kemampuan campuran untuk menahan deformasi plastis, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan umur layan perkerasan. Qasrawi & Asi (2016) juga menemukan bahwa semakin tinggi proporsi RCA, semakin besar pula sensitivitas campuran terhadap kelembapan, yang tercermin dari penurunan nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)*. Fenomena ini menunjukkan perlunya pengendalian sifat serap RCA dan pengaturan kadar pengikat agar ikatan aspal-agregat tetap optimal. Meski demikian, temuan dari ketiga penelitian ini mengindikasikan bahwa pada tingkat substitusi RCA rendah hingga menengah ( $\leq 30\%$ ), campuran HMA masih dapat memenuhi spesifikasi desain Marshall dan Superpave. Syaratnya, kadar aspal harus dioptimalkan, distribusi gradasi agregat dijaga, dan proses pemadatan dilakukan secara tepat untuk meminimalkan rongga udara berlebih. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan RCA memerlukan pendekatan desain yang adaptif. Dengan penyesuaian yang tepat, RCA tidak hanya mampu mempertahankan kinerja mekanik campuran, tetapi juga memberikan keuntungan lingkungan yang signifikan melalui pengurangan penggunaan agregat alami dan pemanfaatan kembali limbah beton secara berkelanjutan.

Pada penelitian (Singh et al., 2021), evaluasi terhadap penggunaan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dalam campuran Hot Mix Asphalt (HMA) dengan penambahan filler berbasis semen menunjukkan hasil yang signifikan terhadap peningkatan kinerja mekanik dan durabilitas. RCA, yang umumnya memiliki porositas tinggi dan daya serap aspal yang besar akibat keberadaan mortar lama, berpotensi menurunkan kekuatan dan meningkatkan sensitivitas terhadap kelembapan. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penambahan filler semen digunakan sebagai strategi modifikasi campuran. Filler semen berperan mengisi pori-pori RCA, sehingga mengurangi penyerapan aspal berlebih yang dapat menyebabkan defisiensi pengikat pada matriks campuran. Selain itu, partikel halus dari filler semen meningkatkan titik kontak antar agregat, memperkuat ikatan mekanis dan adhesi aspal terhadap permukaan agregat. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan pada nilai Indirect Tensile Strength (ITS) dan Tensile Strength Ratio (TSR), yang mengindikasikan peningkatan kekuatan tarik



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

n ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembapan (moisture) dan ini memperlihatkan bahwa kombinasi RCA dan filler semen memiliki dampak negatif sifat poros RCA terhadap performa mekanik. Peningkatan sisi kekuatan, struktur pori terbuka yang tetap terjaga pada penelitian ini memiliki implikasi positif terhadap performa akustik. Penelitian ini menunjukkan bahwa proporsi filler semen dan kadar aspal harus diatur secara

presisi untuk mencapai keseimbangan optimal antara stabilitas, fleksibilitas, durabilitas, dan kinerja akustik. Desain campuran yang tepat akan memastikan bahwa manfaat mekanik dan akustik dari penggunaan RCA dapat dimaksimalkan tanpa mengorbankan persyaratan teknis yang diperlukan untuk perkerasan jalan berkelanjutan.

Pada penelitian (Gul & Guler, 2014; Mikhailenko et al., 2020), Recycled Concrete Aggregate (RCA) digunakan sebagai pengganti agregat kasar alami dalam Hot Mix Asphalt (HMA) dengan proporsi 10–35%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kinerja mekanik campuran dapat tetap berada dalam batas spesifikasi apabila formulasi campuran dilakukan dengan perencanaan yang cermat. Gul & Guler (2014) menekankan bahwa keberhasilan pemanfaatan RCA sangat bergantung pada pengendalian parameter desain utama, seperti distribusi gradasi agregat, dust proportion, kadar aspal, serta pengaturan rongga udara. Kontrol yang tepat terhadap faktor-faktor ini memungkinkan campuran mempertahankan stabilitas Marshall, nilai flow yang sesuai, dan ketahanan terhadap deformasi permanen (rutting). Sementara itu, Mikhailenko et al. (2020) menyoroti bahwa sifat RCA sangat bervariasi tergantung pada mutu beton sumber, proporsi agregat alami di dalamnya, dan tingkat kontaminasi mortar lama yang melekat. Mortar ini umumnya memiliki porositas tinggi dan sifat penyerapan aspal yang signifikan, sehingga memerlukan karakterisasi menyeluruh sebelum digunakan untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi desain. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa dengan pengaturan desain yang tepat, RCA tidak hanya layak secara teknis tetapi juga berkontribusi positif terhadap keberlanjutan. Kedua studi sepakat bahwa pemanfaatan RCA mampu mengurangi ketergantungan pada agregat alami, sekaligus menurunkan emisi karbon yang dihasilkan dari proses produksi material baru. Namun, untuk mencapai hal tersebut, pengaruh sifat serap RCA harus dipertimbangkan dalam perhitungan kadar aspal agar campuran tidak mengalami kekurangan pengikat. Pendekatan desain berbasis kinerja yang mempertimbangkan karakteristik RCA secara detail memungkinkan tercapainya keseimbangan antara kinerja mekanik yang memadai, umur layan perkerasan yang panjang, dan manfaat lingkungan dari daur ulang material konstruksi.

Pada penelitian (Tan et al., 2023), analisis difokuskan pada keterkaitan antara penggunaan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dalam Hot Mix Asphalt (HMA) dengan parameter kekakuan dinamis (dynamic modulus) dan ketahanan terhadap deformasi plastis (rutting resistance). RCA, yang memiliki tekstur permukaan lebih kasar dibanding agregat alami, dapat meningkatkan interlock antar butiran agregat sehingga berpotensi memperbaiki ikatan mekanis di dalam campuran. Kondisi ini memberikan keuntungan dalam meningkatkan stabilitas



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

nya pada beban lalu lintas berulang. Namun, keberadaan mortar it pada RCA, dengan sifat porositas dan daya serap aspal yang irunkan kekakuan campuran, terutama apabila kadar aspal yang rendah. Penurunan kekakuan ini berdampak pada berkurangnya uran dalam mempertahankan bentuknya di bawah beban, yang ng dapat memicu deformasi permanen.

Penelitian ini merekomendasikan pengaturan proporsi RCA dan Voids in Mineral Aggregate (VMA) yang tepat untuk menjaga keseimbangan antara resistensi terhadap deformasi plastis dan fleksibilitas campuran. VMA yang terjaga memastikan bahwa lapisan aspal dapat melapisi agregat secara optimal sambil mempertahankan rongga udara yang diperlukan bagi ketahanan terhadap rutting.. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan desain yang memperhitungkan interaksi antara proporsi RCA, kadar aspal, dan karakteristik volumetrik seperti VMA. Dengan pengaturan yang tepat, RCA dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan stabilitas struktural sekaligus mempertahankan kinerja akustik, sehingga mendukung pengembangan perkerasan berkelanjutan yang memiliki performa mekanik dan lingkungan yang seimbang.

#### 1.4. Desain Konseptual

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

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

Masalah utama yang dihadapi dalam penggunaan semen dan abu batu, yaitu potensi dampaknya terhadap kuat tekan jalan dan lingkungan, akan diukur melalui kuat tekan Test untuk menentukan seberapa besar pengaruh kedua filler ini terhadap kekuatan dan daya tahan jalan. Selain itu, dampak lingkungan, termasuk emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari campuran aspal yang berbeda, akan dievaluasi. Dengan membandingkan hasil-hasil ini, solusi optimal yang tidak hanya meningkatkan kualitas jalan tetapi juga lebih ramah lingkungan diharapkan dapat



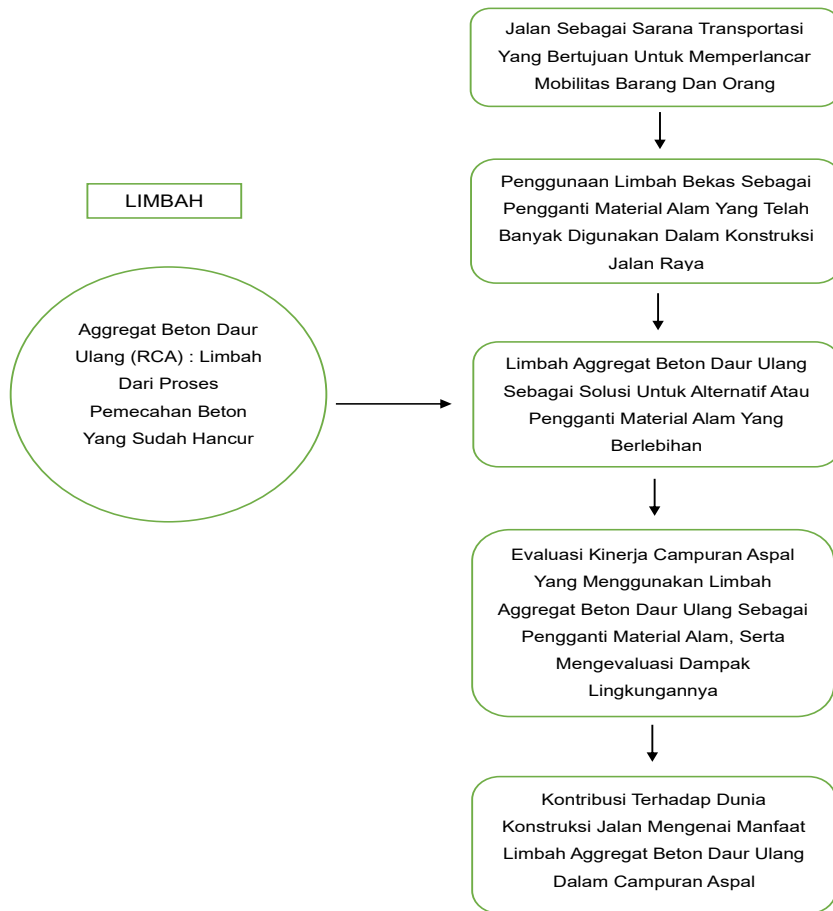
Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

tujuan jangka panjang penelitian ini adalah untuk memberikan nia konstruksi jalan raya di Indonesia dengan menyediakan data manfaat penggunaan limbah industri sebagai bahan konstruksi. sitif dapat diperoleh, penggunaan semen dan abu batu sebagai uran aspal diharapkan dapat diterapkan secara lebih luas,

membantu mengurangi ketergantungan pada bahan alam dan mengurangi emisi karbon dioksida, serta mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)



**Gambar 1.** Kerangka Konseptual

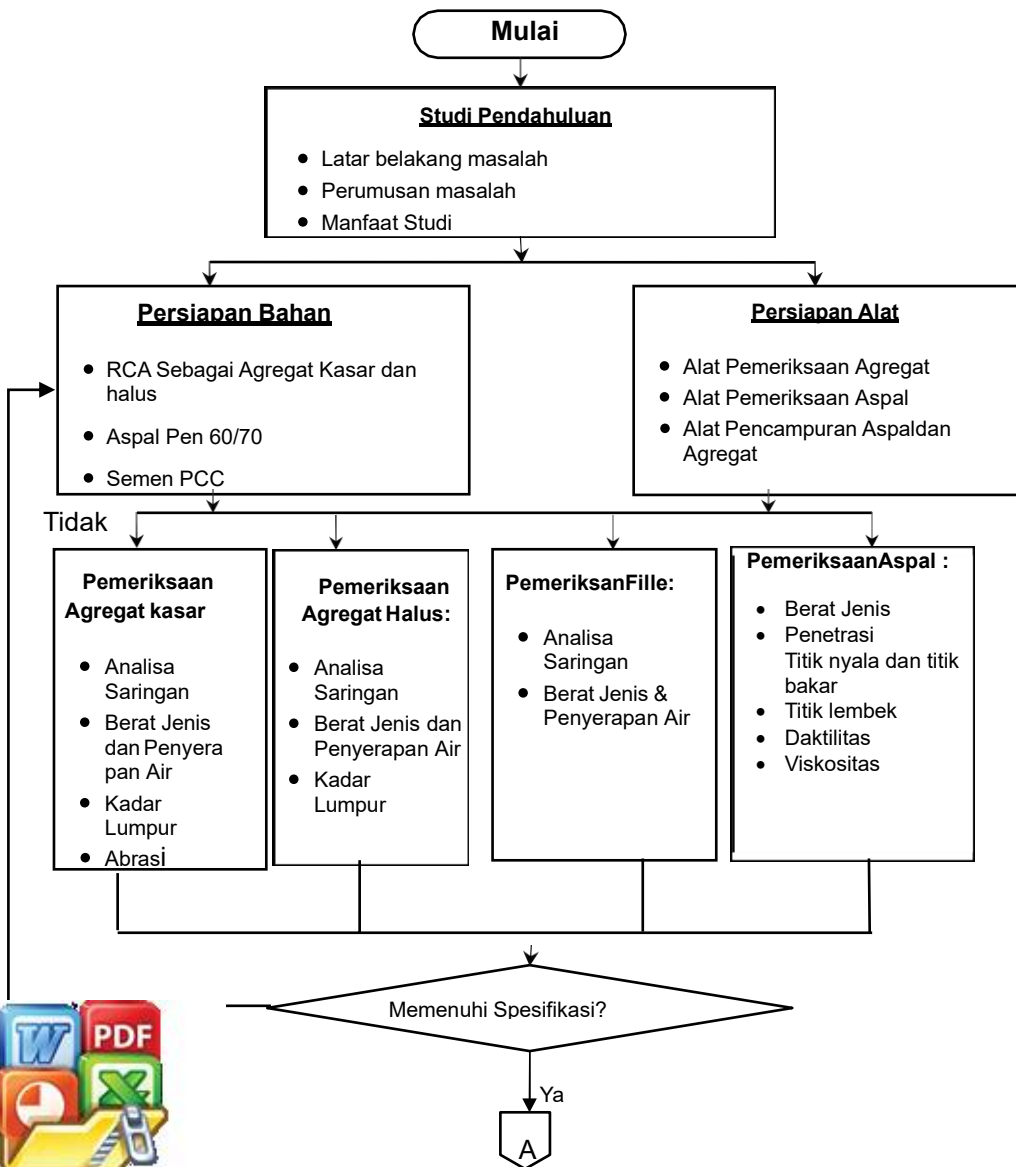


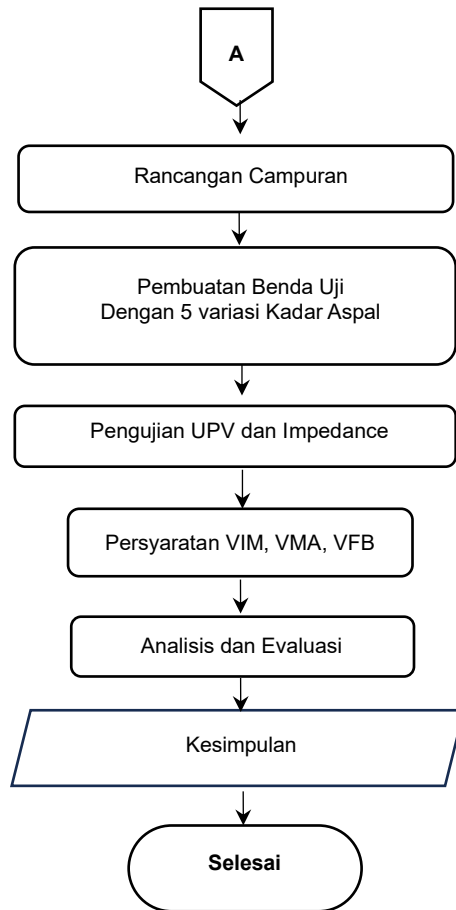
## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1. Waktu dan Lokasi Material

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin Makassar. Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan November 2024.

### 2.2. Bagan Alir Penelitian





**Gambar 2.** Diagram Alir Penelitian

### 2.3. Teknik Pengumpulan Data

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

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



#### Benda Uji dan Komposisi Campuran

Benda uji dalam penelitian ini berupa briket aspal berbentuk silinder 50 mm x 60 mm. Adapun beberapa komposisi campuran benda uji bel di bawah ini :

**Tabel 1. Ketebalan 70 mm**

Ukuran saringan		Berat dalam campuran (gr)					Komposisi Campuran
		Kadar Aspal (%)					
Inches	mm	5%	5.5%	6%	6.5%	7%	
1½"	37.500	-	-	-	-	-	Aggregat Kasar
1"	25.000	-	-	-	-	-	
¾"	19.000	55	55	54.16	53.62	53.07	
½"	12.500	178	177	176.70	176.15	175.61	
⅜"	9.500	64	63	62.73	62.19	61.64	
No.4	4.750	183	183	182.63	181.49	180.94	Aggregat Halus
No.8	2.360	238	237	236.95	236.40	235.86	
No.16	1.180	98	97	96.91	96.36	95.82	
No.30	0.600	123	122	121.45	120.91	120.36	
No.50	0.300	43	43	42.22	41.67	41.13	
No.100	0.150	46	46	45.15	44.60	44.06	Filler
No.200	0.075	34	33	32.87	32.33	31.78	
Pan ( <i>filler</i> )		78	77	76.82	76.28	75.73	
Aspal		60	66	72.00	78.00	84.00	Aspal
<b>Total</b>		<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	

**Tabel 2. Ketebalan 100 mm**

Ukuran saringan		Berat dalam campuran (gr)					Komposisi Campuran
		Kadar Aspal (%)					
Inches	mm	5%	5.5%	6%	6.5%	7%	
1½"	37.5	-	-	-	-	-	Aggregat Kasar
1"	25	-	-	-	-	-	
¾"	19	73.67	72.94	72.22	71.49	70.76	
½"	12.5	237.05	236.33	235.60	234.87	234.15	
⅜"	9.5	85.10	84.37	83.64	82.91	82.19	
No.4	4.75	244.16	243.44	242.71	241.98	241.25	Aggregat Halus
No.8	2.36	317.38	316.66	315.93	315.20	314.48	
No.16	1.18	130.67	129.94	129.21	128.48	127.76	
No.30	0.6	163.39	162.67	161.94	161.21	160.48	
No.50	0.3	57.75	57.02	56.29	55.57	54.84	
No.100	0.15	61.65	60.93	60.20	59.47	58.74	Filler
No.200	0.075	45.28	44.56	43.83	43.10	42.37	
Pan ( <i>filler</i> )		103.89	103.16	102.43	101.70	100.98	
Aspal		80.00	88.00	96.00	104.00	112.00	Aspal
<b>Total</b>		<b>1600</b>	<b>1600</b>	<b>1600</b>	<b>1600</b>	<b>1600</b>	



**1 Peralatan dan Material**

an dalam penelitian ini meliputi :

puter yang berfungsi untuk mengolah data

Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

- b. Satu set alat pengujian karakteristik material
- c. Automatic asphalt compactor
- d. Cetakan briket aspal
- e. Timbangan digital
- f. Termometer
- g. Nampan
- h. Kompor dan wajan

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

1. Aspal minyak penetrasi 60/70.
2. Semen
3. Agregat kasar
4. Agregat halus

Adapun persyaratan yang dijadikan acuan dalam pengambilan material adalah sebagai berikut.

**Tabel 3.** Metode Pengujian Karakteristik

No	Pengujian	Standar Pengujian
<b>Agregat Kasar</b>		
1	Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990
2	Berat Jenis dan Penyerapan Air	SNI 03-1969-2016
3	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat	SNI 3407:2008
4	Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 2417:2008
5	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2011
6	Angularitas	ASTM D 5821-01
7	Partikel pipih dan lonjong	RSNI T-01-2005
<b>Agregat Halus</b>		
1	Analisa Saringan (Lolos Ayakan No. 200)	SNI 03-4142-1996
2	Berat Jenis dan Penyerapan Air	SNI 03-1970-2016
3	Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997
4	Angularitas	SNI 03-6877-2002
5	Batas Cair (LL)	SNI 1967:2008
6	Indeks Plastisitas (PI)	SNI 1966:2008
<b>Filler</b>		
1	Analisa Saringan (Gradasi agregat)	SNI 06-6723-2002
2	Bagian hilang pijar	SNI 06-6723-2002
3	Indeks Plastisitas (PI)	SNI 06-6723-2002
<b>Aspal</b>		
	penetrasi pada 25°C	SNI 2456:2011
	kekompakan pada 25°C	SNI 2432:2011
	Titik lembek	SNI 2434:2011



4	Titik nyala	SNI 2433:2011
5	Kelarutan dalam Trichlor Ethylen	ASTM D2042
6	Berat jenis aspal	SNI 2441:2011
7	Stabilitas penyimpanan: Perbedaan titik lembek	ASTM D 5976 part 6.1 SNI 2434:2011

Tahapan dalam pembuatan benda uji briket aspal adalah sebagai berikut :

- a. Gradasi agregat kasar, halus dan filler sesuai dengan nomor ayakan komposisi campuran
- b. Agregat kasar di cuci sampai bersih dari lumpur
- c. Agregat kasar dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 1 x 24 jam
- d. Tempatkan masing-masing material sesuai dengan ukurannya di nampan yang berbeda
- e. Timbang pada timbangan digital masing-masing material (agregat kasar, halus, filler dan Buton granular asphalt (BGA) sesuai dengan berat komposisi campuran benda uji dan campur materialnya menjadi 1 nampan
- f. Panaskan / goreng di wajan, material yang sudah tercampur kemudian diaduk
- g. Cek suhu material yang dipanaskan menggunakan termometer
- h. Segera angkat material tersebut ketika sudah mencapai suhu antara 150°C - 170°C
- i. Campurkan aspal minyak sesuai dengan berat yang sudah ditentukan
- j. Panaskan kembali dan aduk material tersebut sampai mencapai suhu 145°- 165°C, jangan sampai melebihi suhu 170°C karena akan merusak sifat kimia aspal (teroksidasi)
- k. Masukkan ke cetakan briket aspal
- i. Gunakan Automatic asphalt compactor, lakukan pemadan dengan menumbuk sebanyak 50 kali pada masing-masing sisi.
- l. Diamkan beberapa saat sampai dingin, kemudian buka benda uji briket pada cetaknya.
- m. Tempatkan pada nampan dan beri kode (kadar aspal dan kadar RCA).

## 2.6. Penentuan Jumlah Benda Uji

Banyaknya benda uji yang dibuat untuk kebutuhan penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 4

**Tabel 4.** Perhitungan Benda Uji

<b>Penentuan Kadar Aspal Optimum (Ketebalan 70 mm)</b>	
<b>Variasi Kadar Aspal (%)</b>	<b>Jumlah Benda Uji</b>
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
7	3
<b>Penentuan Kadar Aspal Optimum (Ketebalan 100 mm)</b>	
<b>Variasi Kadar Aspal (%)</b>	<b>Jumlah Benda Uji</b>
5	3



5,5	3
6	3
6,5	3
7	3

## 2.7. Volumetrik Propertis

Evaluasi karakteristik volumetrik pada campuran aspal dilakukan untuk menilai kualitas dan stabilitas kinerja campuran, khususnya dalam mendukung ketahanan jangka panjang. Setelah spesimen campuran disiapkan dan dipadatkan sesuai prosedur pada bagian sebelumnya, tahapan berikutnya adalah pengujian sifat volumetrik yang dilakukan terhadap spesimen yang telah mengalami pendinginan pada suhu ruang. Pengujian ini mencakup pengukuran berat jenis curah ( $G_{mb}$ ) berdasarkan standar ASTM D2726 dan berat jenis maksimum teoritis ( $G_{mm}$ ) dengan metode Rice sesuai ASTM D2041. Selain itu, nilai berat jenis agregat ( $G_{sb}$ ) diperoleh melalui uji laboratorium mengacu pada ASTM C127 untuk agregat kasar dan ASTM C128 untuk agregat halus. Ketiga parameter ini menjadi dasar perhitungan tiga properti volumetrik utama, yaitu Voids in Mix (VIM), Voids in Mineral Aggregate (VMA), dan Voids Filled with Bitumen (VFB).

Parameter VIM dihitung berdasarkan selisih antara  $G_{mm}$  dan  $G_{mb}$ , yang menggambarkan volume rongga udara dalam campuran. VMA dihitung dari perbedaan antara  $G_{sb}$  dan  $G_{mb}$ , yang menunjukkan volume total rongga dalam sistem agregat yang dapat diisi oleh aspal. Sementara itu, VFB merupakan rasio bagian VMA yang telah terisi oleh aspal, yang menggambarkan efisiensi pengisian rongga oleh aspal.

VIM, VMA, VFB dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$VIM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100\% \quad (1)$$

$$VMA = \frac{G_{sb} - G_{mb}}{G_{mb}} \times 100\% \quad (2)$$

$$VFB = \frac{VMA - VIM}{VMA} \times 100\% \quad (3)$$

Secara umum, nilai ideal untuk parameter volumetrik mengacu pada batas campuran, yaitu VIM berada dalam kisaran 3–5%, VMA minimal ara 65–75%, guna menjamin stabilitas dan durabilitas campuran Mohajerani, 2006; Pourtahmasb & Karim, 2014). Penyesuaian etode pemadatan perlu dilakukan secara hati-hati, terutama pada , agar nilai-nilai parameter volumetrik tetap berada dalam batas Marshall maupun Superpave (Pasandín et al., 2018; Tahmoorian



et al., 2018).

Penelitian oleh Jethy et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan RCA cenderung meningkatkan nilai VIM dan menurunkan VFB, terutama pada kadar RCA yang tinggi, akibat tingginya porositas dan daya serap aspal dari RCA. Sementara itu, Elkordi dan Joumblat (Ramadan et al., 2025), melaporkan bahwa campuran yang mengandung RCA hingga 33% masih mampu memenuhi kriteria Superpave. Namun, pada kadar yang lebih tinggi, terjadi penurunan signifikan pada nilai VMA dan VFB.

Dengan demikian, pemahaman terhadap perilaku volumetrik campuran sangat penting dalam desain perkerasan beraspal yang memanfaatkan RCA. Ketepatan dalam pengujian berat jenis serta pemilihan kadar aspal yang sesuai menjadi kunci untuk memperoleh campuran yang stabil, tahan lama, dan memenuhi kriteria kelayakan sebagai lapisan perkerasan jalan.

## 2.8. Ultrasonic Pulse Velocity dan Impedance

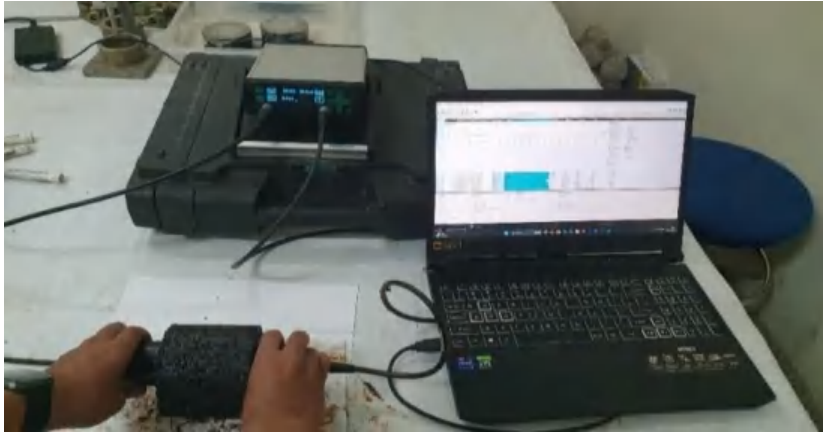
Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) pada campuran aspal dilakukan mengacu pada standar ASTM C597 dan SNI 03-2492, yang telah diadaptasi untuk material berbasis aspal. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik yang melewati benda uji berbentuk silinder Marshall dengan diameter  $101 \pm 0,1$  mm dan tinggi  $63,5 \pm 2$  mm. Spesimen yang digunakan telah dipersiapkan sebelumnya dengan variasi kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0%, masing-masing dengan minimal tiga ulangan. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen yang telah dipadatkan dikondisikan terlebih dahulu selama 24 jam pada suhu  $25 \pm 2$  °C untuk memastikan kestabilan suhu dan kelembapan.

Pengujian UPV dilakukan menggunakan alat tipe PUNDIT dengan frekuensi nominal  $54 \pm 4$  kHz. Alat dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan batang baja standar yang memiliki kecepatan gelombang sebesar  $5940$  m/s  $\pm 1\%$ . Metode pengukuran yang digunakan adalah transmisi langsung (*direct transmission*), yaitu dengan menempatkan transduser pemancar dan penerima secara vertikal di kedua sisi spesimen. Gel couplant digunakan untuk memastikan transfer gelombang ultrasonik yang optimal, dan tekanan kontak dijaga konstan pada  $\pm 250$  N. Untuk mengurangi pengaruh anisotropi material, setiap spesimen diuji sebanyak tiga kali dengan rotasi  $120^\circ$ .

Pengujian dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkontrol, dengan suhu  $25 \pm 2$  °C dan kelembapan relatif di bawah 70%. Data waktu rambat yang diperoleh diolah untuk menghitung kecepatan gelombang ultrasonik rata-rata menggunakan Persamaan (4):

$$V = \frac{L}{t} \quad (4)$$





**Gambar 3.** Pengujian UPV

Dalam konteks pengembangan perkerasan jalan yang berkelanjutan, pemanfaatan RCA sebagai agregat daur ulang menawarkan potensi pengurangan eksploitasi agregat alam sekaligus mengurangi timbulan limbah konstruksi. Namun demikian, karakteristik fisik RCA seperti porositas tinggi dan permukaan yang kasar berpotensi memengaruhi sifat mekanis dan akustik dari campuran aspal (Arabani & Azarhoosh, 2012; Rondón-Quintana et al., 2019).

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kinerja akustik material berpori adalah impedansi akustik spesifik ( $Z$ ), yang mencerminkan hambatan terhadap perambatan gelombang suara saat memasuki suatu medium. Impedansi ini dipengaruhi oleh resistivitas aliran, porositas, tortuositas, serta ketebalan dan konfigurasi pori media (Knabben et al., 2016; Pereira et al., 2019). Nilai impedansi dapat dihitung menggunakan Persamaan (5):

$$Z = \rho \times v \quad (5)$$

Di mana  $Z$  adalah impedansi akustik dalam satuan  $N \cdot s/m^3$ ,  $\rho$  adalah densitas material dalam  $kg/m^3$ , dan  $v$  adalah kecepatan rambat gelombang (m/s) yang diperoleh dari pengujian UPV. Secara umum, peningkatan porositas atau penurunan densitas akan menurunkan nilai impedansi. Oleh karena itu, integrasi antara nilai UPV dan densitas dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai performa akustik dan homogenitas internal dari campuran beraspal yang mengandung RCA (Praticò et al., 2021)

## 2.9. Effective Flow Resistivity



Effective Flow Resistivity (EFR) merupakan bentuk lain dari impedansi atau resistensi material terhadap rambatan gelombang melalui besarnya ditentukan oleh kombinasi kerapatan massa dan gelombang dalam medium (Biligiri & Kaloush, 2009). Nilai EFR menggunakan Persamaan (6):

$$EFR = 0.1 \times Z \quad (6)$$

Dengan demikian EFR secara praktis identik dengan impedansi, hanya berbeda satuan, dan dapat langsung digunakan untuk membandingkan karakteristik akustik berbagai jenis perkerasan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa EFR menurun secara eksponensial dengan meningkatnya rongga udara campuran dan berkisar sekitar  $2,0 \times 10^3 - 2,0 \times 10^4$  cgs Rayls untuk sistem aspal dan beton jalan raya (Biligiri & Kaloush, 2009; Rochat & Read, 2013). Oleh karena itu, dalam penelitian ini EFR digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk mengevaluasi perubahan struktur pori dan kerapatan internal campuran aspal berbasis RCA–PCC pada berbagai kadar aspal.

## 2.10. Damping Acoustical Measurement Parameter (DAMP)

Damping Acoustical Measurement Parameter (DAMP) adalah indeks akustik tak berdimensi yang dirancang untuk menyatakan kemampuan redaman material perkerasan dalam bentuk persen pada rentang 1–100% (Biligiri & Way, 2014). Parameter ini diturunkan dari impedansi akustik  $Z$  (cgs Rayls) yang diperoleh dari hasil uji UPV dan kerapatan material. Secara matematis, DAMP dapat dihitung pada persamaan (7) sebagai berikut:

$$DAMP (\%) = 100 \left( \frac{100}{EFR} \right)^{0.4} \quad (7)$$

Hubungan pangkat ini dipilih untuk memetakan variasi impedansi yang sangat lebar menjadi skala terhingga 1–100%, sehingga memudahkan perbandingan antarmaterial. Secara fisik, DAMP berbanding terbalik dengan  $Z$  maupun EFR: semakin kecil impedansi, semakin besar nilai DAMP dan semakin tinggi kapasitas redaman akustik material. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa campuran berpori dan lebih lunak, seperti poroelastic road surface dan asphalt rubber friction course, memiliki DAMP lebih tinggi dibandingkan beton semen portland yang kaku (Biligiri & Way, 2014). Dalam studi ini, DAMP dihitung untuk setiap kombinasi kadar aspal dan ketebalan lapis aus RCA–PCC sebagai indikator tambahan untuk menilai perubahan sifat redaman internal yang berkaitan dengan variasi struktur pori, kontinuitas mastic, dan kekakuan rangka campuran.

