

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Ketersediaan jalan raya yang memadai sangat diperlukan untuk mendukung aktifitas sarana dan prasarana transportasi. Konstruksi jalan raya sangat banyak yang tidak mampu bertahan dari kerusakan sesuai batas waktu layanan berakhir disebabkan meningkatnya volume lalu lintas yang bertambah banyak. Penelitian ini perlu dilakukan untuk mencari solusi yang memadai sesuai kualitas perkerasan jalan yang digunakan dan menghindari rusaknya perkerasan jalan sebelum habis waktu layanan jalan, adanya retak, alur (dari roda alat transportasi) dan bleding.

Salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas sarana dan prasarana jalan raya yaitu dengan cara memodifikasi campuran pada perkerasan jalan yang berada diatas yang berhubungan langsung dengan alat transportasi yaitu lapisan AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*). Sedemikian rupa penelitian dilakukan dengan upaya meningkatkan campuran aspal dengan cara memodifikasi campuran, variasi kadar aspal dengan berbagai acuan. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan campuran aspal berkualitas tinggi yang ekonomis, berkualitas baik dan tahan lama, serta diharapkan pemerintah dapat menekan pengeluaran. Adanya campuran bergradasi rapat yang memiliki sedikit rongga pada campuran aspal AC-WC menyebabkan lapisan ini lebih peka terhadap variasi dan proporsi campuran. Oleh sebab itu, lapisan ini harus dibuat kedap air

dan memiliki kekesatan yang tinggi. Untuk ketebalan minimum aspal AC-WC adalah 4 cm.

Pertumbuhan ekonomi di Indonesia yang signifikan membawa konsekuensi terhadap pendapatan per kapita dalam jumlah besar. Dalam keadaan ini yang mengakibatkan meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti gedung, jembatan, jalan, dan berbagai fasilitas publik lainnya yang banyak menggunakan bahan beton (Selvy Yasra, 2014). Penggunaan bahan limbah beton dapat menghemat sumber daya alam dan biaya sekitar 20 untuk 40 persen dibandingkan dengan pekerjaan konstruksi dengan bahan baru serta penggunaan bahan bangunan yang tepat, efisien, dan ramah lingkungan, dan perlu dilakukan pengembangan teknologi infrastruktur jalan dengan menggunakan daur ulang dengan memanfaatkan limbah beton sebagai agregat daur ulang (Sudarno, 2015).

Dalam pembuatan perkerasan jalan membutuhkan agregat yang banyak, sedangkan agregat adalah sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui selain itu seiring pesatnya pembangunan di Indonesia maka membutuhkan agregat baru yang banyak. Dari permasalahan tersebut timbullah pemikiran untuk melakukan penelitian dalam inovasi beton yang di manfaatkan sebagai penambahan campuran laston untuk perkerasan jalan raya dengan adanya penelitian tersebut diharapkan dapat mengurangi limbah beton yang ada dimasyarakat dan dapat hasilkan stabilitas perkerasan jalan raya yang baik (Heru Hariyadi, dkk., 2018). Bangunan yang tidak layak pakai ataupun sudah masuk umur rencana maka akan dihancurkan dan menghasilkan limbah beton yang banyak pula, melihat fenomena tersebut maka perlu dimanfaatkan kembali limbah beton yang selama terbuang

percuma dan tidak begitu berguna. Memanfaatkan material limbah beton sehingga dapat digunakan kembali dengan nilai yang lebih ekonomis. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik *marshall* apabila digunakan sebagai agregat halus pada jenis campuran AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*).

Alasan peneliti memakai limbah beton adalah supaya limbah beton bisa termanfaatkan yang bisa didapatkan dari bekas bongkaran bangunan konstruksi yang sudah tak terpakai. Serta dengan mengidentifikasi beberapa permasalahan seperti keberadaan limbah beton yang belum terpakai, jumlah volume transportasi semakin bertambah yang menyebabkan campuran perkerasan jalan kualitasnya sangat rendah, banyaknya masyarakat yang membutuhkan sarana dan prasarana transportasi yang memadai, dan diharapkan bahan pengganti guna mendapatkan hasil perkerasan jalan yang bagus.

Dari uraian diatas, maka penulis mengambil judul **“Pengaruh Pengganti Limbah Beton Sebagai Subtitusi Agregat Pada Laston AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) Terhadap Nilai Karakteristik Marshall”**.

B. Rumusan Masalah

1. Apakah Pengganti Limbah Beton Sebagai Subtitusi Agregat Kasar Dan Agregat Halus Dengan Aspal Beton (*Laston*) AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) Memenuhi Standar Spesifikasi?
2. Bagaimana Karakteristik *Marshall* Laston AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) Menggunakan Limbah Beton?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini, yaitu :

1. Mengetahui Kelayakan Material Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Dan Agregat Halus Dalam Aspal Beton AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) memenuhi standar spesifikasi.
2. Mengetahui Karakteristik *Marshall* Campuran AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) Yang Menggunakan Limbah Beton Sebagai Agregat Halus Dan Agregat Kasar.

D. Batasan Masalah

Untuk memudahkan pembahasan penelitian, penulis menyatakan batasan masalah, yaitu sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal, Universitas Muhammadiyah Parepare.
2. Bahan pengisi (*Filler*) yang dipakai yaitu lolos ayakan No. 200 (0,075 mm) dari semen PCC.
3. Agregat halus yang dipakai yaitu lolos ayakan No. 4 (4,75 mm) dari limbah beton.
4. Lapis perkerasan aspal AC-WC menggunakan aspal curah dengan penetrasi 60-70.
5. Dalam pengujian untuk KAO dengan variasi perkiraan kadar aspal optimum, yaitu : 4,5% , 5,0% , 5,5% , 6,0% dan 6,5%.
6. Persyaratan Bina Marga yang digunakan adalah persyaratan Bina Marga 2018.

E. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang dilakukan penulis pada tugas akhir ini yaitu :

1. Mengetahui karakteristik agregat pada campuran laston apakah memenuhi Spesifikasi.
2. Dapat mengetahui persen rongga diantara agregat (VMA), persen rongga dalam campuran (VIM), persen rongga terisi aspal (VFB), stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), kepadatan (*density*), dan *Marshall Quantinet*.
3. Dapat mengetahui nilai kadar aspal optimum (KAO) dengan menggunakan agregat dari Laboratorium Struktur Bahan dan Beton Universitas Muhammadiyah Parepare.

F. Sistematika Penulisan

Secara garis besar sistematika penulisan yang dapat disajikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori yang menyangkut dengan penelitian ini dan digunakan sebagai landasan serta hasil tinjauan pustaka dari penelitian-penelitian sebelumnya yang bersifat relevan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, bahan dan alat, prosedur penelitian, teknik pengumpulan data, teknik analisis data, dan diagram alir.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil yang telah dicapai setelah pengujian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran keseluruhan penulis berdasarkan hasil analisa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Perkerasan jalan

Menurut Sukirman (2003), perkerasan jalan adalah lapisan perkerasan yang ditempatkan di antara dasar jalan dan roda kendaraan, yang berfungsi untuk memberikan pelayanan angkutan dan diharapkan tidak menimbulkan kerusakan yang berarti selama masa pakai yang jarang terjadi. Menurut Sukirman (1999), berdasarkan bahan pengikatnya, konstruksi perkerasan jalan dapat dibedakan menjadi:

1. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*)

Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*) yaitu konstruksi perkerasan jalan dengan menggunakan aspal sebagai pengikatnya. Lapisan jalan dimaksudkan untuk memikul beban lalu lintas dan menyebarkannya ke dalam tanah di bawahnya. Struktur perkerasan jalan lentur dibangun berlapis-lapis dan terdiri dari lapisan atas (*surface course*) yaitu lapisan aus dan lapisan tengah. Lapisan bawah adalah lapisan pondasi, yang terdiri dari pondasi atas (*base course*) dan pondasi bawah (*subbase course*). Lapisan ini ditempatkan di atas lapisan tanah yang dipadatkan. Setiap elemen atas, termasuk tanah dasar menanggung beban lalu lintas bersama-sama. Ketebalan struktur jalan diatur sedemikian rupa sehingga daya dukung beban bangunan bawah sehubungan dengan beban lalu lintas dan ketebalan struktur jalan sangat tergantung pada kondisi dan daya

dukung beban bangunan bawah. Struktur perkerasan keras adalah perkerasan yang menggunakan semen portland sebagai bahan pengikatnya. Pelat beton, dengan atau tanpa tulangan, ditempatkan di tanah di bawahnya dengan atau tanpa lapisan dasar. Beban lalu lintas terutama dipikul oleh pelat beton.

2. Kosntruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*)

Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*) yaitu perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai bahan pengikat. Pelat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan diatas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah.

3. Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*)

Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*) yaitu kombinasi antara perkerasan kaku dengan perkerasan lentur yang dapat berupa perkerasan lentur di atas perkerasan kaku, atau perkerasan kaku di atas perkerasan lentur.

B. Lapis Aspal Beton (Laston)

Menurut (sukirman 2003) Lapisan Aspal Beton (Laston) adalah lapisan pada struktur jalan raya, yang terdiri dari campuran aspal keras dan agregat yang bergradasi dicampuran, dihamparkan dan dipadatkan dalam keadaan panas pada suhu tertentu (SNI 03-1737-1989). Tebal nominal Laston (AC) adalah 4-7,5 cm (Spesifikasi Umum 2018). Sesuai fungsinya Laston (AC) mempunyai 3 macam campuran yaitu :

- 1. Laston sebagai lapisan aus**, dikenal dengan nama AC-WC (*Asphalt Concrete-Wearing Course*), dengan tebal nominal minimum adalah 4 cm. Lapisan ini harus memiliki permukaan yang rata dan nyaman serta memiliki

kekesatan yang tinggi karena merupakan lapisan yang langsung bersentuhan dengan roda kendaraan.

2. **Laston sebagai lapisan antara**, dikenal dengan nama AC-BC (*Asphalt Concrete- Binder Course*), dengan tebal nominal minimum adalah 6 cm. Lapisan ini tidak berhubungan langsung dengan cuaca, tetapi harus mempunyai ketebalan dan kekakuan yang cukup untuk mengurangi tegangan atau regangan akibat beban lalu lintas yang akan diteruskan ke lapisan di bawahnya yaitu *Base* dan *Sub Grade*.
3. **Laston sebagai lapisan pondasi**, dikenal dengan nama AC-Base (*Asphalt Concrete-Base*), dengan tebal nominal minimum adalah 7,5 cm. Lapisan ini berfungsi untuk memberi dukungan atau menerima beban kendaraan dari lapisan AC-BC untuk selanjutnya diteruskan kembali ke lapisan pondasi bawah.

C. Aspal AC-WC (*Asphalt Concrete-Wearing Course*)

AC-WC adalah salah satu dari tiga macam campuran aspal beton yaitu AC-BC, AC-WC dan AC-base. Ketiga jenis laston tersebut merupakan konsep spesifikasi campuran beraspal yang telah disempurnakan oleh Bina Marga bersama-sama dengan pemerintah pusat litbang jalan.

1. Fungsi Lapisan Aspal (AC-WC)

Ada tiga Fungsi lapisan aspal AC-WC yakni sebagai berikut :

a. Sebagai Lapisan Aus

Selain sebagai penahan beban secara langsung, lapisan aspal AC-WC juga akan menerima gesekan ban kendaraan secara langsung yang membuat ban

tersebut menjadi aus atau menyusut. Struktur lapisan permukaan ini perlu dibuat supaya mampu memberikan gaya gesek dalam kondisi basah supaya kendaraan tidak tergelincir.

b. Melindungi Lapisan Dibawahnya

Adanya air dan udara dari lingkungan dapat mempercepat proses penuaan dan pengelupasan selimut aspal. Supaya lapisan kedua dan ketiga tetap aman dan terlindungi dari air hujan, maka sebagai lapisan pertama, aspal AC-WC harus didesain supaya dapat kedap air. Untuk mengetahui kedap air suatu lapisan, jumlah pori-pori pada campuran beton setelah dipadatkan dapat menjadi salah satu indikator.

c. Menyebarkan Beban

Setiap lapisan aspal memiliki beban yang berbeda beda sebagai lapisan surface course atau lapisan yang berada di permukaan, tentu lapisan ini akan menerima beban yang paling besar. Inilah mengapa lapisan AC-WC harus mampu mendistribusikan beban tersebut secara merata ke lapisan di berikutnya.

2. Kriteria Material Campuran Aspal (AC-WC)

Pada umumnya, campuran untuk menyusun beton aspal terdiri dari agregat halus, agregat kasar, bahan pengisi, dan aspal. Beberapa kriteria dan persyaratan material campuran untuk aspal AC-WC adalah sebagai berikut :

- a. Fraksi agregat kasar yang akan digunakan adalah yang tertahan saringan. Selain itu, struktur agregat harus keras, bersih, awet, dan bebas dari lempung.

- b. Agregat halus terdiri dari pasir atau pengayakan batu pecah dan lolos ayakan. Presentase maksimum pasir yang diisyaratkan untuk campuran aspal AC-WC adalah 10%. Kondisi agregat halus harus bersih, keras, dan bebas dari lempung.
- c. Bahan pengisi atau filler harus kering, bebas gumpalan, dan memiliki sifat non-plastis.
- d. Aspal adalah material yang dapat mencair dan membungkus agregat ketika dipanaskan.

Tabel 2. 1 Ketentuan Sifat-Sifat Campuran (Sumber: Spseifikasi Bina Marga 2018)

Sifat Campuran		Spesifikasi
		AC-WC
Kadar Aspal Efektif	Min	6
Kadar Penyerapan Aspal	Max	1,7
Kadar Aspal Total (% terhadap berat total)	Min	7,3
Kadar Rongga Udara Dari Campuran Padat (% terhadap volume total campuran)	Min	3
	Max	5
Rongga Diantara Mineral Agregat (VMA) (%)	Min	15
Rongga Terisi Aspal (VFA) (%)	Min	65
Stabilitas Marshall (Kg)	Min	800
Pelelehan (Flow), mm	Min	2
	Max	4
Marshall Quotient (kg/mm)	Min	250

3. Karakteristik Beton Aspal

Menurut (sukirman, 2003) ada terdapat tujuh karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh beton aspal yakni sebagai berikut :

- a. Stabilitas adalah kekuatan campuran aspal, yang dapat menahan deformasi akibat beban berulang yang konstan tanpa runtuh (aliran plastis). Jalan dengan lalu lintas padat dan sebagian besar kendaraan berat membutuhkan stabilitas yang lebih tinggi daripada jalan dengan lalu lintas

padat yang hanya terdiri dari mobil penumpang. Stabilitas dihasilkan dari geser antar partikel, penguncian antar partikel, dan agregasi lapisan aspal yang baik. Oleh karena itu, stabilitas yang tinggi dapat dicapai, antara lain, dengan mencoba menggunakan agregat yang cukup miring, agregat padat dan agregat mineral (VMA) dengan rongga kecil. Namun, jika VMA kecil, aspal tidak akan menutupi agregat dengan baik dan penggunaan aspal yang banyak akan menyebabkan bleeding.

- b. Keawetan adalah kemampuan suatu campuran aspal untuk menahan pelapukan, air, perubahan suhu, dan keausan yang disebabkan oleh gesekan roda kendaraan. Keawetan beton aspal dipengaruhi oleh ketebalan lapisan aspal atau perkerasan, jumlah pori-pori dalam campuran, densitas dan kedap air campuran. Besarnya pori-pori yang tertinggal dalam campuran setelah pemadatan mengurangi durabilitas beton aspal. Semakin besar pori-pori yang tersisa, semakin sedikit kedap air beton aspal, semakin banyak udara yang dimilikinya, dan semakin banyak udara yang mengoksidasi perkerasan aspal, sehingga lebih rapuh dan kurang tahan lama. Sebuah rongga kecil diperlukan dalam campuran untuk mencapai resistensi yang tinggi. Ini karena udara hampir tidak (atau sama sekali) masuk ke dalam campuran, yang dapat menyebabkan penggetasan. VMA yang besar juga diperlukan agar aspal dapat menutupi agregat dengan lebih baik.
- c. Fleksibilitas adalah kemampuan suatu lapisan untuk mengikuti deformasi yang diakibatkan oleh beban lalu lintas berulang tanpa mengalami retak

fatik atau penurunan muka tanah akibat berat timbunan yang dibuat di dalam tanah aslinya. Fleksibilitas tinggi membutuhkan penggunaan VMA besar, VIM kecil, dan aspal permeabel, atau penggunaan agregat kelas terbuka.

- d. Ketahanan slip adalah kemampuan untuk memberikan permukaan kasar yang cukup untuk mencegah perkerasan aspal tergelincir baik pada permukaan basah maupun kering. Faktor-faktor untuk memperoleh kekasaran jalan sama dengan faktor-faktor untuk memperoleh stabilitas yang tinggi: kekasaran permukaan partikel agregat, luas kontak antar partikel atau bentuk partikel, gradasi agregat, densitas campuran, dan ketebalan film aspal.
- e. Kedap air (*impermeable*) adalah kemampuan beton aspal untuk mencegah air dan udara menembus lapisan beton aspal. Air dan udara dapat mempercepat proses penuaan aspal dan memisahkan perkerasan aspal dari permukaan batuan. Banyaknya pori-pori yang tersisa setelah beton aspal dipadatkan merupakan indikator kedap air dari campuran tersebut, dan tingkat kedap air beton aspal berbanding terbalik dengan durabilitasnya.
- f. Kekuatan leleh (*fatigue resistance*) yaitu kemampuan aspal beton untuk menahan beban berulang tanpa mengalami kelelahan berupa retak atau rutting.
- g. Workability adalah kemudahan dalam mengolah campuran aspal. Faktor-faktor yang mempengaruhi workability antara lain grading yang mudah

diolah dengan kadar agregat yang baik, dan kandungan *filler* yang sulit diolah karena kandungan *filler* yang tinggi.

D. Bahan Penyusun Campuran Aspal Beton

Komponen campuran aspal dan beton adalah agregat halus, agregat kasar, aspal dan *filler*. Saat merancang perkerasan, analisis parameter desain berfokus pada komposisi campuran aspal dan beton. Salah satu parameter kekuatan konstruksi jalan adalah dalam pemilihan bahan bangunan yang tepat (Saodang, 2005). Berikut ini adalah penjelasan dari masing-masing komponen yang membentuk campuran aspal beton.

1 Aspal

Aspal adalah bahan termoplastik yang mengeras atau menjadi lebih kental pada suhu yang lebih rendah dan melunak atau menjadi lebih cair pada suhu yang lebih tinggi. Sifat ini, yang disebut kepekaan terhadap perubahan suhu, dipengaruhi oleh komposisi kimia aspal, tetapi mungkin memiliki nilai penetrasi atau viskositas yang sama pada suhu tertentu. Selain agregat, aspal merupakan bahan pembentuk campuran permukaan jalan (Sukirman, 2003).

Aspal bersifat termoplastik pada suhu ruang, sehingga ketika dipanaskan sampai suhu tertentu, aspal mencair dan membeku kembali ketika suhu turun. Jumlah aspal dalam campuran perkerasan berkisar antara 4-10% dalam berat campuran dan 10-15% berdasarkan volume campuran (Sukirman, 2003). Menurut Wignaall (2003) aspal dapat dibagi menjadi 2 yaitu :

a. Aspal alam

Aspal alam dapat berasal dari batuan pegunungan (*rock asphalt*) dan dana

(*lake asphalt*). Aspal alam didapat dari proses destilasi minyak bumi, dengan pemanasan 350 dibawah tekanan atmosfer untuk memisahkan fraksi-fraksi ringan, seperti gasoline (bensin), (suryadharma, 2008), yaitu:

- 1) Aspal keras/panas (*asphalt cement, AC*)
- 2) Aspal dingin/cair (*cut back asphalt*)
- 3) Aspal emulsi (*amulsion asphalt*)

b. Aspal buatan

Penggunaan yang paling umum adalah jenis aspal keras (AC), aspal jenis ini berbentuk padat pada temperatur antara 25 C -30 C. Di Indonesia AC terdiri dari beberapa jenis, yaitu:

- 1) AC pen 40/50
- 2) AC pen 60/70
- 3) AC pen 80/100
- 4) AC pen 120/150
- 5) AC pen 200/300

Di Indonesia umumnya dipakai AC pen 60/70 atau AC pen 80/100. Syarat umum AC adalah berasal dari saringan minyak bumi, harus mempunyai sifat yang sejenis, kandungan kadar parafinnya tidak lebih dari 2% dan tidak mengandung air/busa pada temperatur 175 AC-BC (*Asphalt Concrete-Binder Course*).

2 Agregat

Menurut ASTM 1995 (Waani, 2013), batuan didefinisikan sebagai suatu material yang tersusun dari mineral padat berupa bongkahan besar atau debris.

Ada dua jenis agregat, agregat alam dan agregat buatan, berdasarkan proses pembentukannya. Agregat alam dibagi lagi menjadi batuan sedimen, batuan beku dan batuan metamorf berdasarkan proses pembentukannya. Agregat merupakan komponen primer dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90-95% agregat sesuai persentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan persentase volume. Selain itu agregat juga dibagi berdasarkan ukuran butirannya menurut Bina Marga Tahun 2018 yaitu :

a. Agregat Kasar

Agregat kasar biasa juga disebut kerikil sebagai hasil batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu, dan tertahan ayakan No.8 (2.36 mm) yang dilakukan secara basah dan harus bersih, keras, awet, dan bebas dari lempung atau bahan yang tidak memenuhi ketentuan yang diberikan.

Agregat kasar yang baik tidak mengandung garam. Agregat kasar ini memiliki ketahanan slip yang tinggi untuk membuat perkerasan lebih stabil dan untuk menjamin keselamatan lalu lintas. Bentuk agregat kasar yang bulat memudahkan proses kompresi tetapi kurang stabil, sedangkan agregat yang tersudut lebih sulit untuk dipadatkan.

Tabel 2. 2 Ketentuan Agregat Kasar (Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018)

Pengujian		Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	<i>Natrium Sulfat</i>	SNI 3407:2008	Maks. 12%
	<i>Magnesium Sulfat</i>		Maks. 18%

Lanjutan Tabel 2. 2 Ketentuan Agregat Kasar (Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018)

Pengujian			Metode Pengujian	Nilai
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i>	Campuran AC Modifikasi dan SMA	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal		SNI 2439:2011	Min. 95%	
Butir Pecah pada Agregat Kasar	SMA	SNI 7619:2012	100/90%	
	Lainnya		95/90%	
Partikel Pipih dan Lonjong	SMA	ASTM D4791-10 Perbandingan 1:5	Maks. 5%	
	Lainnya		Maks. 10%	
Material lolos Ayakan No. 200		SNI ASTM C117: 2012	Maks. 1%	

b. Agregat Halus

Agregat halus dari sumber bahan manapun, harus terdiri dari pasir atau hasil pengayakan batu pecah dan terdiri dari bahan yang lolos ayakan No. 8 (2,36 mm). Agregat halus harus memenuhi ketentuan sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 2. 3**.

Tabel 2. 3 Ketentuan Agregat Halus (Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018)

Pengujian	Metode pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min 50%
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemasatan	SNI 03-6677-2002	Min 45%
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Agregat Lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%

Pemilihan agregat yang akan digunakan harus memperhatikan ketersediaan bahan lokasi, jenis konstruksi, gradasi, ukuran maksimum, kebersihan, daya tahan, bentuk, tekstur, daya letak agregat terhadap aspal dan berat jenis lainnya.

c. Bahan Pengisi Atau *Filler*

Filler adalah material berbutir halus yang lolos saringan No. 200 (0,75 mm) dan berfungsi sebagai bahan pengisi dalam lapisan aspal. *Filler* yang akan ditambahkan harus kering dan tidak menggumpal dan jika diuji dengan pengayakan sesuai SNI 03-1968-1990 harus mengandung bahan yang lolos ayakan No. 200 (75 micron) tidak kurang dari 75% terhadap beratnya.

Tabel 2. 4 Spesifikasi *Filler* Untuk Campuran Aspal Beton

Saringan (mm)	% Lolos
0,600 (NO. 30)	100
0,300 (NO. 50)	90-100
0,075 (No. 200)	75-100

Adapun filler atau semen yang digunakan adalah sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. 5 Susunan Oksida Semen Portland (Sumber :SNI 17064-2004)

No.	Oksida	Persentase
1	Kapur (Ca O ₄)	60 – 65
2	Silika (SiO ₂)	17 – 25
3	Alumina (Al ₂ O ₃)	3 – 8
4	Besi (Fe ₂ O ₃)	0,5 – 6
5	Magnesia (MgO)	0,5 – 4
6	Sulfur (SO ₃)	1 – 2
7	Soda / Portash (Na ₂ O + K ₂ O)	0,5 – 1

Semen Portland adalah bahan konstruksi yang aling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut ASTM C-150, 1985, semen Portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan menggiling klinker yang terdiri dari kalsium silikat hidrolis, yang umumnya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan yang digiling bersama-sama dengan bahan utamanya.

1) Nilai Kekuasaan Agregat

Daya tahan agregat merupakan ketahanan agregat terhadap adanya penurunan mutu akibat proses mekanis dan kimiawi. Agregat dapat mengalami degradasi, yaitu perubahan gradasi, akibat pecahannya butir agregat. Kehancuran agregat dapat disebabkan oleh proses mekanis, seperti gaya-gaya yang terjadi selama proses pelaksanaan perkerasan jalan (penimbunan, penghamparan, dan pemadatan), pelayanan terhadap beban lalu lintas, dan proses kimiawi, seperti pengaruh kelembapan, kepanasan, dan perubahan suhu sepanjang hari.

2) Gradasi Agregat

Gradasi ialah ukuran susunan butir agregat yang sama kesenjangan butirannya. Ukuran butir agregat didapatkkn dari hasil melalui saringan (sukirman, 2003). Besarnya rongga pori didalam campuran agregat bisa dicari melalui pengecekan gradasi agregat.

Agregat campuran yang berpori banyak diakibatkan oleh agregat yang bergradasi sama, dikarenakan tidak adanya agregat yang lebih kecil untuk mengisi rongga-rongga yang tersisa didalam campuran. Jika sebaliknya ukuran gradasi agregat tersedia dari yang terbesar sampai yang terkecil secara berurutan, maka rongga-rongga yang tersisa oleh agregat yang lebih besar akan diisi oleh agregat yang gradasinya lebih kecil sehingga pori-pori didalam campuran perkerasan aspal menjadi lebih sedikit.

Tabel 2. 6 Gradasi Agregat Campuran Gabungan Untuk Campuran Aspal AC-WC (Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018)

Ukuran Saringan		% Berat yang lolos AC-WC	
(mm)	(ASTM)	Gradasi Halus	Garadsi Kasar
25	1"	-	-
19	3/4"	100	100
12,5	1/2"	90-100	90-100
9,5	3/8"	72-90	72-90
4,75	4	54-69	43-63
2,36	8	39,1-40	28-39,1
1,18	16	31,6-40	19-25,6
0,6	30	23,1-30	13-19,1
0,3	50	15,5-22	9-15,5
0,15	100	9-15	6-13
0,075	200	4-10	4-10

Gradasi agregat bisa dinyatakan setelah dilakukannya proses pengayakan dan dapat dilihat hasil persentase agregat yang tertahan saringan. Gradasi agregat ditentukan dari hasil persentase agregat yang tertahan saringan dan lolos saringan yang dihitung dari persentasenya.

d. Bahan Tambah (Limbah Beton)

Menurut Arys Andhikatama (2013) Limbah adalah benda yang dibuang baik berasal dari alam ataupun dari hasil proses teknologi yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki karena tidak memiliki nilai ekonomis. Sedangkan Limbah beton adalah material yang sudah tidak dipakai lagi untuk konstruksi. Limbah beton merupakan sisa-sisa atau limbah dari reruntuhan bangunan akibat gempa, bongkaran bangunan, akibat kebakaran, hasil dari pengujian laboratorium teknik sipil maupun limbah beton yang berasal dari pabrik beton per cetak. Limbah beton dengan pori-pori yang padat dan tingkat kekerasan yang tinggi tergantung dengan mutu dari beton yang direncanakan. Limbah beton digunakan sebagai pengganti agregat dalam perkerasan lentur dengan kemampuan meresapkan air ke lapisan permukaan tanah atau aspal porus, karena dinilai cocok kondisi iklim di Indonesia.



Gambar 2. 1 Limbah beton di Laboratorium Struktur dan Bahan Univeristas Muhammadiyah Parepare
Sumber: (dokumentasi pribadi)

3 Marshall Test

Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode *Marshall*. Marshall bertujuan untuk mengukur daya tahan (stabilitas) campuran agregat dan aspal terhadap kelelahan plastis (*flow*). Flow didefinisikan sebagai perubahan deformasi atau regangan suatu campuran mulai dari tanpa beban, sampai beban maksimum dan dinyatakan dalam milimeter atau 0,01". Pengujian *marshall* merupakan pengujian yang paling banyak dan paling umum di pakai saat ini. Hal ini disebabkan karena alatnya sederhana dan cukup praktis untuk dimobilisasi.

a. Pengujian Marshall

Pengujian Marshall dilakukan untuk mengetahui nilai stabilitas dan nilai kelelahan (*flow*), serta analisa kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk. Pengujian Marshall pada campuran AC-WC digunakan untuk mencari

data dari persyaratan campuran dan memperoleh hasil perhitungan akhir dari sifat-sifat Marshall seperti:

1) Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, dan bleeding. Kebutuhan akan stabilitas sebanding dengan fungsi jalan dan beban lalu lintas yang akan dilayani.

2) Kelelehan (flow)

Ketahanan terhadap kelelehan (flow) merupakan kemampuan beton aspal dalam menerima lendutan berulang akibat dari repetisi beban, tanpa terjadi kerusakan kelelehan berupa alur dan retak. Hal ini dapat tercapai apabila mempergunakan kadar aspal yang optimal.

3) *Voids Filled Bitumen (VFB)*

Voids Filled Bitumen (VFB), menyatakan prosentase rongga udara yang terisi aspal pada campuran yang sudah mengalami pemadatan.

4) *Voids In Mineral Aggregate (VMA)*

Voids In Mineral Aggregate (VMA) adalah rongga udara yang ada diantara mineral agregat diantara campuran aspal yang sudah dipadatkan. Nilai VMA dinyatakan dalam persen (%).

5) *Voids In Mix (VIM)*

Voids In Mix (VIM) merupakan banyaknya rongga di antara butir – butir agregat yang doselimuti aspal. VIM dinyatakan dalam presentase terhadap volume beton aspal.

6) *Marshall question (MQ)*

Nilai Marshall Quotient (MQ) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelahan(flow) dan merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan fleksibilitas campuran.

7) **Kepadatan (*density*)**

Kepadatan (*density*) adalah kepadatan campuran ketika sudah dipadatkan. Untuk mendapatkan nilai kepadatan (*density*) bisa dihitung dengan rumus berikut:

b. **Volumetrik Campuran**

Volumetrik campuran aspal beton yang dimaksud adalah volume benda uji campuran setelah dipadatkan. Perhitungan volume campuran beraspal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut :

1) **Berat Jenis Bulk**

Berat jenis bulk adalah perbandingan antara berat bahan di udara (termasuk rongga yang cukup kedap dan yang menyerap air) pada satuan volume dan suhu tertentu dengan berat air suling serta volume yang sama pada suhu tertentu pula.

2) **Berat Jenis Efektif Agregat**

Berat jenis efektif agregat, partikel-partikel yang ada dalam rongga agregat dan menyerap aspal.

3) **Berat Jenis Maksimum Campuran**

Berat jenis maksimum campuran, Gmm pada masing-masing kadar aspal diperlukan untuk menghitung kadar rongga masing-masing kadar aspal. Berat

jenis maksimum dapat ditentukan dengan AASHTO T.209-90. Ketelitian hasil uji terbaik adalah bila kadar aspal campuran mendekati kadar aspal optimum. Sebaliknya pengujian berat jenis maksimum dilakukan dengan benda uji sebanyak minimum dua buah (duplikat) atau tiga buah (triplikat).

4) **Penyerapan Aspal**

Penyerapan aspal dinyatakan dalam persen terhadap berat agregat total

Langkah-Langkah Uji Marshall

Secara garis besar langkah-langkah pengujian *marshall* meliputi :

- 1) Persiapan benda uji
- 2) Penentuan berat jenis bulk dari benda uji
- 3) Pemeriksaan nilai stabilitas dan flow
- 4) Perhitungan sifat volumetric benda uji

E. Penelitian Terdahulu

1. Rizki, dkk (2017). “Uji Eksperimental Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Lapisan Aspal AC-BC”. Hasil karakteristik campuran aspal beton AC-BC pada kadar aspal optimum dinyatakan dalam sifat-sifat berikut nilai stabilitas maksimum kadar aspal 4,5% sebesar 1345,95 kg dan minimum pada kadar aspal 5,5% sebesar 1199,27 kg, nilai VMA maksimum pada kadar aspal 6,5% sebesar 17.69% dan minimum pada kadar aspal 5% sebesar 15.20%, nilai VIM maksimum pada kadar aspal 4.5% sebesar 6.59 % dan minimum pada kadar aspal 6.5% sebesar 4,02%, Nilai VFB maksimum pada kadar aspal 6.5% sebesar 77.99% dan minimum pada kadar aspal 4.5% sebesar 63.32 %, nilai flow maksimum pada kadar

aspal 6.5% sebesar 3.99 mm dan minimum pada kadar aspal 5% sebesar 2.3 mm, nilai MQ maksimum pada kadar aspal 5% sebesar 718,06 mm/kg dan minimum pada kadar aspal 6,5% sebesar 302,69 mm/kg, nilai karakteristik yang telah diperoleh melalui pengujian marshall dengan hasil Kadar Aspal Optimum (KAO) yang diperoleh adalah 5.275%. Maka penggunaan material agregat limbah beton telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dan layak digunakan dalam campuran aspal beton AC-BC.

2. Naufal Imannurohman, dkk (2021). “Pemanfaatan Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Perkerasan Laston *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC).” Hasil pengujian Penambahan limbah beton pada perkerasan laston ACWC mempengaruhi karakteristik Marshall yaitu pada nilai Stabilitas, Flow, VIM, VFB, VMA, dan MQ hasil analisis statistik. Dengan hasil sebagai berikut : nilai stabilitas yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton sebesar 1461,96 kg, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 1869,30 kg. Nilai flow yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton sebesar 3.42 mm, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 3,17 mm. Nilai VIM yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton sebesar 3,45%, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 3,83%. Nilai VFB yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton sebesar 78,66%, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 76,97%. Nilai VMA yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton sebesar 16,19%, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 16,64%. Nilai MQ yang dicapai pada kadar aspal optimum 6% tanpa limbah beton

sebesar 428,13 kg/mm, sedangkan dengan limbah beton 15% sebesar 590,97 kg/mm. Berdasarkan nilai karakteristik Marshall kadar optimum campuran AC-WC didapatkan pada kadar limbah beton 15% dengan menggunakan aspal pertamina pen 60/70 kadar aspal sebesar 6% berpengaruh baik terhadap nilai karakteristik marshall seperti Stabilitas sebesar 1869,30 kg, Flow sebesar 3,17 mm, VFB sebesar 76,97%, VMA sebesar 16,64 %, VIM sebesar 3,83% dan MQ sebesar 590,97 kg/mm. dengan demikian campuran tersebut sesuai dengan persyaratan Spesifikasi Teknis Bina Marga 2010, Revisi 3.

3. Kurnia Hadi Putra, dkk (2019). “Studi Eksperimental Penambahan Limbah Keramik Sebagai Agregat Halus Pada Campuran Laston (AC-WC) Terhadap Karakteristik Uji Marshall”. Hasil pengujian yang baik serta memenuhi seluruh parameter Marshall adalah pada kadar penambahan limbah keramik sebesar 25% dimana nilai stabilitasnya sebesar = 1299.83 kg, nilai tersebut lebih baik dibandingkan tanpa penambahan keramik. sedangkan nilai VIM = 4.09%, VMA = 15.52%, VFB = 73.65%, Flow = 2.5 mm dan MQ = 519.93 kg/mm. Kadar optimum untuk penambahan limbah keramik adalah sebesar 16.05%.
4. Mohamad Purwoko, dkk (2020). “Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Agregat Dalam Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC)”. Limbah beton memenuhi persyaratan sebagai pengganti agregat ditinjau dari hasil pemeriksaan agregat berupa flakiness indeks, impact, abrasi, berat jenis dan angularitas. Flakiness = 23,37% (Syarat maks 25%). Impact value = 13,36% (Syarat maks 30%). Abrasi agregat = 28,31% (Syarat maks 30%).

Berat jenis Agregat 10/10 = 2,51 gr/cm²(Syarat min 2,5). Agregat 5/10 = 2,56 gr/cm²(Syarat min 2,5). Agregat 0/5 = 2,53 gr/cm²(Syarat min 2,5). Angularitas = 9,62 (Syarat 0-12). Nilai optimum variasi campuran limbah beton pada kondisi campuran AC–WC adalah 29%, dengan nilai parameter Marshall. Stabilitas = 1093,70 kg (Syarat > 800). Flow = 3,31 mm (Syarat 2 – 4). VIM = 4,09% (Syarat 3 – 5) VMA = 16,36% (Syarat > 15). MQ = 328,73 kg/mm (Tidak ada ketentuan). VFA = 74,96% (Syarat > 65).

5. Heri Wahyudiono, dkk (2020). “Modifikasi Laston AC-WC Menggunakan Bongkaran Limbah Beton”. Dari hasil pengujian penambahan campuran aspal beton dapat disimpulkan. Nilai rata-rata VIM 6% = 7,91% ; 6,5% = 1,91% ; 7% = 6,2% ; 7,5% = 3,44% ; 8% = 4,92%. Nilai rata-rata VMA 6% = 60,19% ; 6,5% = 89,62% ; 7% = 65,97% ; 7,5% = 15,98% ; 8% = 17,26%. Nilai rata-rata VFB 6% = 60,19% ; 6,5% = 89,62% ; 7% = 65,97% ; 7,5% = 78,49% ; 8% = 71,5%. Nilai rata-rata stabilitas 6% = 2182kg/mm ; 6,5% = 2913kg/mm ; 7% = 3538kg/mm ; 7,5% = 2703kg/mm ; 8% = 3438kg/mm. Nilai rata-rata flow 6% = 3 ; 6,5% = 3 ; 7% = 3 ; 7,5% = 3,2 ; 8% = 4. Nilai rata-rata MQ 6% = 727 ; 6,5% = 971 ; 7% = 1179 ; 7,5% = 845 ; 8% = 871. Berdasarkan hubungan antara kandungan kadar aspal minyak dan seluruh parameter marshall dan volumetrik menggunakan limbah bongkaran beton maka didapatkan kandungan aspal optimum berada pada kadar 7,5% dan 8% dari nilai VIM, VMA, VFB, STABILITAS dan MQ.
6. Hermawan dan Bagus Budi (2018). “Pengaruh Penambahann Limbah Karet Padat Ban Luar Bekas Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Aspal

Beton”. Penelitian dilakukan untuk campuran panas jenis laston AC-WC (*Asphalt Concrete–Wearing Course*) dengan marshall test yang terdiri dari uji stabilitas, uji kelelahan (*flow*), VMA (Void in the Mineral Aggregate), VFA (*Voids Filled with Asphalt*), VIM (*Void In Mix*) dan *Marshall Quotient* (QM). Teknik pencampuran ban dengan aspal pen 60/70 dilakukan dengan cara memotong karet ban luar bekas tersebut dengan ukuran sebesar 0,15 mm, kemudian dicampurkan pada saat memasak aspal dengan suhu maksimal 200°C agar aspal tersebut tidak rusak. Pengujian dilakukan pada campuran aspal dengan variasi penambahan karet ban bekas sebanyak 6%, 8%, dan 10% dari berat total kadar aspal optimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas, *marshall quotient*, VFA semakin kecil. Sedangkan nilai *flow*, VIM, dan VMA semakin besar. Penambahan limbah ban bekas dapat mengurangi penggunaan aspal dalam campuran laston.

7. JF. Sandrijanie Linggo dan Amelia Bunga Nugrahenny (2022). “Limbah Beton Sebagai Substitusi Material Pada Laston AC-WC”. Perlu adanya inovasi baru yang ramah lingkungan pada material perkerasan jalan, seperti penggunaan limbah beton sebagai bahan pengganti beton AC-WC, dengan GGBFS (*Ground Graulated Blast Furnance Slag*) sebagai pengisi. Penelitian ini menggunakan kadar limbah beton 0%, 25%, 50%, dan 75% dengan kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% masing-masing, dan GGBFS sebagai pengisi digunakan 2% sesuai dengan ketentuan Umum Spesifikasi Jalan Raya 2010 Revisi 3. Dari hasil pengujian diketahui bahwa semakin banyak limbah beton yang digunakan pada Campuran beton AC-WC maka semakin rendah

nilai VMA dan VITMnya. Sebagai bahan pengganti yang mempunyai efek baik Karakteristik marshall terdapat pada campuran limbah beton 25% dengan kadar aspal 5,5% -6,5% dan KAO nilai 6,12%, limbah beton 50% dengan kadar aspal 6% -6,5% dan nilai KAO 6,25%.

8. Muhammad Indra Kurniawan (2023) “Pemanfaatan Limbah Serbuk Marmer Sebagai Pengganti Filler Pada Aspal Beton Lapis Aus”. Penelitian ini membahas tentang pengaruh penambahan limbah serbuk marmer sebagai pengganti filler pada aspal beton lapis aus (AC-WC) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kekuatan aspal beton dengan penambahan pengganti filler limbah serbuk marmer terhadap karakteristik Marshall dan untuk mengetahui keefektifitas penggunaan pengganti filler limbah serbuk marmer pada aspal beton lapis aus (AC-WC) dibandingkan dengan campuran aspal beton tanpa pengganti filler limbah serbuk marmer. Benda uji aspal beton dibuat dengan kadar aspal rencana sebesar 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% dan 6,5% serta variasi pengganti filler limbah serbuk marmer sebesar 0%, 1%, 2% dan 3% dengan masing-masing variasi benda uji sebanyak 3 buah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas dengan pengganti filler limbah serbuk marmer yaitu sebesar 1192,44 kg, dimana nilai stabilitas tersebut lebih besar dibandingkan dengan aspal beton tanpa pengganti filler limbah serbuk marmer yaitu sebesar 988,47 kg.
9. Yanti, dkk. (2021). “Karakteristik Campuran Laston Lapis Aus Yang Menggunakan Agregat Limbah Beton”. Tujuan penelitian berfokus pada pengujian karakteristik campuran Laston Lapis Aus, Agregat yang diambil

kemudian yang akan dikaji ialah agregat dari Limbah Beton. Metode yang digunakan dalam penelitian ini antara lain menguji sifat agregat kasar, agregat halus dan filler, setelah itu dilakukan perancangan campuran Laston Lapis Aus setelah itu dilakukan pengujian Marshall adapun pengujian marshall yang dilakukan yaitu Marshall konvensional untuk mendapat nilai karakteristik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik bahan perkerasan berupa agregat dari Limbah beton memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 sebagai lapisan jalan. Melalui pengujian Marshall diperoleh karakteristik campuran Laston Lapis Aus dengan Kadar aspal 5.50%, 6.00%, 6.50%, 7.00%, dan 7.50%.

10. Afif Bagus Ansori. (2017). “Pengaruh Mutu Limbah Beton Sebagai Bahan Substitusi Agregat Kasar Pada Kualitas Campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)”. Limbah beton yang digunakan adalah limbah sampel beton dengan mutu $f'c$ 25, $f'c$ 35 dan $f'c$ 45. Perencanaan campuran yang akan diteliti menggunakan aspal beton lapis antara atau asphalt concrete-binder course (AC-BC). Limbah beton mutu $f'c$ 25, $f'c$ 35 dan $f'c$ 45 digunakan sebagai agregat kasar pengganti, masing-masing mutu beton akan dicampur dengan variasi kadar aspal 4% sampai dengan 8%. Penelitian ini menggunakan metode pengujian Marshall untuk menentukan ketahanan (stabilitas) terhadap kelelahan plastis (flow). Nilai bagi dari stabilitas dan flow atau Marshall Quotient (MQ) pada masing-masing campuran dibandingkan untuk mengetahui pengaruh mutu limbah beton terhadap kualitas campuran asphalt concrete-binder course (AC-BC). Campuran

asphalt concrete-binder course (AC-BC) dengan agregat limbah beton mutu $f'c$ 25 menghasilkan nilai MQ tertinggi yaitu 214,31 kg/mm pada kadar aspal 4%, 200,02 kg/mm pada kadar aspal 5%, 194,09 kg/mm pada kadar aspal 6%, 188,60 pada kadar aspal 7% dan 151,48 pada kadar aspal 8%. Campuran asphalt concrete-binder course (AC-BC) dengan agregat limbah beton mutu $f'c$ 35 menghasilkan nilai MQ 200,07 kg/mm pada kadar aspal 4%, 185,25 kg/mm pada kadar aspal 5%, 179,96 kg/mm pada kadar aspal 6%, 170,54 pada kadar aspal 7% dan 142,20 pada kadar aspal 8%. Campuran asphalt concrete-binder course (AC-BC) dengan agregat limbah beton mutu $f'c$ 45 menghasilkan nilai MQ terendah yaitu 176,29 kg/mm pada kadar aspal 4%, 173,55 kg/mm pada kadar aspal 5%, 165,55 kg/mm pada kadar aspal 6%, 152,74 pada kadar aspal 7% dan 130,14 pada kadar aspal 8%.

11. Nauval Rizky. 2021. "Pengaruh Substitusi Styrofoam Pada Campuran *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) Dengan Pengujian Marshall". Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui adanya nilai perbandingan karakteristik aspal yang menggunakan substitusi *Styrofoam* dengan aspal yang tidak menggunakan *Styrofoam*. Aspal yang digunakan pada penelitian adalah aspal dengan penetrasi 60/70 dengan Persentase campuran *styrofoam* yang digunakan adalah 2%, 2,5%, dan 3% dari total berat Kadar Aspal Optimum. Pada setiap variasi campuran terdapat 3 benda uji. Dari pengujian yang dilakukan didapatkan nilai kadar aspal optimum sebesar 5,99%. Nilai *bulk density* pada kadar *styrofoam* 2% sebesar 2,346 gr/cc, kadar *styrofoam* 2,5% sebesar 2,357 gr/cc, kadar *styrofoam* 3% sebesar 2,356 gr/cc. Nilai *stability* pada kadar *styrofoam* 2% sebesar 828 kg, kadar *styrofoam* 2,5% sebesar 853 kg, kadar *styrofoam* 3% sebesar 878 kg. Nilai VIM pada kadar

styrofoam 2% sebesar 3,66%, kadar *styrofoam* 2,5% sebesar 3,20%, kadar *styrofoam* 3% sebesar 3,25%. Nilai VFA pada kadar *styrofoam* 2% sebesar 76,42%, kadar *styrofoam* 2,5% sebesar 78,08%, kadar *styrofoam* 3% sebesar 78,94%. Nilai VMA pada kadar *styrofoam* 2% sebesar 14,9%, kadar *styrofoam* 2,5% sebesar 14,5%, dan kadar *styrofoam* 3% sebesar 15,3%. Nilai flow pada kadar 2% sebesar 2,47 mm, pada kadar 2,5% sebesar 2,76 mm, kadar 3% sebesar 3,01 mm. Aspal dengan campuran *styrofoam* memenuhi nilai spesifikasi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, yaitu penelitian di laboratorium yang bertujuan untuk menyelidiki proses penelitian dilakukan dengan melakukan serangkaian pengujian terhadap karakteristik bahan yang digunakan persyaratan yang ditentukan. Tujuan utama dari penelitian adalah menentukan kadar campuran optimum limbah beton sebagai pengganti agregat kasar dan agregat halus pada campuran laston (AC-WC).

B. Lokasi Dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiyah Parepare mulai dari bulan Januari 2024 sampai dengan bulan Februari 2024.

C. Bahan dan Alat

1. Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini :

- a. Agregat halus yang digunakan berasal dari Laboratorium Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiyah.
- b. *Filler* atau material lolos saringan No. 200 yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen (*Portland Cement*).
- c. Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal curah penetrasi 60/70.

2. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari :

- a. *Mesin Los Angeles*
- b. Saringan (ayakan)
- c. Mesin penggetar ayakan (*shieve shaker*)
- d. Oven
- e. Timbangan
- f. Spatula
- g. Termometer
- h. Piknometer/gelas ukur, dengan kapasitas 500 ml
- i. Alat penumbuk manual
- j. Marshall

D. Prosedur Penelitian

1. Pemeriksaan Bahan Agregat

Pemeriksaan yang dilakukan pada material agregat yaitu meliputi pemeriksaan keausan agregat, berat jenis agregat, dan gradasi agregat.

2. Pemeriksaan Bahan Aspal

Aspal yang akan digunakan perlu dilakukan pemeriksaan agar diketahui kualitasnya. Adapun pemeriksaan terhadap aspal yaitu pengujian penetrasi, pengujian titik leleh, dan berat jenis.

3. Pembuatan *Job Mix Formula*

Pada tahap ini akan dihasilkan kadar komposisi yang optimum. Berpedoman pada kadar aspal yang sudah disyaratkan dalam Spesifikasi Teknis Bina Marga

2018. Kadar aspal yang digunakan sebesar 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%. Kemudian menggunakan limbah beton sebagai substitusi agregat kasar dan agregat halus sesuai prosentase jumlah campuran agregat. Berdasarkan berat campuran benda uji sebesar 5000 dan 1200 gr.

E. Teknik Pengambilan Data

Teknik pengumpulan data dilaksanakan dengan metode eksperimen terhadap beberapa benda uji dari berbagai kondisi perlakuan di Laboratorium. Teknik pengambilan data mencakup pengambilan data primer dan data sekunder.

1. Data primer

Yaitu data yang diperoleh secara langsung dari pelaksanaan penelitian di Laboratorium Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiyah Parepare yaitu :

a) Uji Aspal

- a. Uji Penetrasi Aspal
- b. Uji Titik Lembek Aspal
- c. Uji Berat Jenis Aspal

b) Uji Agregat

- a. Agregat kasar, meliputi analisa saringan, penyerapan, dan keausan agregat.
- b. Agregat halus, meliputi analisa saringan dan penyerapan.

c) Uji *Marshall*

2. Data sekunder

Yang diperoleh dari mengumpulkan data standar sesuai dengan spesifikasi yang ada, serta mencari data yang telah ada dan dari buku-buku ilmiah yang

masih berhubungan dengan penelitian.

F. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data pada penelitian adalah metode *marshall*. Untuk mendapatkan mutu aspal beton yang baik, dalam proses perencanaan campuran harus memperhatikan karakteristik campuran aspal beton.

G. Membuat Mix Design

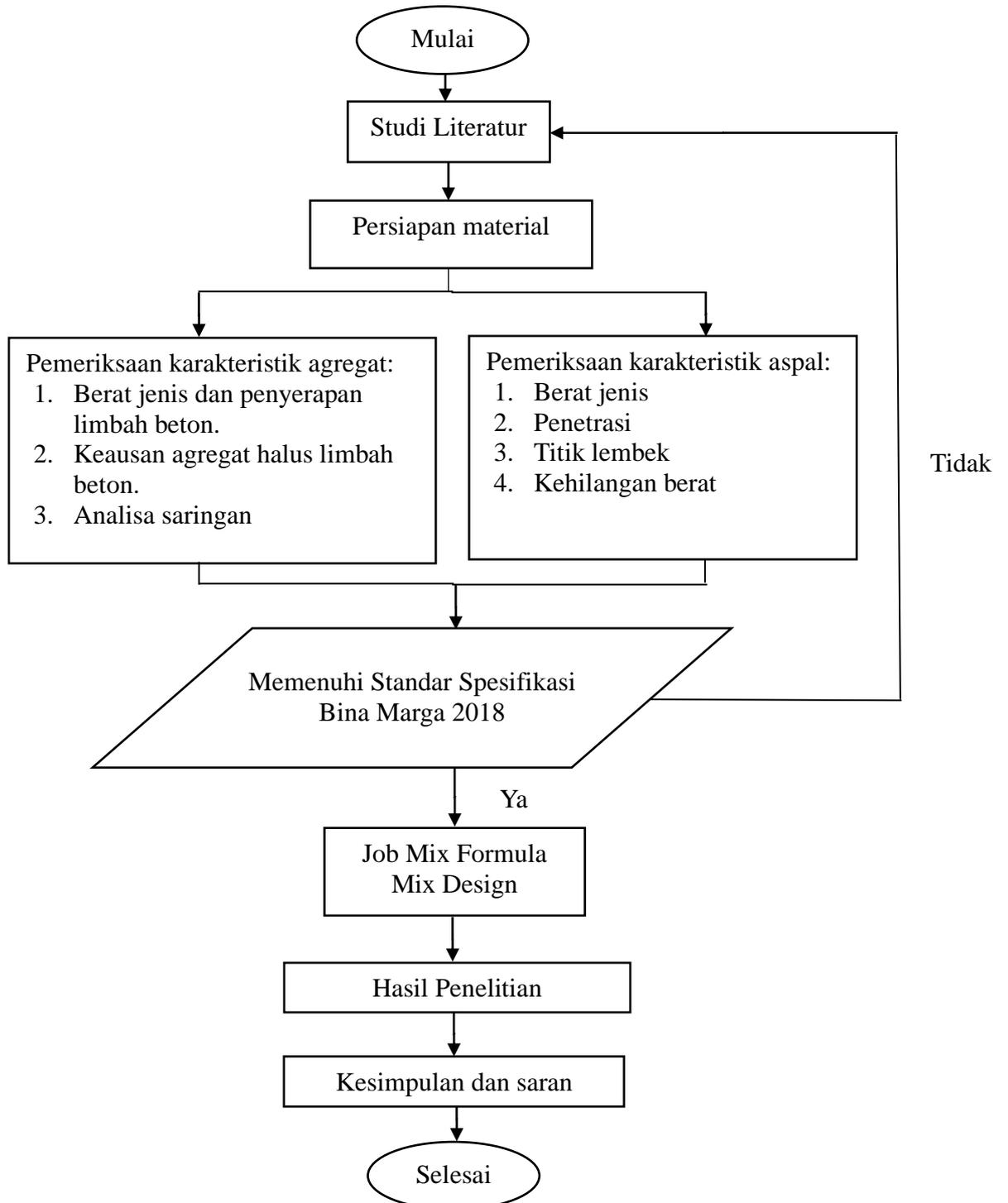
Urutan perencanaan campuran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung komposisi campuran berdasarkan data analisa saringan masing-masing agregat.
2. Menentukan kadar aspal rencana untuk mencari kadar aspal optimum.
3. Membuat benda uji (briket) untuk tiap % kadar aspal rencana.

H. Pengujian Marshall

Dilakukan uji *marshall* untuk mendapatkan stabilitas dan kelelehan (*flow*) benda uji sesuai Spesifikasi teknis Bina marga tahun 2018. Parameter marshall yang dihitung antara lain: VIM, VMA, VFB, berat volume serta parameter seusai yang terdapat pada spesifikasi campuran.

I. Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemeriksaan Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat

Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan agregat pada penelitian ini terdiri atas pengujian berat jenis agregat kasar dan halus.

1. Berat jenis agregat kasar 1-2

Hasil pengujian agregat kasar 1-2 berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel berikut :

Tabel 4. 1 Berat jenis dan penyerapan agregat kasar 1-2 (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No.	Perhitungan	Hasil pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis bulk	2.62	Min 2.5	gr/cc	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2.65			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2.70			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	1.20	Maks. 3	%	Memenuhi

Dari pengujian berat jenis agregat kasar 1-2 diatas didapat berat jenis bulk 2.62 gr/cc, berat jenis kering permukaan 2.65 gr/cc, berat jenis semu 2.70 gr/cc, dan penyerapan 1.20 %. Jadi, dari hasil analisis yaitu berat jenis agregat kasar 1-2 telah memenuhi Spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr/cc dan penyerapan air maksimal 3%.

2. Berat jenis agregat kasar 0,5-1

Hasil pengujian terhadap agregat kasar 0,5-1 berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 2 Berat jenis dan penyerapan agregat kasar 0,5-1 (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No.	Perhitungan	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis bulk	2.87	Min 2.5	gr/cc	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2.93			Memenuhi
3	Berat jenis semu	3.07			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	2.31	Maks. 3	%	Memenuhi

Dari pengujian berat jenis agregat kasar 0,5-1 diatas didapat berat jenis bulk 2.87 gr/cc, berat jenis kering permukaan 2.93 gr/cc, berat jenis semu 3.07 gr/cc, dan penyerapan 2.31 %. Jadi, dari hasil analisis beart jenis agregat kasar 0,5-1 telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr/cc dan penyerapan air maksimal 3 %.

3. Berat jenis agregat halus (abu batu)

Hasil pengujian terhadap agregat halus (abu batu) berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 4. 3 Berat jenis dan penyerapan agregat halus (abu batu) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No.	Perhitungan	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis bulk	2.60	Min 2.5	gr/cc	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2.63			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2.69			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	1.21	Maks. 3	%	Memenuhi

Dari hasil pengujian berat jenis agregat halus (abu batu) diatas didapat berat jenis bulk 2.60 gr/cc, berat jenis kering permukaan 2.63 gr/cc, berat jenis semu 2.69 gr/cc, dan penyerapan 1.21 %. Jadi, hasil analisis berat jenis agregat halus

(abu batu) telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr/cc dan penyerapan air maksimal 3 %.

B. Pemeriksaan Keausan Agregat Kasar (Abrasi)

Pengujian abrasi merupakan pengujian terhadap daya tahan agregat terhadap kikisan dihubungkan langsung dengan kekuatan hancur dan secara umum cukup aman untuk menganggap agregat dengan kuat hancur yang besar juga mempunyai daya tahan terhadap kikisan besar.

Tabel 4. 4 Hasil pengujian agregat kasar (abrasi) 500 putaran (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Saringan		Berat		Spesifikasi
Lolos	Tertahan	Sebelum (gr)	Sesudah (gr)	
19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	2500	4216	
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	2500	4216	
Jumlah Berat (gram)		5000	4216	
Berat Tertahan		5000	4216	
Saringan No. 12 (gram)				
Persen Keausan		15.68		Maks. 30%

Dari pengujian agregat kasar (abrasi) menggunakan mesin los angeles dan diputar sebanyak 500 putaran Bersama dengan bola-bola baja sebanyak 11 bola, sehingga diperoleh hasil persen keausan sebesar 15.68 % dan telah memenuhi spesifikasi yaitu maksimal 30 %.

C. Pemeriksaan Analisa Saringan Agregat

Pemeriksaan Analisa saringan agregat pada penelitian ini terdiri atas pengujian analisa saringan agregat kasar dan agregat halus.

1. Analisa saringan agregat kasar 1-2

Tabel 4. 5 Hasil analisa saringan agregat kasar 1-2 (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No Saringan	SAMPEL 1				SAMPEL 2				Rata - Rata
	Berat Tertahan	(%) Tertaha	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	350,00	23,33	23,33	76,67	618,50	41,23	41,23	58,77	67,72
3/8"	625,00	41,67	65,00	35,00	367,40	24,49	65,73	34,27	34,64
4	422,00	28,13	93,13	6,87	344,90	22,99	88,72	11,28	9,07
8	44,50	2,97	96,10	3,90	94,80	6,32	95,04	4,96	4,43
16	20,50	1,37	97,47	2,53	5,00	0,33	95,37	4,63	3,58
30	1,80	0,12	97,59	2,41	0,50	0,03	95,41	4,59	3,50
50	1,00	0,07	97,65	2,35	0,00	0,00	95,41	4,59	3,47
100	7,60	0,51	98,16	1,84	0,00	0,00	95,41	4,59	3,22
200	10,60	0,71	98,87	1,13	1,10	0,07	95,48	4,52	2,83
Pan	17,00	1,13	100,00	0,00	67,80	4,52	100,00	0,00	0,00
Jumlah	1500,00	100,00			1500,00	100,00			

2. Analisa saringan agregat kasar 0,5-1

Tabel 4. 6 Hasil Analisa saringan agregat kasar 05-1 (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No. Saringan	SAMPEL 1				SAMPEL 2				Rata - Rata
	Berat Tertahan	(%) Tertaha	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	155,60	10,37	10,37	89,63	0,00	0,00	0,00	100,00	94,81
3/8"	665,20	44,35	54,72	45,28	236,40	15,76	15,76	84,24	64,76
4	201,90	13,46	68,18	31,82	708,30	47,22	62,98	37,02	34,42
8	337,50	22,50	90,68	9,32	418,10	27,87	90,85	9,15	9,23
16	88,70	5,91	96,59	3,41	93,20	6,21	97,07	2,93	3,17
30	30,20	2,01	98,61	1,39	30,30	2,02	99,09	0,91	1,15
50	2,80	0,19	98,79	1,21	0,60	0,04	99,13	0,87	1,04
100	4,60	0,31	99,10	0,90	1,80	0,12	99,25	0,75	0,83
200	0,00	0,00	99,10	0,90	2,70	0,18	99,43	0,57	0,74
Pan	13,50	0,90	100,00	0,00	8,60	0,57	100,00	0,00	0,00
Jumlah	1500,00	100,00			1500,00	100,00			

3. Saringan agregat halus (abu batu)

Tabel 4.7 Hasil analisa saringan agregat halus (abu batu) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No. Saringan	SAMPEL 1				SAMPEL 2				Rata - Rata
	Berat Tertahan	(%) Tertaha	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Kumulatif Tertahan	(%) Lolos	
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
4	162,50	10,83	10,83	89,17	0,00	0,00	0,00	100,00	94,58
8	141,40	9,43	20,26	79,74	155,40	10,36	10,36	89,64	84,69
16	422,70	28,18	48,44	51,56	433,90	28,93	39,29	60,71	56,14
30	160,10	10,67	59,11	40,89	333,80	22,25	61,54	38,46	39,67
50	263,20	17,55	76,66	23,34	169,50	11,30	72,84	27,16	25,25
100	99,40	6,63	83,29	16,71	145,10	9,67	82,51	17,49	17,10
200	158,30	10,55	93,84	6,16	76,30	5,09	87,60	12,40	9,28
Pan	92,40	6,16	100,00	0,00	186,00	12,40	100,00	0,00	0,00
Jumlah	1500,00	100,00			1500,00	100,00			

D. Hasil pemeriksaan aspal

Dari hasil pengujian yang dilakukan terhadap aspal AC 60-70, diperoleh hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 dengan menggunakan spesifikasi umum bina marga 2018 dan data selengkapnya dapat dilihat pada table dibawah ini:

Tabel 4.8 Hasil pengujian aspal (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis aspal	1.02	$\geq 1,0$	gr/cc	Memenuhi
2	Tititk lembek aspal	48.50	≥ 48	$^{\circ}\text{C}$	Memenuhi
3	Penetrasi pada 25 $^{\circ}\text{C}$	69.30	60-70	0,1 mm	Memenuhi
4	Kehilangan berat aspal	0.17	$\leq 0,8$	%	Memenuhi

Dari hasil pengujian diatas diperoleh berat jenis aspal sebesar 1.02 gr/cc, titik lembek aspal sebesar 48,50 $^{\circ}\text{C}$, penetrasi pada 25 $^{\circ}\text{C}$ sebesar 69.30 mm, kehilangan berat aspal 0.17 % dan telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018.

E. Hasil Pemeriksaan Limbah Beton

Hasil pemeriksaan limbah beton ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil pengujian limbah beton (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No.	Perhitungan	Hasil pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis bulk	2.59	Min 2.5	gr/cc	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2.66			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2.80			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	2.92	Maks. 3	%	Memenuhi

Dari pengujian limbah beton diatas didapat berat jenis bulk 2.59 gr, berat jenis kering permukaan 2.66 gr, berat jenis semu 2.80 gr, dan penyerapan 2.92 %. Jadi, dari hasil analisis pengujian limbah beton telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr dan penyerapan air maksimal 3 %.

F. Hasil Rancangan Campuran

1. Hasil gradasi agregat gabungan

Dari hasil pemeriksaan analissa saringan maka gradasi agregat diperoleh seperti pada table 4.9

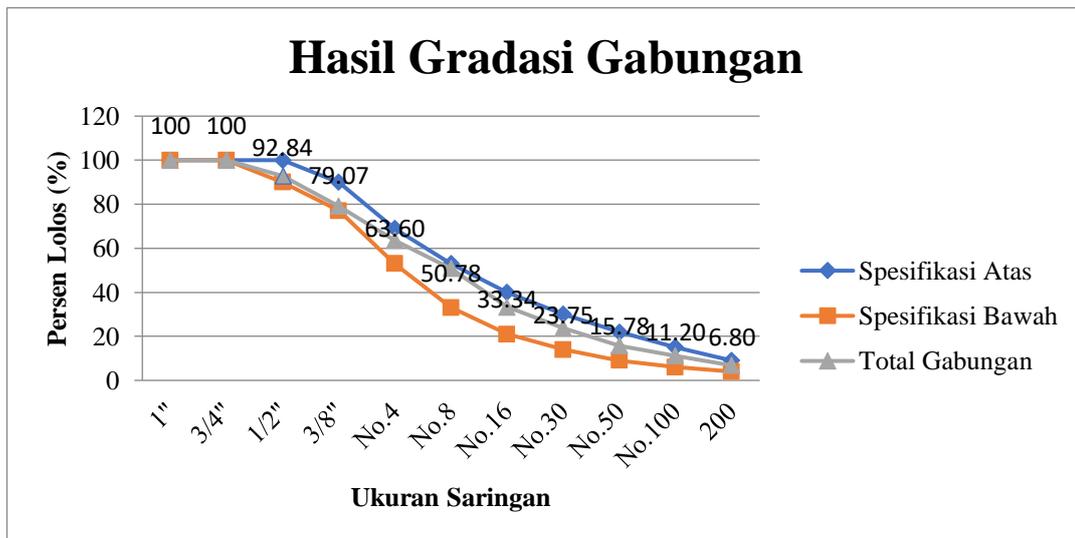
Tabel 4. 10 Hasil gradasi agregat gabungan (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Saringan		Gradasi Agregat			
ASTM	(mm)	Agg.1/2	Agg. 0.5/1	Abu Batu	semen
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,5	67,72	94,81	100,00	100,00
3/8"	9,5	34,64	64,76	100,00	100,00
No.4	4,75	9,07	34,42	94,58	100,00
No.8	2,36	4,43	9,23	84,69	100,00
No.16	1,18	3,58	3,17	56,14	100,00
No.30	0,6	3,50	1,15	39,67	100,00
No.50	0,3	3,47	1,04	25,25	100,00
No.100	0,15	3,22	0,83	17,10	100,00
200	0,075	2,83	0,74	9,28	100,00

Tabel 4. 11 Presentase gradasi agregat gabungan (Sumber: Hasil Pengujian Laboratoium 2024)

Saringan		18%	26%	55%	1%	Total	Spek. AC-WC	Keterangan
ASTM	(mm)	Agg.1/2	Agg 0.5/1	Abu Batu	semen			
1"	25	18,00	26,00	55,00	1,00	100,00	100	Memenuhi
3/4"	19	18,00	26,00	55,00	1,00	100,00	100	Memenuhi
1/2"	12,5	12,19	24,65	55,00	1,00	92,84	90-100	Memenuhi
3/8"	9,5	6,23	16,84	55,00	1,00	79,07	77-90	Memenuhi
No.4	4,75	1,63	8,95	52,02	1,00	63,60	53-69	Memenuhi
No.8	2,36	0,88	0,00	46,58	1,00	48,46	33-53	Memenuhi
No.16	1,18	0,64	0,00	30,88	1,00	32,52	21-40	Memenuhi
No.30	0,6	0,63	0,00	21,82	1,00	23,45	14-30	Memenuhi
No.50	0,3	0,62	0,00	13,89	1,00	15,51	9-22	Memenuhi
No.100	0,15	0,58	0,00	9,41	1,00	10,99	6-15	Memenuhi
200	0,075	0,51	0,00	5,10	1,00	6,61	4-9	Memenuhi

Dari hasil pemeriksaan analisa saringan maka gradasi agregat diperoleh seperti pada tabel diatas. Analisa saringan No. 1 sampai dengan 200 telah memenuhi speksifikasi dengan komposisi agregat ½ adalah 18%, agregat 0,5/1 adalah 26%, abu batu adalah 55% dan semen 1%.



Gambar 4. 1 Grafik hasil gradasi agregat gabungan
 Sumber: (Hasil Pengolahan Data 2024)

Gradasi agregat gabungan untuk campuran aspal, ditunjukkan dalam persen terhadap berat agregat, harus memenuhi batas-batas dan khusus untuk campuran AC-WC harus berada di antara batas atas dan batas bawah yang sesuai dengan spesifikasi. Dari hasil gradasi agregat gabungan diatas telah memenuhi batas-batas spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

1. Hasil Berat Agregat Yang Diperlukan Untuk Benda Uji

Dari hasil analisa agregat gabungan diatas, didapat perhitungan berat agregat yang diperlukan seperti pada tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Berat agregat yang diperlukan untuk benda uji (Sumber: Hasil Pengolahan Data 2024)

Kadar Aspal (%)	Aspal (gr)	Agregat 1-2 (gr)	Agregat 0.5-1 (gr)	Abu Batu (gr)	Semen (gr)
4.50	54.00	332.34	366.72	389.64	57.30
5.00	60.00	330.60	364.80	387.60	57.00
5.50	66.00	328.86	362.88	385.56	56.70
6.00	72.00	327.12	360.96	383.52	56.40
6.50	78.00	325.38	359.04	381.48	56.10

Untuk pembuatan rancangan rencana (RCR), slag dan agregat (bila diperlukan) diambil dari bin panas. Selanjutnya, tentukan komposisi masing-masing fraksi slag dan agregat serta bahan pengisi (bila diperlukan) sesuai gradasi jenis campuran yang akan dirancang. Pembuatan benda uji dilakukan dengan menggunakan Metode pengujian Marshall sesuai ASTM D6927-06 atau ASTM D5581-07a. perhitungan volumetrik campuran dapat dilakukan sesuai AASHTO M 323. Perhitungan perkiraan kadar aspal rancangan, yaitu salah satu rumus untuk menghitung perkiraan kadar aspal rancangan adalah:

$$P_b = 0,035(CA) + 0,045(FA) + 0,18(FF) + K$$

$$P_b = 0,035 (55,38) + 0,045 (39,77) + 4,18(4.85) + 1,00$$

$$P_b = 5,60$$

Keterangan :

P_b : adalah perkiraan kadar aspal dalam campuran (% berat campuran).

CA : adalah persentase agregat yang tertahan saringan 2,36 mm (No.8).

FA : adalah persentase agregat yang lolos saringan 2,36 mm (No.8) dan tertahan saringan 0,075 mm (No. 200).

FF : adalah persentase agregat yang lolos saringan 0,075 mm (No.200).

K: Nilai konstanta

Dari hasil kadar perhitungan kadar aspal rencana akan di buktikan dengan metode mengetes semua sampel dengan kadar aspal yang berbeda-beda mulai dari 4,5% sampai dengan 6,5% dengan ketelitian 0,5.

G. Hasil Pengujian Marshall

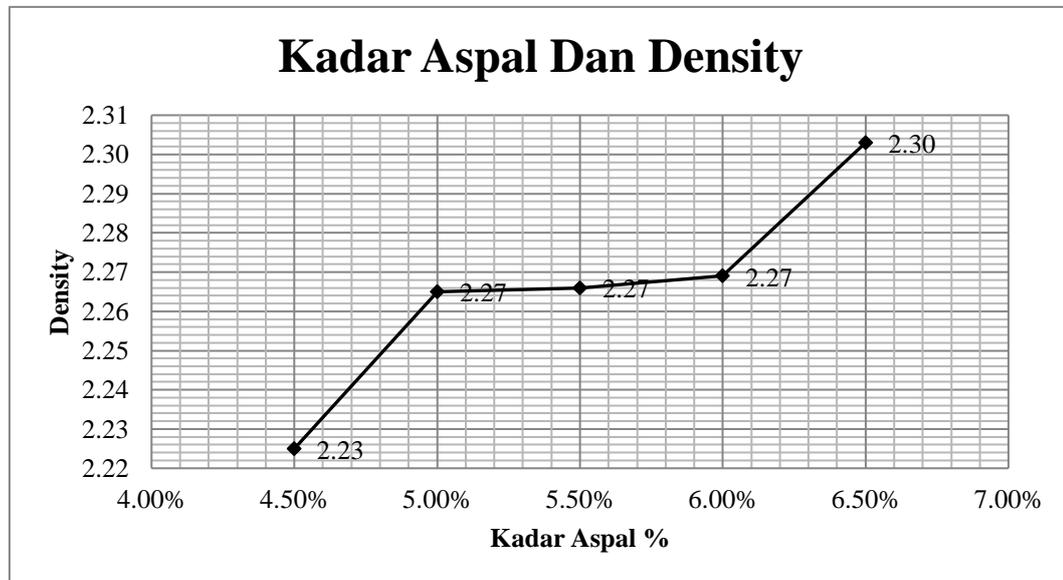
1. Kepadatan

Tabel 4. 13 Kepadatan (*Density*) agregat kasar (limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Density (g/cm ³)
4,50%	2.225
5,00%	2.265
5,50%	2.266
6,00%	2.269
6,50%	2.303

Berdasarkan Tabel 4.13 pengujian kepadatan (Density) agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 2.225 g/cm³, kadar aspal 5,0%

sebesar 2.265 g/cm^3 , kadar aspal 5,5% sebesar 2.266 g/cm^3 , kadar aspal 6,0% sebesar 2.269 , dan kadar aspal 6,5% sebesar 2.303 g/cm^3 .



Gambar 4. 2 Grafik hubungan kadar aspal dan kepadatan (*Density*) agregat kasar (limbah beton)

Sumber: (hasil pengujian laboratorium 2024)

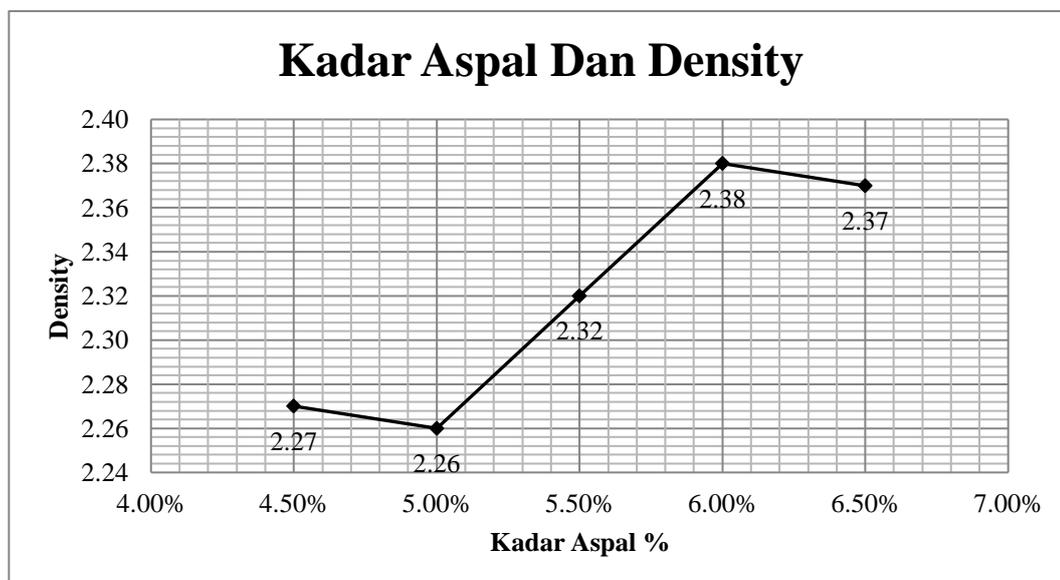
Dari hasil pengujian nilai kepadatan paling tinggi pada kadar aspal 6,5% sebesar 2,30 dan paling rendah 4,5% sebesar 2,23.

Tabel 4. 14 Kepadatan (*Density*) agregat halus (limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Density (g/cm^3)
4,50%	2.270
5,00%	2.260
5,50%	2.320
6,00%	2.380
6,50%	2.370

Berdasarkan Tabel 4.14 pengujian kepadatan (*Density*) agregat halus (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 2.270 g/cm^3 , kadar aspal 5,0% sebesar 2.260 g/cm^3 , kadar aspal 5,5% sebesar 2.320 g/cm^3 , kadar aspal

6,0% sebesar 2.380, dan kadar aspal 6,5% sebesar 2.370 g/cm³.



Gambar 4. 3 Grafik hubungan kadar aspal dan kepadatan (Density) agregat halus (limbah beton)

Sumber: (hasil pengujian laboratorium 2024)

Dari hasil pengujian nilai kepadatan paling tinggi pada kadar aspal 6% sebesar 2,38 g/cm³ dan paling rendah 5% sebesar 2,26 g/cm³.

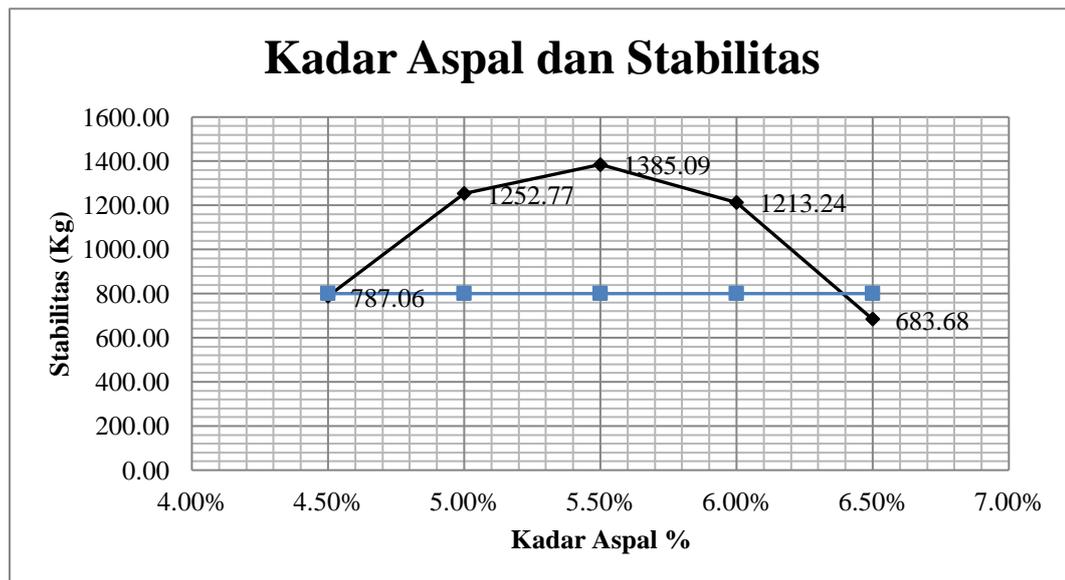
2. Stabilitas

Stabilitas adalah ketahanan lapis perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya, tanpa mengalami perubahan bentuk seperti gelombang dan alur. Nilai stabilitas benda uji diperoleh dari pembacaan arloji stabilitas pada saat pengujian dengan alat *marshall*. Selanjutnya dicocokkan dengan angka kalibrasi *proving ring* dengan satuan lbs atau kilogram, dan masih harus dikoreksi dengan faktor koreksi tebal benda uji. Berikut ini adalah tabel dan gambar hubungan kadar aspal dan stabilitas.

Tabel 4. 15 Hasil pengujian stabilitas (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

kadar aspal (%)	Stabilitas (Kg)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4,50%	787,06	800	-	Tidak memenuhi
5,00%	1252,77	800		Memenuhi
5,50%	1385,09	800		Memenuhi
6,00%	1213,24	800		Memenuhi
6,50%	683,68	800		Tidak memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.15 Pengujian stabilitas agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 787,06 kg, kadar aspal 5,0% sebesar 1252,77 kg, kadar aspal 5,5% sebesar 1385,09 kg, kadar aspal 6,0% sebesar 1213,24 kg, dan kadar aspal 6,5% sebesar 683,68 kg. Jadi hasil pengujian stabilitas yang memenuhi spesifikasi minimal 800 adalah kadar aspal 5,0% sampai dengan 6,0%.



Gambar 4. 4 Grafik hubungan kadar aspal dan stabilitas agregat kasar (limbah beton)

Sumber : (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.4 grafik menunjukkan hubungan stabilitas dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5% sampai dengan 6,5% mengalami kenaikan dan penurunan. Dari

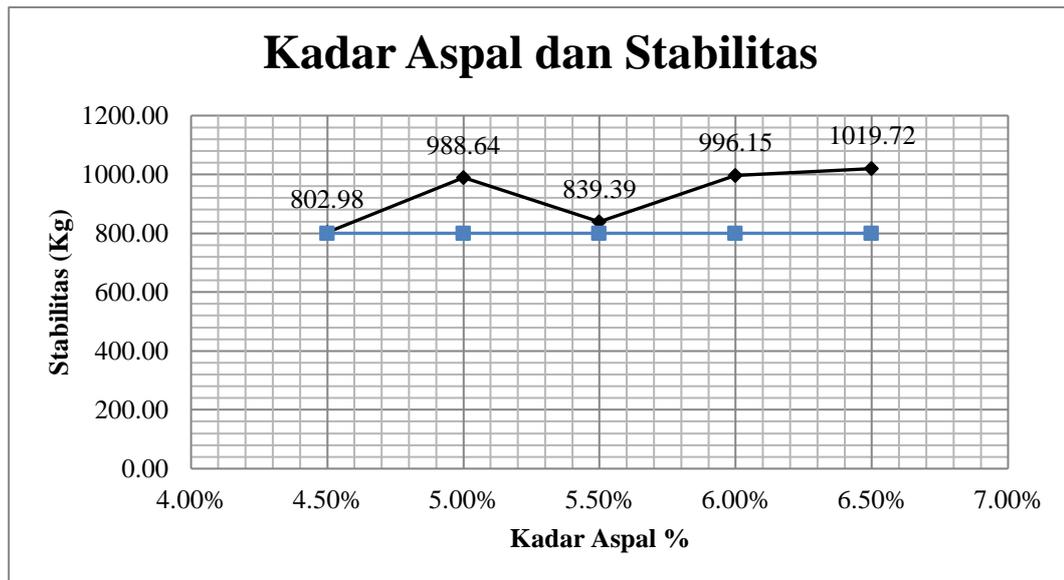
grafik nilai stabilitas tertinggi yaitu 5,5% sebesar 1252,77 kg, dan nilai stabilitas terendah yaitu pada kadar aspal 6,5% sebesar 683,68 kg.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat nilai stabilitas minimum untuk lalu lintas berat yaitu 800 kg, sehingga kadar aspal yang memenuhi persyaratan yaitu 5,0% sampai 6,0%.

Tabel 4. 16 Hasil pengujian stabilitas (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (Kg)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4,50%	802,98	800	-	Memenuhi
5,0%	988,64	800		Memenuhi
5,50%	839,39	800		Memenuhi
6,00%	996,15	800		Memenuhi
6,50%	1019,72	800		Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.16 Pengujian stabilitas agregat halus (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 802,98 kg, kadar aspal 5,0% sebesar 988,64 kg, kadar aspal 5,5% sebesar 839,39 kg, kadar aspal 6,0% sebesar 996,15 kg, dan kadar aspal 6,5% sebesar 1019,72 kg. Jadi hasil pengujian stabilitas telah memenuhi spesifikasi.



Gambar 4. 5 Grafik hubungan kadar aspal dan stabilitas agregat halus (limbah beton)

Sumber : (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.5 grafik menunjukkan hubungan stabilitas dan kadar aspal, pada kadar aspal ,5% sampai dengan 6,5% mengalami kenaikan dan penurunan. Dari grafik nilai stabilitas tertinggi yaitu 6,5% sebesar 1019,72 kg, dan nilai stabilitas terendah yaitu pada kadar aspal 4,5% sebesar 802,98 kg.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat nilai stabilitas minimum untuk lalu lintas berat yaitu 800 kg, sehingga semua kadar aspal yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan yang tertentu.

3. Rongga diantara agregat (VMA)

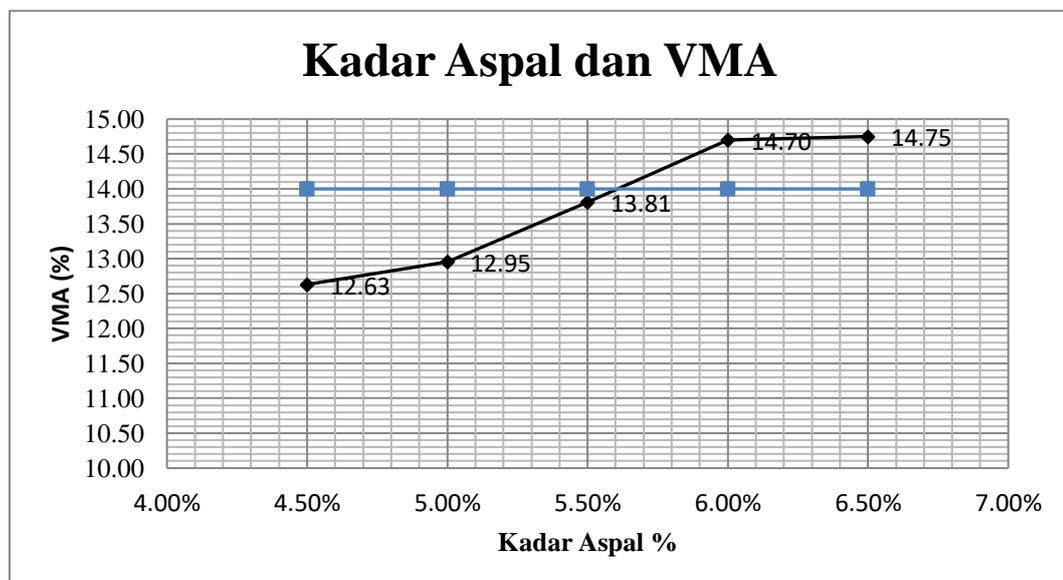
VMA (*Void In Mineral Agregate*) merupakan kadar persentase ruang rongga diantara partikel agregat pada benda uji, besarnya nilai VMA dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi bahan susun, jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan.

Hubungan antara VMA dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 17 Hasil pengujian VMA (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal %	Nilai VMA (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4,50%	12,63	14	-	Tidak memenuhi
5,00%	12,95	14		Tidak memenuhi
5,50%	13,81	14		Tidak memenuhi
6,00%	14,70	14		Memenuhi
6,50%	14,75	14		Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.17 Pengujian VMA agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 12,63%, kadar aspal 5,0% sebesar 12,95 %, kadar aspal 5,5% sebesar 13,81 %, kadar aspal 6,0% sebesar 14,70 %, dan kadar aspal 6,5% sebesar 14,74 %. Jadi hasil pengujian VMA agregat kasar limbah beton telah memenuhi spesifikasi minimal 14%.



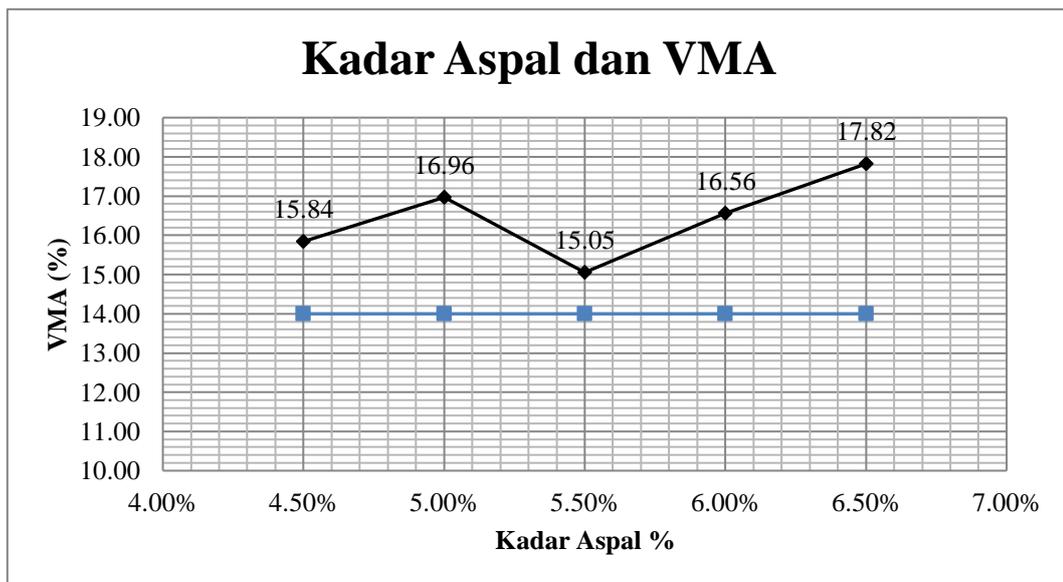
Gambar 4. 6 Grafik hubungan kadar aspal dan VMA agregat kasar (limbah beton) Sumber : (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Berdasarkan gambar 4.6 grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dan VMA, pada kadar aspal 4,5% sampai dengan 6,5% mengalami kenaikan dan penurunan. Dari grafik nilai VMA tertinggi yaitu 6,5% sebesar 14,75 kg, dan nilai VMA terendah yaitu pada kadar aspal 4,5% sebesar 12,63 kg. Ditinjau dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VMA (Void In Mineral Aggregate) minimal 14 %, sehingga kadar aspal yang memenuhi persyaratan yaitu 6,0% dan 6,5%.

Tabel 4. 18 Hasil pengujian VMA (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai VMA (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	15,84	14	-	Memenuhi
5.00%	16,96	14		Memenuhi
5.50%	15,05	14		Memenuhi
6.60%	16,56	14		Memenuhi
6.50%	17,82	14		Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.18 Pengujian VMA agregat halus (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 15,84%, kadar aspal 5,0% sebesar 16,96 %, kadar aspal 5,5% sebesar 15,05 %, kadar aspal 6,0% sebesar 16,56 %, dan kadar aspal 6,5% sebesar 17,82 %. Jadi hasil pengujian VMA agregat halus limbah beton telah memenuhi spesifikasi minimal 14%.



Gambar 4. 7 Grafik hubungan kadar aspal dan VMA agregat halus (limbah beton)

Sumber : (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Berdasarkan gambar 4.7 grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dan VMA, pada kadar aspal 4,5% sampai dengan 6,5% mengalami kenaikan. Dari grafik nilai VMA tertinggi yaitu 6,5% sebesar 17,82 kg, dan nilai VMA terendah yaitu pada kadar aspal 4,5% sebesar 15,84 kg. Ditinjau dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VMA (*Void In Mineral Aggregate*) minimal 14 %, sehingga semua kadar aspal yang memenuhi persyaratan.

4. Rongga Terhadap Campuran (VIM)

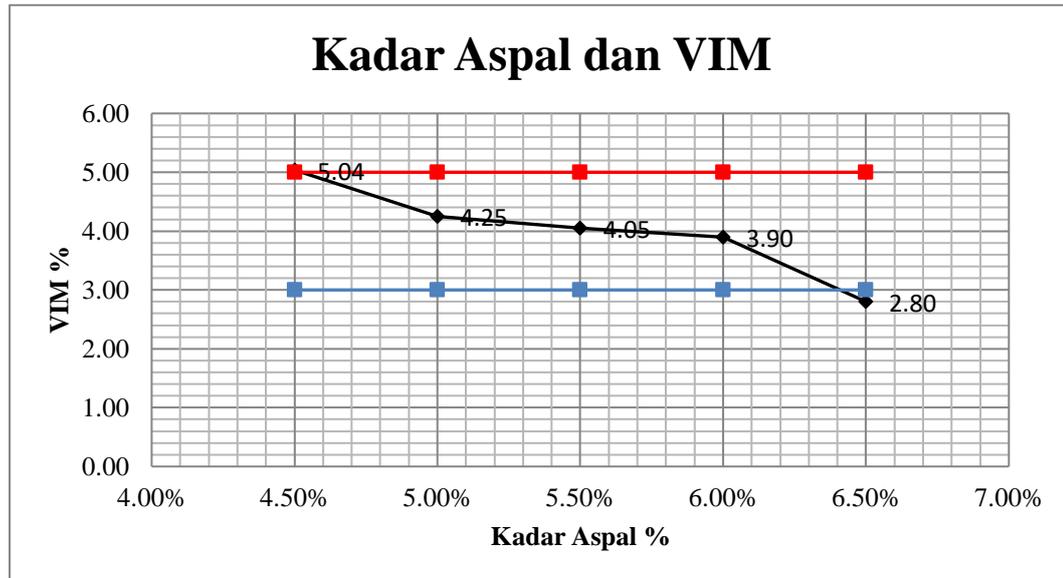
VIM (*Void In The Mix*) merupakan persentase rongga yang terdapat dalam total campuran. Jika nilai VIM (*Void In Mix*) yang terlampau tinggi berkurangnya keawetan dari lapis keras karena rongga yang terlalu besar akan memudahkan masuknya air dan udara kedalam lapis perkerasan.

Nilai VIM yang terlampau rendah akan menyebabkan mudah terjadinya bleeding pada lapis keras. Selain bleeding, dengan VIM yang rendah kekakuan lapis keras akan mengalami retak dan pecah (*cracking*) apabila menerima beban lalulintas karena tidak cukup lentur untuk menerima deformasi yang terjadi. Hubungan antara VIM dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 19 Hasil pengujian VIM (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal %	Nilai VIM (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	5,04	3	5	Tidak Memenuhi
5.00%	4,25	3	5	Memenuhi
5.50%	4,05	3	5	Memenuhi
6.00%	3,90	3	5	Memenuhi
6.50%	2,80	3	5	Tidak Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.19 Pengujian VIM agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 5,04 %, kadar aspal 5,0% sebesar 4,25 %, kadar aspal 5,5% sebesar 4,05 %, kadar aspal 6,0% sebesar 3,90 %, dan kadar aspal 6,5% sebesar 2,80 %. Jadi hasil pengujian VIM agregat kasar limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 3% dan maksimal 5% adalah kadar aspal 5,0% sampai dengan 6,0%.



Gambar 4.8 Grafik hubungan kadar aspal dan VIM agregat kasar (limbah beton)

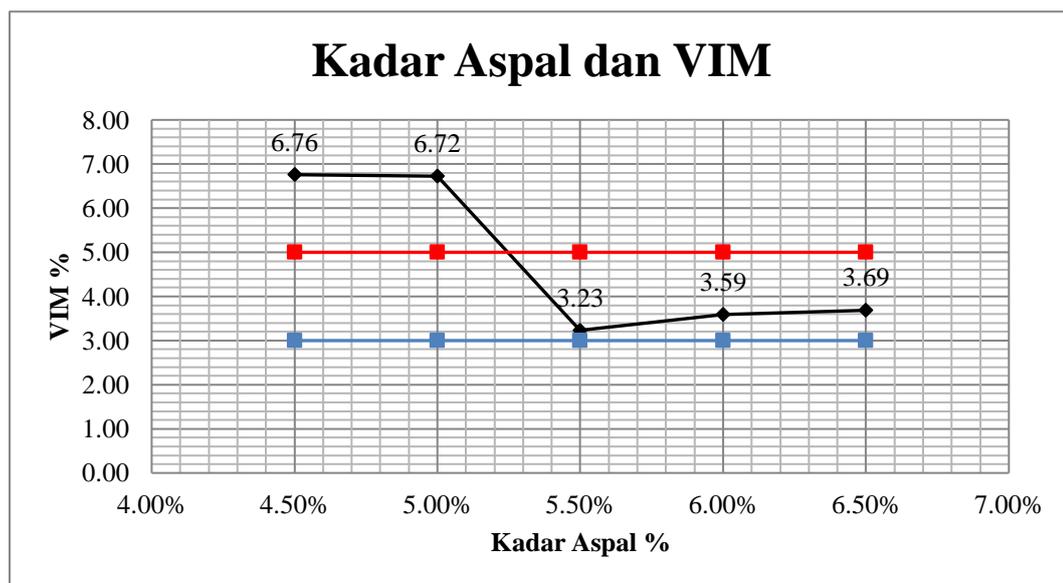
Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.8 grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dan VIM, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % nilai VIM tertinggi 5,04 % pada kadar aspal 4,5 % dan terendah 2,80 % pada kadar aspal 5,5 %. Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan yaitu sebesar 3% - 5%. Nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 5% sampai dengan 6%.

Tabel 4. 20 Hasil pengujian VIM (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai VIM (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	6.76	3	5	Tidak Memenuhi
5.00%	6.72	3	5	Tidak Memenuhi
5.50%	3.23	3	5	Memenuhi
6.60%	3.59	3	5	Memenuhi
6.50%	3.69	3	5	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.20 Pengujian VIM agregat halus (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 6,76%, kadar aspal 5,0% sebesar 6,72 %, kadar aspal 5,5% sebesar 3,23 %, kadar aspal 6,0% sebesar 3,59 %, dan kadar aspal 6,5% sebesar 3,69%. Jadi hasil pengujian VIM agregat halus limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 3% dan maksimal 5% adalah kadar aspal 5,5% sampai dengan 6,5%.



Gambar 4. 9 Grafik hubungan kadar aspal dan VIM agregat halus (limbah beton)
Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.9 grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dan VIM, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % nilai VIM tertinggi 6,76 % pada kadar aspal 4,5 % dan terendah 3,23 % pada kadar aspal 5,5 %. Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan yaitu sebesar 3% - 5 %. Nilai VIM (*Void In Mix*) yang memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 5,5% sampai dengan 6,5%.

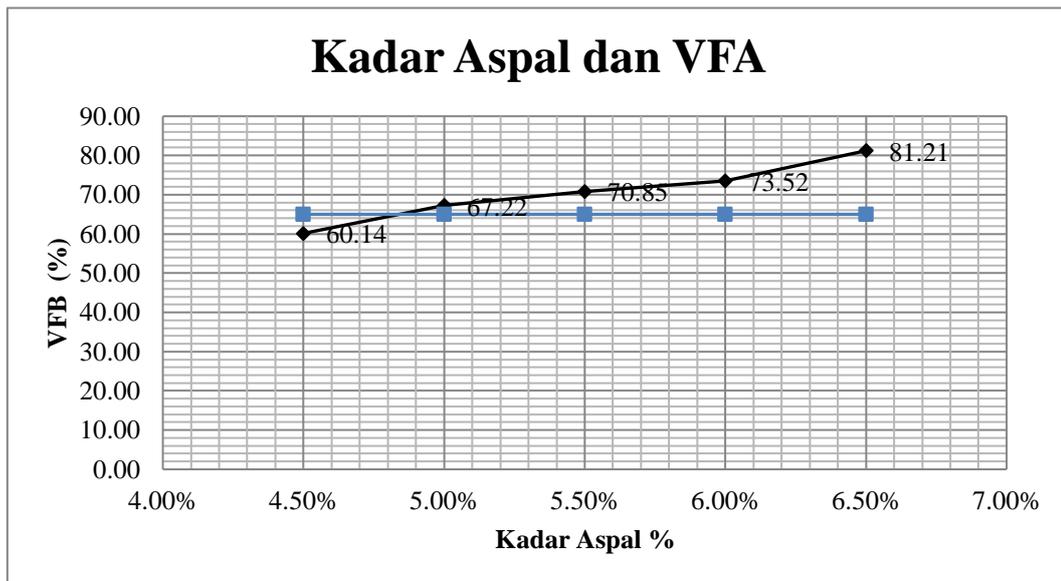
5. Rongga terisi aspal (VFA)

VFA (*Void Filled With Asphalt*) menyatakan prosentase rongga udara yang terisi aspal pada campuran yang telah mengalami pemadatan. Hubungan antara VIM dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 21 Hasil pengujian VFB (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai VFA (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	60,14	65	-	Tidak memenuhi
5.00%	67,22	65		Memenuhi
5.50%	70,85	65		Memenuhi
6.00%	73,52	65		Memenuhi
6.50%	81,21	65		Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.21 Pengujian VFA agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 60,14 %, kadar aspal 5,0% sebesar 67,22 %, kadar aspal 5,5% sebesar 70,85 %, kadar aspal 6,0% sebesar 73,52%, dan kadar aspal 6,5% sebesar 81,21 %. Jadi hasil pengujian stabilitas VFA agegat kasar limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 3% dan maksimal 5% adalah kadar aspal 5,0% sampai dengan 6,5%.



Gambar 4.10 Grafik hubungan kadar aspal dan VFA agregat kasar (limbah beton)

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.10 grafik menunjukkan hubungan VFA dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % dengan nilai VFA paling tinggi yaitu pada kadar aspal 6,5% dengan nilai 81,21 % dan terendah pada kadar aspal 4,5% dengan nilai 60,14 %. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar kadar aspal yang digunakan semakin meningkat nilai VFA.

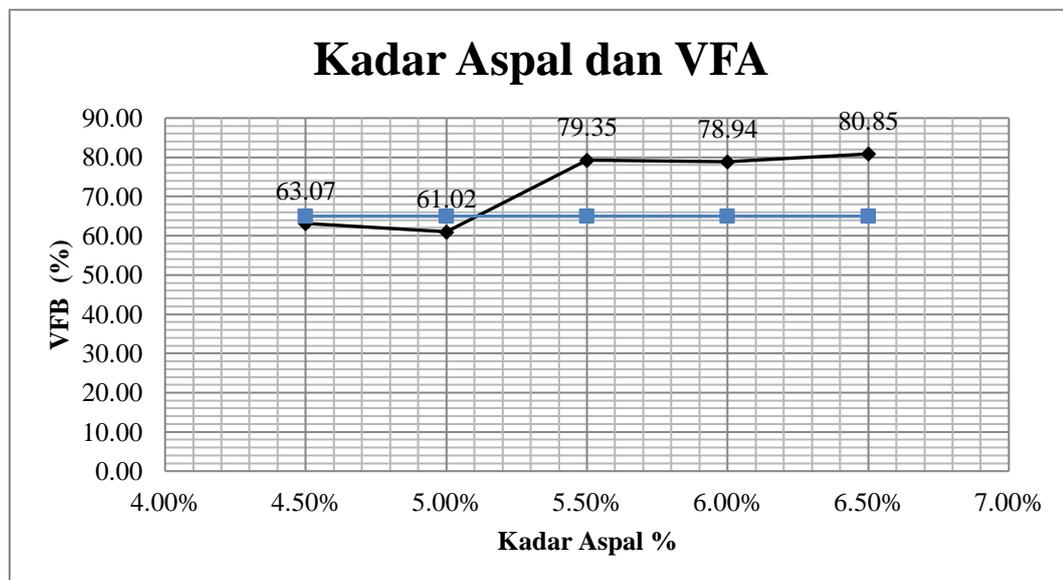
Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VFA minimal 65 %. Sehingga nilai VFA yang memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 5% sampai dengan 6,5 %.

Tabel 4.22 Hasil pengujian VFB (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai VFA (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	63.07	65	-	Tidak memenuhi
5.00%	61.02	65		Tidak memenuhi

5.50%	79.35	65	Memenuhi
6.60%	78.94	65	
6.50%	80.85	65	

Berdasarkan Tabel 4.22 Pengujian VFA agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 63,07 %, kadar aspal 5,0% sebesar 671,02%, kadar aspal 5,5% sebesar 79,35 %, kadar aspal 6,0% sebesar 78,94 %, dan kadar aspal 6,5% sebesar 80,85 %. Jadi hasil pengujian stabilitas yang memenuhi spesifikasi minimal 3% dan maksimal 5% adalah kadar aspal 5,5% sampai dengan 6,5%.



Gambar 4. 11 Grafik hubungan kadar aspal dan VFA agregat halus (limbah beton)

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.11 grafik menunjukkan hubungan VFA dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan 6,5 % dengan nilai VFA paling tinggi yaitu pada kadar aspal 6,5% dengan nilai 80,85 % dan terendah pada kadar aspal 5% dengan nilai 61,02 %.

Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VFA minimal 65 %. Nilai VFA yang memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 5,5% sampai dengan 6,5%.

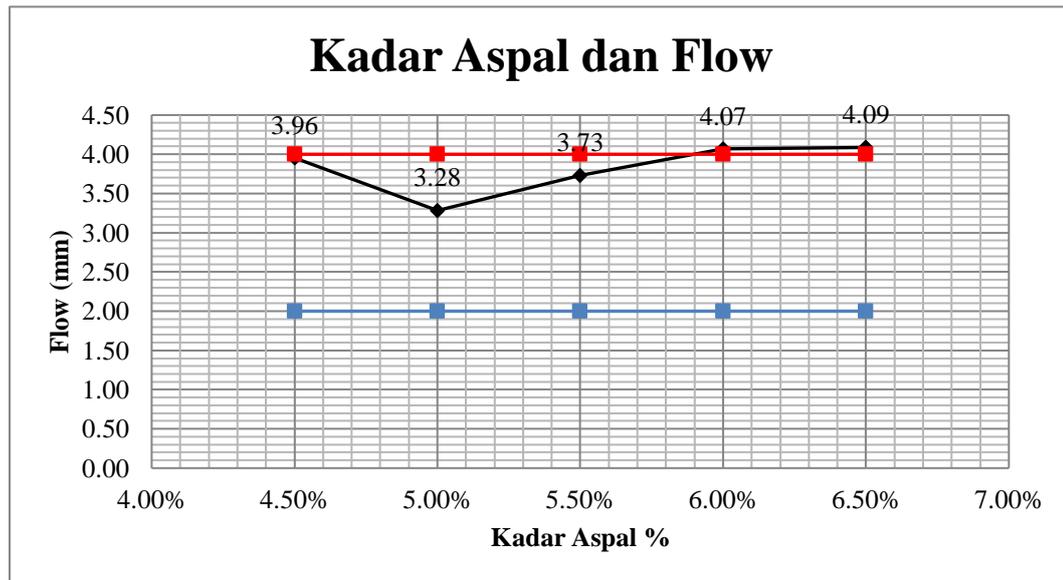
6. Flow

Hubungan antara flow dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel gambar di bawah ini.

Tabel 4. 23 Hasil pengujian Flow (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai Flow (mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	5.73	2	4	Tidak Memenuhi
5.00%	4.04	2	4	Tidak Memenuhi
5.50%	3.81	2	4	Memenuhi
6.60%	3.52	2	4	Memenuhi
6.50%	2.89	2	4	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.23 Pengujian Flow agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 5,73 mm, kadar aspal 5,0% sebesar 4,04 mm, kadar aspal 5,5% sebesar 3,81 mm, kadar aspal 6,0% sebesar 3,52 mm, dan kadar aspal 6,5% sebesar 2,89 mm. Jadi hasil pengujian flow agregat kasar limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 2 mm dan maksimal 4 mm adalah kadar aspal 5,5% sampai dengan 6,5%.



Gambar 4.12 Grafik hubungan kadar aspal dan Flow agregat kasar (limbah beton)

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.12 grafik menunjukkan hubungan flow dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan 6,5 % mengalami penurunan. Dari grafik nilai flow tertinggi yaitu pada kadar aspal 4,5 % sebesar 5,73 mm dan nilai flow terendah yaitu pada kadar aspal 6,5 % sebesar 2,89 mm.

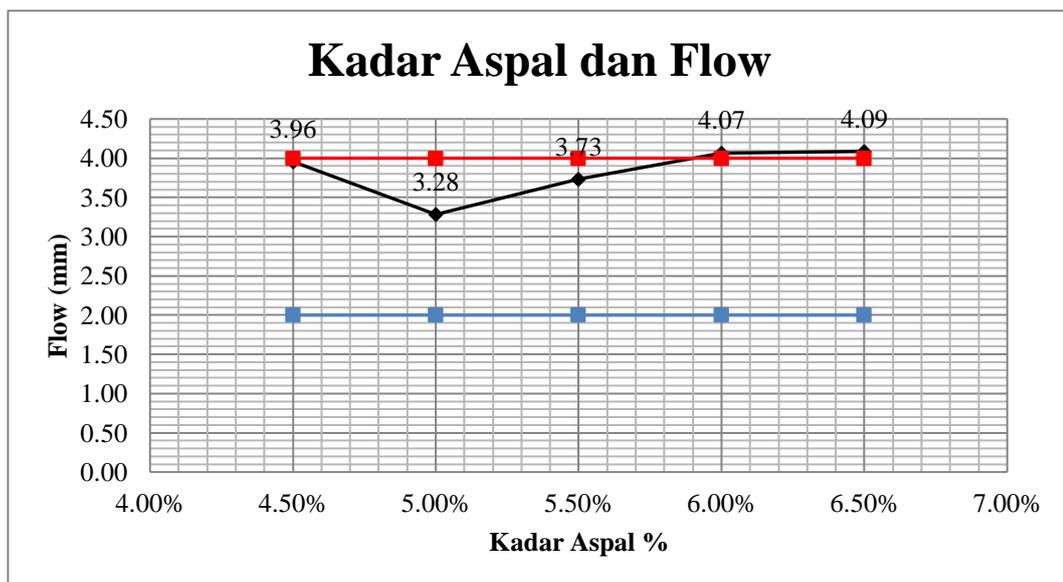
Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran laston nilai flow yang memenuhi persyaratan yaitu 2 mm – 4 mm, sehingga kadar aspal yang memenuhi yaitu pada kadar aspal 5,5 % sampai dengan kadar aspal 6,5 %.

Tabel 4.24 Hasil pengujian Flow (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai Flow (mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	3.96	2	4	Memenuhi
5.00%	3.28	2	4	Memenuhi

5.50%	3.73	2	4	Memenuhi
6.60%	4.07	2	4	Tidak Memenuhi
6.50%	4.09	2	4	Tidak Memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.24 Pengujian Flow agregat halus (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 3,96 mm, kadar aspal 5,0% sebesar 3,28 mm, kadar aspal 5,5% sebesar 3,73 mm, kadar aspal 6,0% sebesar 4,07 mm, dan kadar aspal 6,5% sebesar 4,09 mm. Jadi hasil pengujian flow agregat halus limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 2 mm dan maksimal 4 mm adalah kadar aspal 4,5% sampai dengan 5,5%.



Gambar 4.13 Grafik hubungan kadar aspal dan Flow agregat kasar (limbah beton)

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.13 grafik menunjukkan hubungan flow dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan 6,5 % mengalami kenaikan dan penurunan. Dari grafik nilai flow tertinggi yaitu pada kadar aspal 6,5 % sebesar 4,09 mm dan nilai flow terendah yaitu pada kadar aspal 5 % sebesar 3,28 mm.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran laston nilai flow yang memenuhi persyaratan yaitu 2 mm – 4 mm, sehingga kadar aspal yang memenuhi yaitu pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan kadar aspal 5,5 %.

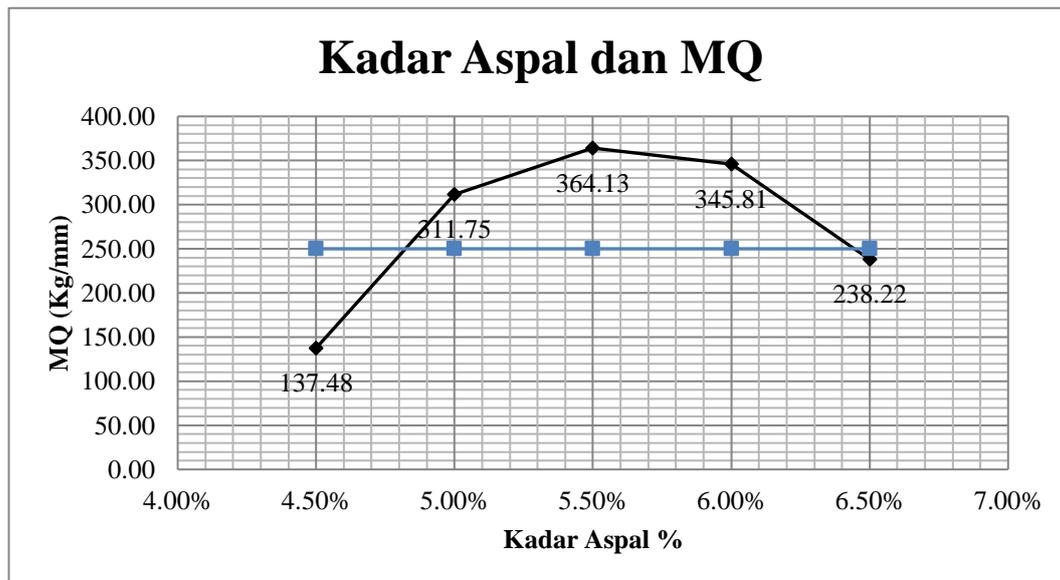
7. *Marshall Quotient* (MQ)

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) yaitu dari hasil bagi antara stabilitas dengan kelelahan (flow) merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan fleksibilitas komposisi campuran. Semakin besar nilai *Marshall Quotient* (QM) bertanda komposisi campuran semakin kaku dan sebaliknya semakin kecil *Marshall Quotient* (QM) maka perkerasannya semakin lentur. Hubungan antara MQ dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 25 Hasil pengujian MQ (agregat kasar limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai MQ (Kg/mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	137.48	250	-	Tidak memenuhi
5.00%	311.75	250		Memenuhi
5.50%	364.13	250		Memenuhi
6.00%	345.81	250		Memenuhi
6.50%	238.22	250		Tidak memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.25 Pengujian MQ agregat kasar (limbah beton) diatas didapat kadar aspal 4,5% sebesar 137,48 kg/mm, kadar aspal 5,0% sebesar 311,75 kg/mm, kadar aspal 5,5% sebesar 364,13 kg/mm, kadar aspal 6,0% sebesar 345,81 kg/mm, dan kadar aspal 6,5% sebesar 238,22 kg/mm. Jadi hasil pengujian MQ agregat kasar limbah beton yang memenuhi spesifikasi minimal 250 kg/mm adalah kadar aspal 5,0% sampai dengan 6,0%.



Gambar 4.14 Grafik hubungan kadar aspal dan MQ agregat kasar (limbah beton)
Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.14 grafik menunjukkan hubungan MQ dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan 6,5 % mengalami kenaikan dan penurunan dari grafik nilai MQ tertinggi yaitu pada kadar aspal 5,5 % sebesar 364,13 mm/kg dan nilai MQ terendah yaitu pada kadar aspal 4,5 % sebesar 137,48 mm/kg.

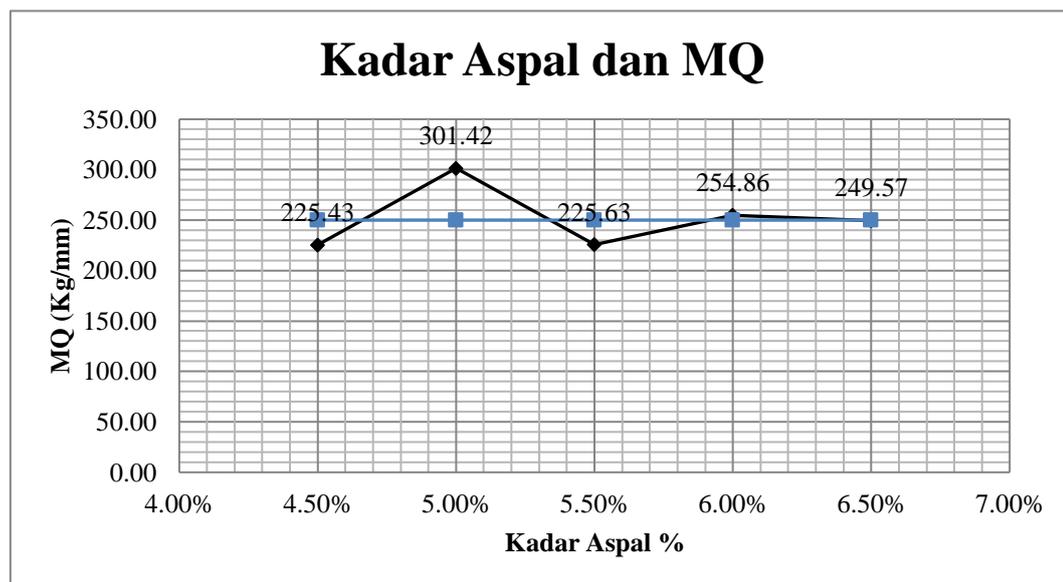
Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran laston nilai MQ yang memenuhi persyaratan yaitu minimal 250 mm/kg, sehingga kadar aspal yang memenuhi yaitu 5 % sampai dengan 6 %.

Tabel 4.26 Hasil pengujian MQ (agregat halus limbah beton) (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Kadar Aspal	Nilai MQ (Kg/mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	225.43	250	-	Tidak memenuhi
5.00%	301.42	250		Memenuhi
5.50%	225.63	250		Tidak memenuhi
6.60%	254.86	250		Memenuhi
6.50%	249.57	250		Tidak memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.26 Pengujian MQ agregat halus (limbah beton) diatas

didapat kadar aspal 4,5% sebesar 225,43 kg/mm, kadar aspal 5,0% sebesar 301,42 kg/mm, kadar aspal 5,5% sebesar 225,63 kg/mm, kadar aspal 6,0% sebesar 254,86 kg/mm, dan kadar aspal 6,5% sebesar 294,57 kg/mm. Jadi hasil pengujian stabilitas yang memenuhi spesifikasi minimal 250 kg/mm adalah kadar aspal 5,0% dan 6,0%.



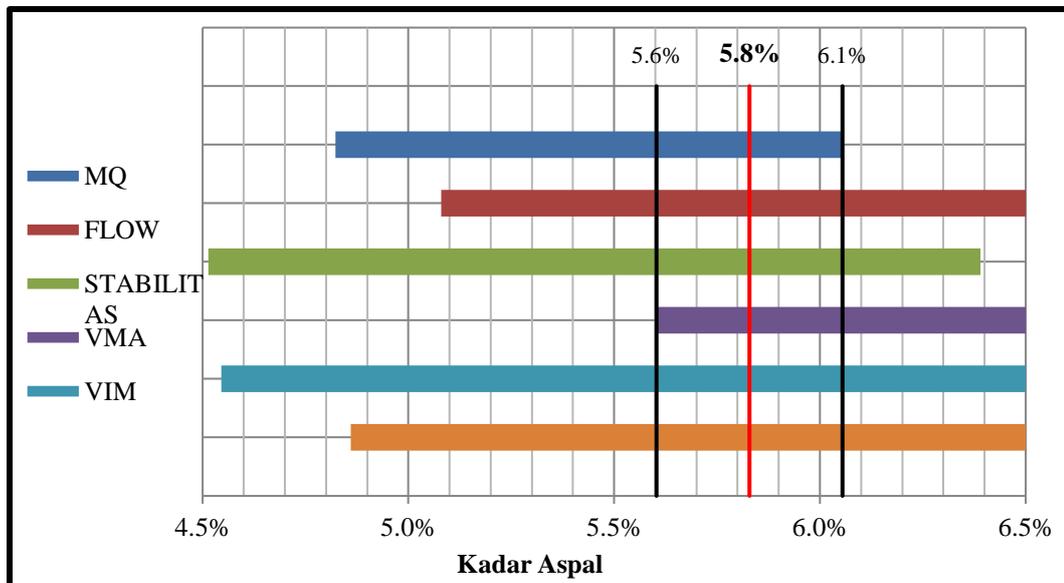
Gambar 4. 15 Grafik hubungan kadar aspal dan MQ agregat halus (limbah beton)
Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.15 grafik menunjukkan hubungan MQ dan kadar aspal, pada kadar aspal 4,5 % sampai dengan 6,5 % mengalami kenaikan dan penurunan dari grafik nilai MQ tertinggi yaitu pada kadar aspal 5 % sebesar 301,42 mm/kg dan nilai MQ terendah yaitu pada kadar aspal 4,5 % sebesar 225,43 mm/kg.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran laston nilai MQ yang memenuhi persyaratan yaitu minimal 250 mm/kg, sehingga kadar aspal yang memenuhi yaitu 5 % dan 6 %.

8. Penentuan KAO Menggunakan Agregat Kasar Limbah Beton

Kadar aspal optimum adalah jumlah aspal yang digunakan dalam campuran agar dapat tercapai mencapai persyaratan Stabilitas, Flow, VMA, VIM, density dan Marshall Quotient. Dalam penentuan kadar aspal optimum untuk menetapkan berapa besarnya kadar aspal efektif dalam campuran yang diperlukan untuk pembuatan benda uji baru dengan komposisi agregat sama namun dengan kadar aspal optimum yang telah ditentukan. Berikut nilai kadar aspal optimum yang diperoleh dari pengujian marshall terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 16 Diagram penentu kadar aspal optimum

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

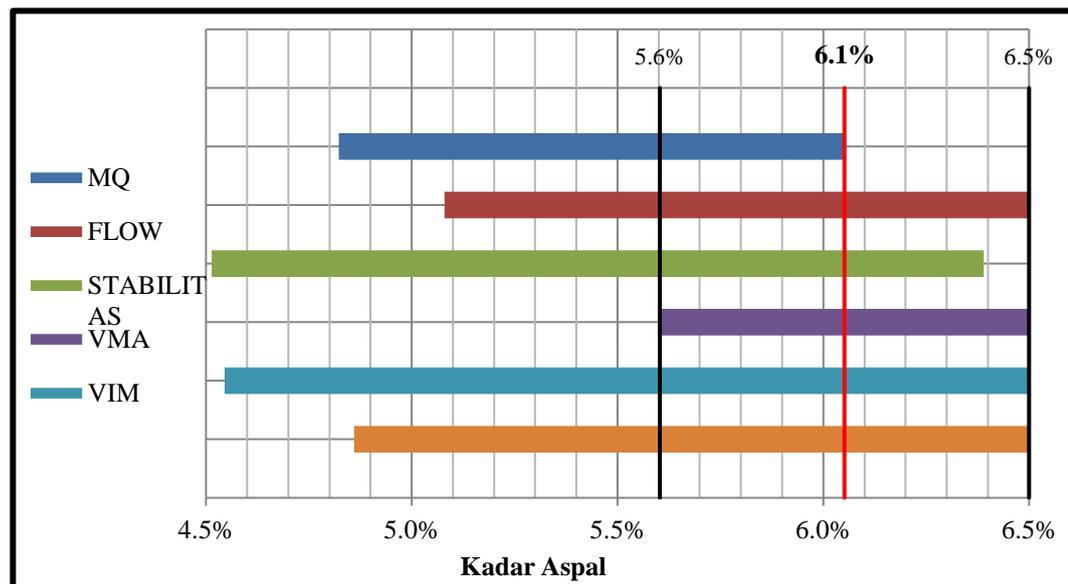
$$\text{Kadar Aspal Optimum} = \frac{\text{KA Min} + \text{KA maks}}{2} = \frac{5,6\% + 6,1\%}{2} = 5,8\%$$

Berdasarkan gambar 4.15 diagram menunjukan nilai stabilitas, VMA, VIM, VFB, Flow, dan Marshall Quotient yang memenuhi spesifikasi untuk semua karakteristik dalam campuran 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, dan 6.5%. Sehingga nilai

Kadar Aspal Optimum (KAO) menggunakan agregat kasar limbah beton yang diperoleh adalah 5,8%.

9. Penentuan KAO Menggunakan Agregat Halus Limbah Beton

Berikut nilai kadar aspal optimum yang diperoleh dari pengujian marshall terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 17 Diagram penentu kadar aspal optimum

Sumber: (Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

$$\text{Kadar Aspal Optimum} = \frac{\text{KA Min} + \text{KA maks}}{2} = \frac{5,6\% + 6,5\%}{2} = 6,1\%$$

Berdasarkan gambar 4.17 diagram menunjukan nilai stabilitas, VMA, VIM, VFB, Flow, dan Marshall Quotient yang memenuhi spesifikasi untuk semua karakteristik dalam campuran 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, dan 6.5%. Sehingga nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) menggunakan agregat kasar limbah beton yang diperoleh adalah 6,1%.

10. Hasil Pengujian Karakteristik Marshall

Berikut hasil pengujian karakteristik marshall menggunakan agregat kasar limbah beton.

Tabel 4. 27 Hasil pengujian sifat-sifat campuran aspal (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No	SIFAT - SIFAT	NILAI	SATUAN	SPESIFIKASI
1	Kadar aspal optimum	5,83	%	-
2	Kepadatan	2,268	g/cm ³	-
3	Rongga dalam agregat (VMA)	14,40	%	Min 14
4	Rongga terisi aspal (VFA)	72,61	%	Min 65
5	Rongga dalam campuran (VIM)	3,95	%	3 - 5
6	Stabilitas	1271,47	Kg	Min 800
7	Marshall Quotient (MQ)	352,02	Kg/mm	Min 250
8	Kelelahan Marshall (Flow)	3,61	mm	Min 3

Berdasarkan Tabel 4.27 Pengujian karakteristik marshall agregat kasar (limbah beton) diatas didapat KAO sebesar 5,83%, kepadatan sebesar 2,268 g/cm³, VMA sebesar 14,40%, VFB sebesar 72,61%, VIM sebesar 3,95%, stabilitas 1271,47 kg, MQ sebesar 352,02 kg/mm, flow sebesar 3,61 mm. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 telah memenuhi sifat-sifat marshall.

Berikut hasil pengujian karakteristik marshall menggunakan agregat Halus limbah beton.

Tabel 4. 28 Hasil pengujian sifat-sifat campuran aspal (Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No	SIFAT - SIFAT	NILAI	SATUAN	SPESIFIKASI
1	Kadar aspal optimum	6,05	%	-
2	Kepadatan	2,269	g/cm ³	-
3	Rongga dalam agregat (VMA)	14,80	%	Min 14
4	Rongga terisi aspal (VFB)	73,58	%	Min 65

5	Rongga dalam campuran (VIM)	3,92	%	3 - 5
6	Stabilitas	1195,56	Kg	Min 800
7	Marshall Quotient (MQ)	343,93	Kg/mm	Min 250
8	Kelelahan Marshall (Flow)	3,49	mm	Min 3

Berdasarkan Tabel 4.28 Pengujian karakteristik marshall agregat Halus (limbah beton) diatas didapat KAO sebesar 6,05%, kepadatan sebesar 2,269 g/cm³, VMA sebesar 14,80%, VFB sebesar 73,58%, VIM sebesar 3,92%, stabilitas 1195,56 kg, MQ sebesar 343,93 kg/mm, flow sebesar 3,49 mm. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 telah memenuhi sifat-sifat marshall.

BAB V

SARAN DAN KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dibahas, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kelayakan Material Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat telah memenuhi standar spesifikasi. Didapatkan nilai abrasi agregat memenuhi spesifikasi maksimal 30% dengan nilai 15,68%. Berat jenis agregat kasar 1-2 dengan nilai 2,62 gr/cc. Agregat kasar 0,5-1 dengan nilai 2,87 gr/cc. Agregat halus dengan nilai 2,60 gr/cc. Dan limbah beton dengan nilai 2,59 gr/cc. Telah memenuhi syarat spesifikasi min 2,5 gr/cc.

2. karakteristik Marshall limbah beton didapat nilai sebagai berikut:

a. Agregat kasar limbah beton

Pengujian karakteristik marshall didapat kepadatan sebesar 2,268 g/cm³, VMA sebesar 14,40%, VFA sebesar 72,61%, VIM sebesar 3,95%, stabilitas 1271,47 kg, MQ sebesar 352,02 kg/mm, flow sebesar 3,61 mm. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 telah memenuhi sifat-sifat marshall.

b. Agregat halus limbah beton

Pengujian karakteristik marshall didapat kepadatan sebesar 2,269 g/cm³, VMA sebesar 14,80%, VFA sebesar 73,58%, VIM sebesar 3,92%,

stabilitas 1195,56 kg, MQ sebesar 343,93 kg/mm, flow sebesar 3,49 mm. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 telah memenuhi sifat-sifat marshall.

B. Saran

1. Masih perlu lebih banyak lagi untuk melakukan penelitian lebih lanjut terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC menggunakan material dengan komposisi campuran yang berbeda.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan lebih memperhatikan limbah beton yang digunakan dengan mutu beton tinggi.
3. Penelitian dapat dikembangkan dengan penambahan bahan adiktif ataupun dengan perlakuan yang berbeda sehingga dapat memperbaiki nilai karakteristik marshall pada campuran AC-WC dengan limbah beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisa Dini Nadhila (2018). *Pemanfaatan limbah marmer sebagai bahan pengganti agregat halus pada perkerasan lapis aspal beton (laston)*. Skripsi tidak dipublikasikan, Yogyakarta. Universitas Islam Indonesia.
- Aspal Beton untuk Jalan Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-1737-1989. Tata Cara Pelaksanaan Lapis Raya.
- Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-1969-1990, Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat agregat kasar.
- Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-2417 19991, Metode Pengujian Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles.
- Badan Standarisasi Nasional, SNI 06-2432-1991, Metode P-engujian Daktilitas Bahan-bahan aspal.
- Bagas Budi Hermawan (2018). *Pengaruh penambahan limbah karet padat ban luar bekas terhadap karakteristik marshall pada campuran aspal beton*. Skripsi tidak dipublikasikan, Yogyakarta. Universitas Teknologi Yogyakarta.
- Bina Marga (1995), Syarat Gradasi Bahan pengisi Campuran Aspal, Jakarta.
- Bina Marga, (1999), Pedoman Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum
- Darmawan, & M. Ivan (2019). *Pemanfaatan penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar dan medium pada campuran laston AC-BC (asphalt concrete-binder course) dengan penambahan zat additive antistripping agent*. Skripsi tidak dipublikasikan, Jakarta. Universitas Mercu Buana.
- Deddy Prasmanto (2020). *Pemanfaatan penggunaan limbah beton dan limbah gypsum sebagai pengganti agregat kasar, medium, dan filler pada campuran laston AC-BC (asphalt concrete-binder course) dengan sistem hot mix pada pengujian marshall*. Skripsi tidak dipublikasikan, Jakarta. Universitas Mercu Buana.
- Direktorat jenderal bina marga, 2010, spesifikasi umum, edisi 2010 (Rev. 3).
- Heri Wahyudiono, dkk (2020). Modifikasi laston AC-WC menggunakan limbah bongkaran beton. *Jurnal Teknika*. 12(1): 33-40.
- HW Wardana, dkk (2020). Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dalam campuran asphalt concrete-wearing course (AC-WC) dengan limbah beton sebagai pengganti agregat. *Rekayasa Teknik Sipil*. 8(2)

- JF Soandrijanie, Amelia B.N (2022). Limbah beton sebagai substitusi material pada laston AC-WC. *Jurnal Rancangan Bangunan Teknik Sipil Universitas Janbadra*, 8(3): 34-37.
- Kurnia Hadi Putra & Jamila Wahdana (2019). studi eksperimental penambahan limbah keramik sebagai agregat halus pada campuran laston (AC-WC) terhadap karakteristik uji marshall. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*. 8(2): 147-155.
- Nanda Anshar, dkk (2023). Karakteristik campuran aspal beton menggunakan coal bottom ash dengan persentase 0%,5%, dan 10% sebagai substitusi agregat halus. *Journal Of The Civil Engineering Student*. 5(1): 85-91.
- Naufal Immanurohman,Sudarno, & M. Amin (2021). Pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar pada perkerasan laston asphalt concrete-wearing coarse (AC-WC). *Reviessw In Civil Engineering*. 4(1): 6-15.
- R.Rachman (2021). Karakteristik campuran laston lapis Aus menggunakan agregat limbah beton. *Paulus Civil Engineering Journal*. 3(3): 459-468.
- Rizki Fajri.A, dkk (2019). Pemanfaatan limbah beton K 250 sebagai substitusi agregat kasar pada campuran laston lapis antara (AC-BC). *Jurnal Online Mahasiswa (JOM)Bidang Teknik Dan Sains*.6: 1-15.
- Rizki, dkk (2017). *Uji Eksperimental Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Lapisan Aspal AC-BC*. Skripsi tidak dipublikasikan, pare-pare. Universitas muhammadiyah.
- U.Saepudin (2018). Studi kompratif mutu lapis aspal beton dengan menggunakan agregat kasar daur ulang limbah beton. *Jurnal Media Teknologi*. 4(2): 147-153.
- Yusnianti, dkk (2023). Studi karakteristik marshall pada campuran lapis aspal beton (laston) dengan bahan tambah limbah kain nilon. *Sultra Civil Engineering Journal*. 4(2): 161-172.