

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Jalan

Jalan adalah fasilitas transportasi darat yang meliputi keseluruhan komponen jalan beserta bangunan pendukung serta peralatannya, yang dimanfaatkan untuk kegiatan lalu lintas, dan dapat dibangun di atas permukaan daratan, di bawah tanah, di atas air, atau langsung pada permukaan air (Anas, 2021).

Dengan mempertimbangkan kondisi jalan saat ini yang sering mengalami kerusakan akibat faktor alam maupun intensitas penggunaan kendaraan, maka diperlukan langkah-langkah perbaikan dan peningkatan untuk memenuhi tuntutan lalu lintas yang terus bertambah guna meningkatkan kualitas fasilitas transportasi darat.

2.2 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan adalah sistem pembangunan yang ditempatkan di atas lapisan tanah dasar (*subgrade*) dengan susunan lapisan khusus, yang dirancang untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar secara merata (Basyaruddin, 2021). Struktur ini tidak hanya berfungsi sebagai penyangga beban kendaraan, tetapi juga berkontribusi dalam menjaga kenyamanan, keselamatan, serta ketahanan jalur transportasi darat terhadap dampak cuaca, faktor lingkungan, dan tekanan berulang dari aktivitas lalu lintas.

Menurut (Nurmaidah, 2022), Perkerasan jalan raya adalah elemen jalan yang diperkuat melalui lapisan konstruksi khusus, yang dibuat dengan tingkat ketebalan, kekuatan, kekakuan, serta kestabilan tertentu agar dapat mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan tanah dasar secara aman.

Perkerasan jalan adalah elemen kunci dalam sistem infrastruktur transportasi darat yang bertugas memastikan kelancaran, kenyamanan, serta keamanan arus lalu lintas. Melalui susunan lapisan konstruksi yang dirancang dengan spesifikasi ketebalan, kekuatan, kekakuan, dan kestabilan tertentu, perkerasan ini berfungsi mendistribusikan beban kendaraan secara efisien ke lapisan tanah dasar.

2.3 Aspal

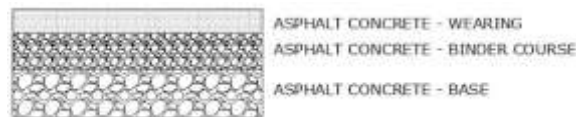
Aspal adalah bahan berwarna hitam yang biasanya kita lihat di permukaan jalan. Bahan ini berfungsi sebagai perekat yang menyatukan kerikil dan pasir, sehingga jalan menjadi kuat, rata, tidak mudah rusak, serta mampu menahan beban kendaraan dan cuaca.

Menurut (Tola, 2022), Aspal yang juga dikenal sebagai bitumen, merupakan bahan berwarna hitam yang berperan sebagai pengikat dalam campuran aspal serta diterapkan pada lapisan permukaan perkerasan fleksibel.

Peran utama aspal adalah sebagai perekat sekaligus pelapis untuk permukaan tanah, yang umumnya dikombinasikan dengan bahan lain seperti bitumen dan mineral. Saat diterapkan, aspal berfungsi menempelkan batuan serta unsur-unsur campuran lainnya agar tetap terpadu di permukaan jalan. Kelebihan terbesar aspal terletak pada karakteristik alamiahnya yang bisa meleleh ketika dipanaskan dan mengeras kembali saat suhu menurun.

2.4 Lapisan Aspal Beton (LASTON)

Beton aspal merupakan komposisi dari aspal dan agregat, di mana aspal bertugas sebagai perekat yang menyatukan partikel agregat, sementara agregat berperan sebagai komponen penguat. Di Indonesia, campuran ini dikenal dengan nama Aspal Beton (*Asphalt Concrete/AC*) atau Laston (Lapisan Aspal Beton), yang dimanfaatkan untuk lapisan permukaan struktural maupun lapisan atas pondasi. Beton aspal sendiri diklasifikasikan menjadi tiga varian, yakni Laston Lapis Aus (AC-WC), Laston Lapis Antara (AC-BC), dan Laston Lapis Pondasi (AC-Base) (Jenderal & Marga, 2020).



Gambar 2. 1 Konstruksi Laston

Sumber: PT. Tinggi jayaabadi Indonesia

2.4.1 *Ashphalt Concrete – Wearing Course (AC – WC)*

Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) atau Laston Lapis Aus adalah lapisan teratas pada perkerasan jalan yang berfungsi sebagai lapisan pelindung sekaligus menahan keausan. AC-WC langsung menanggung beban lalu lintas, melindungi struktur jalan dari kerusakan akibat air dan kondisi cuaca, serta

menyediakan permukaan jalan yang rata, halus, dan aman bagi pengguna. Campuran ini terdiri dari agregat dengan gradasi rapat yang diikat oleh aspal dengan kadar lebih tinggi untuk memastikan kedap air, dan biasanya memiliki ketebalan antara 3 hingga 4 cm. Sebagai lapisan paling atas, AC-WC memiliki peran penting dalam meningkatkan kenyamanan, keselamatan, dan ketahanan perkerasan sehingga umur rencana jalan dapat tercapai dengan baik.

Menurut (Auryn maida, 2024) AC-WC merupakan campuran yang terdiri dari agregat mineral, aspal, dan filler yang diaduk dan dipadatkan untuk membentuk lapisan permukaan jalan. Lapisan ini memiliki karakteristik mekanis yang baik, seperti kemampuan menahan beban lalu lintas, meredam getaran, serta memiliki fleksibilitas yang cukup untuk menyesuaikan diri dengan deformasi.

2.4.2 Asphalt Concrete – Binder Course (AC – BC)

Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) atau Laston Lapis Antara adalah lapisan aspal yang berada di antara lapisan aus (AC-WC) di atas dan lapisan pondasi (AC-Base) di bawahnya. Lapisan ini berfungsi sebagai penghubung antara permukaan jalan dan pondasi aspal, sekaligus membantu mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan bawah. AC-BC terdiri dari campuran agregat dengan gradasi rapat, aspal, dan *filler* yang dipadatkan untuk membentuk lapisan dengan kekuatan struktural yang tinggi. Meskipun permukaannya tidak sehalus AC-WC, lapisan ini sangat penting dalam memberikan dukungan, kestabilan, dan ketahanan terhadap deformasi, sehingga menjaga performa dan umur rencana perkerasan jalan.

Menurut (Muhammad, 2022) Lapisan *Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)* merupakan lapisan perantara yang berperan menahan beban maksimum dari lalu lintas yang diterima oleh lapisan permukaan. Oleh karena itu, campuran yang digunakan harus memiliki stabilitas minimal sebesar 800 kg. Lapisan ini terletak tepat di bawah lapisan aus (*wearing course*) dan menjadi bagian penting dari struktur perkerasan jalan.

2.4.3 Asphalt Concrete – Base (AC – Base)

Asphalt Concrete – Base (AC-Base) atau Laston Lapis Pondasi adalah lapisan pondasi aspal yang terletak di bawah AC-BC (lapis antara) dan AC-WC (lapis aus). Lapisan ini berfungsi utama untuk menyalurkan serta menyebarkan beban lalu lintas dari lapisan atas ke pondasi agregat atau tanah dasar, sehingga kekuatan struktur

perkerasan tetap terjaga. Campuran AC-Base terdiri dari agregat bergradasi rapat, aspal, dan *filler*, namun tidak menuntut kehalusan permukaan seperti AC-WC. Ketebalan AC-Base biasanya lebih besar dibanding lapisan di atasnya karena perannya lebih dominan pada aspek struktural daripada kenyamanan permukaan. Dengan sifat kekuatan dan stabilitas yang tinggi, AC-Base menjadi elemen penting dalam memastikan daya dukung, ketahanan, serta umur rencana konstruksi jalan.

Menurut (Loasari, 2022) AC-Base (*Asphalt Concrete – Base*) merupakan lapisan pondasi aspal paling bawah dengan ketebalan minimal 7,5 cm. Lapisan ini berperan sebagai fondasi perkerasan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal yang telah melalui proses pencampuran dan pemanasan, kemudian dipadatkan untuk membentuk struktur yang kokoh.

2.5 Agregat

Agregat merupakan material granular berupa pasir, kerikil, atau batu pecah yang menjadi komponen utama dalam perkerasan jalan. Perannya sebagai pengisi sekaligus pemberi kekuatan dan stabilitas, sehingga lapisan perkerasan menjadi lebih kokoh, awet, dan efisien.

Menurut (Junaedi et al., 2023) Agregat adalah sekumpulan butiran batu pecah, kerikil, pasir, atau mineral lain yang dapat berasal dari sumber alam maupun hasil pengolahan buatan, yang digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Komposisinya cukup besar, yaitu sekitar 60%–70% dari total berat beton. Selain berfungsi sebagai bahan pengisi, agregat juga memiliki peran penting dalam menentukan karakteristik mortar serta kualitas beton yang dihasilkan.

Tabel 2. 1 Analisis Saringan pada Agregat Kasar, Sedang, Halus, dan Kasar

Ukuran ayakan		Gradasi Agregat (kumulatif lolos saringan) (%)			
milimeter	inch	Kasar	Sedang	Halus	Filler
12,5	1/2"	89,3	100	100	100
9,5	3/8"	33,5	93,5	100	100
4,75	No. 4	3,0	15,9	96,4	100
2,36	No. 8	2,5	4,6	55,7	100
1,18	No. 16	2,5	4,3	35	100
0,6	No. 30	2,4	4,1	26,8	100
0,3	No. 50	2,4	3,9	19,7	100
0,15	N0. 100	2,3	3,5	13,9	100
0,075	N0. 200	2,2	3,1	10,6	98

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018)

2.5.1 Agregat Halus

Agregat halus adalah material berupa pasir alami atau hasil pemecahan batu dengan ukuran butir $\leq 4,75$ mm yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran beton maupun perkerasan jalan untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan.

Menurut (A. Maulana et al., 2020) Agregat halus adalah material berupa pasir alami atau hasil pecahan batu dengan ukuran butir maksimal 4,75 mm, yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran beton atau perkerasan jalan untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan.

Tabel 2. 2 Persyaratan Agregat Halus

Penguji	Metode Pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Uji Kadar Rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-202	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%

Sumber : Speksifikasi umum bina Marga tahun 2018 revisi 2.

2.5.2 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah material berupa kerikil atau batu pecah dengan ukuran butir lebih dari 4,75 mm yang digunakan dalam campuran beton atau perkerasan jalan. Fungsinya untuk meningkatkan kekuatan, kestabilan, dan daya tahan konstruksi.

Menurut (Rizky et al., 2024) Agregat kasar harus memenuhi beberapa persyaratan, seperti memiliki butiran yang keras dan padat, bebas dari kandungan lumpur yang berlebihan, serta terdiri dari butiran dengan ukuran yang beragam agar jumlah rongga yang terbentuk dapat diminimalkan.

Tabel 2. 3 Persyaratan Agregat Kasar

Pengujian			Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan		Natirium Sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12 %
		Magnesium Sulfat		Maks. 18 %
Abrasi dengan mesin Los Angles	Campuran AC modifikasi 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 **)
Parikel 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 %

Sumber : Spesifikasi umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2

2.6 Filler

Filler adalah bahan sangat halus yang mengisi rongga antar agregat, berfungsi meningkatkan kepadatan, ikatan, stabilitas, dan daya tahan campuran.

Menurut (Ahmad & Yunaefi, 2021) *Filler* adalah material mineral berukuran halus yang biasanya dapat melewati saringan No. 200. Bahan pengisi ini berperan untuk mengisi celah-celah di antara butiran agregat kasar, sehingga mengurangi volume rongga, meningkatkan kerapatan, dan memperbaiki stabilitas campuran. Dengan partikel halus yang mengisi pori-pori agregat kasar, ruang udara di dalam campuran menjadi lebih kecil dan massa campuran menjadi lebih padat.

Adapun ketentuan *filler* pada campuran aspal menurut Bina Marga 2018 adalah:

1. Bahan pengisi yang ditambahkan harus kering dan bebas dari gumpalan gumpalan dan bila diuji dengan pengayakan sesuai (SNI ASTM C136:2012, 2012) harus mengandung bahan yang lolos ayakan No.200 (75 micron) tidak kurang dari 75 % terhadap beratnya.

2. Bahan pengisi yang ditambahkan (*filler added*), untuk semen harus dalam rentang 1% sampai dengan 2% terhadap berat total agregat dan untuk bahan pengisi lainnya harus dalam rentang 1% sampai dengan 3% terhadap berat total agregat. Khusus untuk SMA tidak dibatasi kadarnya tetapi tidak boleh menggunakan semen.

2.7 Plastik *Polystyrene*

Material plastik *polystyrene* merupakan salah satu jenis bahan plastik yang memiliki sifat khusus. Struktur plastik *polystyrene* tersusun dari butiran-butiran dengan kerapatan rendah sehingga menghasilkan material yang sangat ringan. Di antara butiran tersebut terdapat ruang-ruang kecil yang terisi oleh udara (Agustian et al., 2017). Plastik *Polystyrene* (PS) adalah bahan polimer dengan monomer stirena, merupakan hidrokarbon cair yang dibuat secara komersial dari minyak bumi (Sulfanita, 2023). Kehadiran udara inilah yang membuat plastik *polystyrene* memiliki kemampuan isolasi yang baik, karena udara termasuk penghantar panas yang buruk. Dengan demikian, plastik *polystyrene* mampu menahan perpindahan panas dan berfungsi sebagai insulator termal yang sangat efektif. Selain ringan dan memiliki daya isolasi panas tinggi.

Secara fisik, plastik *polystyrene* bersifat sangat ringan, kaku, dan tembus cahaya, namun mudah rapuh, sehingga dalam proses produksinya sering ditambahkan senyawa butadien agar lebih tahan lama, meski hal ini menyebabkan material kehilangan sifat jernihnya dan berubah warna. Karena struktur molekulnya yang stabil, senyawa *polystyrene* sulit terurai secara alami di lingkungan sehingga limbahnya cenderung menumpuk dan mencemari lingkungan, inilah yang mendasari pemanfaatannya sebagai bahan tambah pada campuran aspal, sebagai upaya mengurangi dampak pencemaran sekaligus meningkatkan kualitas perkerasan jalan

2.8 Ampas Tahu

Material ampas tahu merupakan limbah organik yang dihasilkan dari proses pembuatan tahu. Selama ini ampas tahu lebih banyak dimanfaatkan sebagai pakan ternak atau bahan pupuk, namun jumlah produksinya yang melimpah sering menimbulkan permasalahan lingkungan bila tidak dikelola dengan baik (Suharyanto, 2020). Oleh karena itu, diperlukan inovasi pemanfaatan limbah ampas tahu di bidang lain, salah satunya dalam konstruksi jalan.

Ampas tahu memiliki tekstur halus dan ringan, mengandung serat organik, protein, dan kadar air yang cukup tinggi. Setelah melalui proses pengeringan dan pengolahan, ampas tahu dapat menghasilkan material dengan sifat kering, ringan, serta berpotensi sebagai *filler* atau bahan pengisi pada campuran aspal (Arief, 2020).

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, komposisi zat gizi ampas tahu terdiri atas bahan kering sekitar 8,69%, protein kasar 18,67%, serat kasar 24,43%, lemak kasar 9,43%, kadar abu 3,42%, dan BETN 41,97%. Namun demikian, ampas tahu memiliki kelemahan berupa kandungan serat kasar dan kadar air yang tinggi, di mana kandungan air yang tinggi ini turut menyebabkan daya simpannya menjadi lebih pendek. Karena sifatnya yang mudah rusak dan berkadar air tinggi tersebut, dalam pemanfaatannya sebagai *filler* pada campuran aspal, ampas tahu perlu melalui proses pengeringan dan penghalusan terlebih dahulu hingga menjadi serbuk yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm), sebagaimana disyaratkan untuk bahan pengisi (*filler*) pada campuran aspal beton.

2.9 *Marshall Test*

Uji *Marshall* dilakukan untuk menentukan nilai stabilitas dan kelelahan (*flow*) pada suatu campuran. Pengujian ini menggunakan alat uji *Marshall* yang dilengkapi dengan *proving ring* berkapasitas 2700 kg untuk mengukur stabilitas, serta *flowmeter* untuk mengukur tingkat kelelahan plastis. Sampel uji dipanaskan hingga mencapai suhu minimal 60°C dengan cara direndam dalam *water bath* selama kurang lebih 45 menit sebelum pengujian dilakukan.

Menurut (Ichsan et al., 2024) Uji *Marshall* digunakan untuk mengevaluasi stabilitas, kelenturan, serta kepadatan campuran aspal AC-WC dengan abu bonggol jagung sebagai substitusi *filler*. Parameter utama yang dianalisis adalah stabilitas dan *Marshall Quotient* (MQ). MQ merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dengan *flow* yang menunjukkan tingkat kekakuan campuran. Semakin tinggi nilai MQ berarti campuran lebih kaku, sedangkan nilai yang rendah menunjukkan campuran lebih fleksibel.

Alat uji *Marshall* memiliki bentuk silinder dengan diameter 10,2 cm dan tinggi 6,35 cm, yang digunakan untuk mengevaluasi kepadatan serta porositas dari campuran yang dihasilkan. Pengujian *Marshall* pada campuran aspal beton bertujuan

untuk mendapatkan data terkait karakteristik campuran sekaligus menghitung parameter-parameter *Marshall*, antara lain:

1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan permukaan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk seperti gelombang, alur, atau *bleeding*. Tingkat stabilitas yang diperlukan sangat dipengaruhi oleh fungsi jalan serta besarnya beban lalu lintas yang melintas.

Stabilitas campuran dipengaruhi oleh gaya gesek internal dan kohesi. Gesekan antar butiran agregat dipengaruhi oleh gradasi, bentuk, serta tekstur permukaannya, sementara kohesi berasal dari daya rekat aspal yang dipengaruhi oleh jenis dan jumlah *filler*. Kedua gaya tersebut bekerja bersama untuk mencegah pergeseran butiran agregat akibat beban lalu lintas.

Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan jarum dial pada tiap benda uji, kemudian dikonversi sesuai kalibrasi alat *Marshall* dan disesuaikan dengan koreksi berdasarkan ketebalan atau volume benda uji.

Berikut rumus yang digunakan untuk mencari nilai stabilitas sebagai berikut :

$$S = p \times q \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

S : Nilai stabilitas (kg)

p : Pembacaan arloji tekan x angka korelasi beban

q : Angka koreksi tebal benda uji.

Tabel 2. 4 Faktor Koreksi Stabilitas

Isi Benda Uji (cm ³)	Tebal Benda Uji (mm)	Angka Koreksi
265-276	33,3	3,57
277-289	34,9	3,33
290-301	36,5	3,03
302-316	38,1	2,78
317-328	39,7	2,50
329-340	41,3	2,27
341-353	42,9	2,08
354-367	44,4	1,92
368-379	46,0	1,79
380-392	47,6	1,67
392-405	49,2	1,56
406-420	50,8	1,47
421-431	52,4	1,39
432-443	54,0	1,32
444-456	55,6	1,25
457-470	57,2	1,19
471-482	58,7	1,14
483-495	60,3	1,09
496-508	61,9	1,04
509-522	63,5	1,00
523-535	65,1	0,96
536-546	66,7	0,93
547-559	68,3	0,89
560-573	69,9	0,86
574-585	71,4	0,83
586-598	73,0	0,81
599-610	74,6	0,78
611-625	76,2	0,76

Sumber : SNI 06-2489-1991

2. Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan (*flow*) adalah kemampuan beton aspal untuk menahan deformasi berulang akibat beban lalu lintas tanpa menimbulkan kerusakan seperti alur atau retak. Sifat ini dicapai dengan menggunakan kadar aspal yang sesuai.

Menurut (M. D. Maulana, 2023) *Flow* (kelelehan) adalah besarnya perubahan bentuk yang terjadi pada campuran aspal sejak beban pertama kali diterapkan hingga titik di mana stabilitas mulai menurun, yang mencerminkan tingkat deformasi lapisan perkerasan saat menahan beban lalu lintas.

3. *Voids in Mineral Aggregate* (VMA)

Voids in Mineral Aggregate (VMA) adalah volume rongga udara di antara butiran agregat dalam campuran aspal yang sudah dipadatkan. Nilai VMA ditentukan berdasarkan berat jenis *bulk* (G_{sb}) agregat dan dinyatakan sebagai persentase terhadap volume *bulk* (V_{bulk}) campuran padat. Perhitungannya dapat dilakukan menggunakan berat total campuran maupun berat total agregat, dan hasilnya dinyatakan dalam persen (%).

a. Terhadap Berat Campuran Total

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

VMA = Volume pori antar agregat didalam campuran (%)

G_{mb} = Berat jenis *Bulk* campuran (gr/cc)

P_s = Kadar agregat (%)

G_{sb} = Berat jenis *Bulk* dari agregat (gr/cc)

b. Terhadap Berat Agregat Total

$$VMA = 100 - \left[\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{(100 + P_b)} \times 100 \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

VMA = Volume pori antar agregat didalam campuran (%)

G_{mb} = Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

G_{sb} = Berat jenis *bulk* agregat, (gr/cc)

P_b = Kadar aspal, persen total campuran, (%)

4. *Void filled White Bitumen* (VFB)

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

$$VFB = 100 - \frac{VMA - VIM}{VMA} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :

VFB = Volume pori antar butir agregat, presentase dari VMA (%)

VMA = Volume pori antar agregat didalam campuran (%)

VIM = Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%)

5. *Void in Mix* (VIM)

Void in Mix (VIM) adalah persentase rongga udara yang ada di antara butiran agregat yang sudah terlapisi aspal, dihitung berdasarkan volume total beton aspal.

$$VIM = 100 - \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

VIM = Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%)

Gmm = Berat jenis *maximum* campuran (gr/cc)

Gmb = Berat jenis aspal (gr/cc)

6. *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) adalah perbandingan antara nilai stabilitas dan kelelahan (*flow*), yang digunakan sebagai indikator tingkat kekakuan serta fleksibilitas campuran.

Sifat *Marshall* tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$MQ = \frac{MS}{MF} \dots \dots \dots (2.6)$$

keterangan:

MQ = *Marshall Quotient*, (kg/mm)

MS = *Marshall Stability*, (kg)

MF = *Flow Marshall*, (mm)

2.10 Job Mix Formula

Perancangan dan pemilihan material beserta penentuan proporsinya dilakukan guna mencapai kekuatan dan ketahanan yang diharapkan dengan biaya yang paling efisien. *Job Mix Formula* atau susunan campuran ditetapkan berdasarkan fraksi agregat kasar $\frac{3}{4}$ ", agregat sedang $\frac{1}{2}$ ", pasir, dan *filler*. Berdasarkan hasil analisis gradasi, diperoleh komposisi agregat yang digunakan untuk pembuatan sampel uji.

2.11 Penentuan KAO

Penentuan kadar aspal optimum dilakukan dengan mempertimbangkan enam parameter *Marshall*, yaitu Stabilitas, Kelelehan, *Voids in Mineral Aggregate* (VMA), *Voids in Mix* (VIM), *Void Filled with Bitumen* (VFB), dan *Marshall Quotient* (MQ) yang diperoleh dari hasil pengujian. Kadar aspal optimum ditentukan sebagai nilai rata-rata antara batas minimum dan maksimum kadar aspal yang memenuhi persyaratan spesifikasi.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran AC-WC umumnya berada pada kisaran 5,5%–7,0% terhadap berat campuran. (Adibroto et al., 2022) memperoleh nilai KAO sebesar 6,2%–6,5%,. Penelitian Pratama et al. (2023) juga menunjukkan bahwa nilai KAO campuran AC-WC berada pada kisaran 6,5%–7,0% dan memenuhi persyaratan parameter *Marshall*.

2.12 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 5 Penelitian Terdahulu

NO	Nama Peneliti	Metode Penelitian	Variabel Penelitian	Hasil Penelitian
1	(Rahma et al., 2023)	Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Peneliti melakukan pengujian karakteristik aspal porus yang dimodifikasi dengan bahan tambahan biji plastik PS. Pengujian dilakukan menggunakan alat uji <i>Marshall</i> untuk mendapatkan nilai stabilitas, <i>flow</i> , dan <i>Marshall Quotient</i> (MQ), serta pengujian lain seperti <i>Cantabro Loss</i> dan pengukuran parameter VIM dan VMA. Pengujian dilakukan secara sistematis dan	Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kadar biji plastik PS yang dicampurkan ke dalam campuran aspal porus, dengan variasi 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% berdasarkan berat total campuran. Sedangkan variabel kriteria atau variabel terikat mencakup karakteristik kinerja aspal porus, seperti stabilitas, <i>flow</i> , <i>Marshall Quotient</i> , VIM, VMA, serta parameter lain seperti <i>Cantabro Loss</i> . Variabel-variabel ini digunakan untuk menilai apakah campuran memenuhi standar	Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran aspal porus dengan penambahan biji plastik PS hingga kadar 4% memenuhi seluruh standar yang ditetapkan oleh AAPA 2004. Pada kadar tersebut, nilai VMA mencapai 34,44%, stabilitas mencapai 862,64 kg, dan MQ sebesar 2.601 kg/mm, yang menunjukkan kekuatan dan kestabilan yang cukup baik. Penambahan bahan plastik PS pada kadar ini juga berkontribusi terhadap peningkatan karakteristik mekanik dan kinerja struktur jalan. Sebaliknya, penambahan bahan plastik di atas 4% tidak secara signifikan meningkatkan kinerja dan malah dapat menurunkan beberapa parameter, sehingga kadar 4%

		berstandar, mengikuti standar <i>Australian Asphalt Pavement Association</i> (AAPA) 2004. Lokasi pengujian berada di laboratorium Fakultas Teknik Universitas Tribhuwana Tunggaladewi di Malang.	dan spesifikasi yang berlaku.	diidentifikasi sebagai kadar optimum. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan biji plastik PS berpotensi meningkatkan kualitas aspal porus dan keberlanjutan lingkungan melalui penggunaan limbah plastik sebagai bahan campuran.
2	(Iroth & Sila, 2023)	Metode yang digunakan adalah pengujian laboratorium terhadap campuran aspal AC-WC (<i>Asphalt Concrete Wearing Course</i>) dengan penambahan limbah plastik <i>polystyrene</i> (PS). Campuran dibuat dalam variasi kadar plastik yaitu 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4%. Setelah pembuatan, dilakukan pengujian karakteristik	Variabel bebas (<i>independen</i>): Kadar limbah plastik <i>polystyrene</i> (PS) dalam campuran, yaitu 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4%. Variabel terikat (<i>dependen</i>): Nilai karakteristik campuran seperti <i>Flow</i> , Stabilitas, <i>Marshall Quotient</i> , serta parameter volumetrik seperti VMA, VIM, dan VFB.	Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik PS mempengaruhi sifat mekanik dan volumetrik dari campuran aspal. Secara spesifik, nilai <i>Flow</i> dari campuran meningkat hingga kadar 4% limbah plastik, dengan nilai optimal sekitar 3,98 mm pada kadar 4%. Nilai Stabilitas juga cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar plastik, dengan nilai tertinggi sekitar 997,33%. Sedangkan <i>Marshall</i>

		mekanik dan volumetrik menggunakan metode <i>Marshall</i> dan pengukuran volumetrik seperti VMA (<i>Voids in Mineral Aggregate</i>), VIM (<i>Voids in Mixture</i>), dan VFB (<i>Voids Filled With Asphalt</i>). Data yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah plastik terhadap sifat-sifat campuran aspal, serta menentukan kadar optimal limbah plastik yang dapat meningkatkan performa campuran aspal.		<i>Quotient</i> mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar plastik, dari nilai optimal sebesar 310,54 kg/mm pada kadar 1%, dan menurun mendekati batas standar saat kadar 4%. Parameter volumetrik seperti VMA meningkat sampai kadar 3% (25,42%) kemudian menurun pada kadar 4% (24,64%). VIM dan VFB mengikuti pola yang sama, meningkat hingga kadar 3%, lalu menurun pada kadar 4%. Dengan demikian, penelitian ini menyarankan bahwa penambahan limbah plastik polistiren bisa memperbaiki sifat mekanik dan volumetrik campuran aspal secara optimal pada kadar tertentu, yaitu sekitar 3%.
3	(Fahira & Riyadsyah, 2023)	Metode Penelitian Metode yang digunakan adalah pengujian laboratorium	Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase limbah Styrofoam yang digunakan	Hasil Penelitian Hasil utama dari penelitian menunjukkan bahwa campuran tanpa <i>Styrofoam</i> (0%)

		Laboratorium Sipil dengan pendekatan pengujian <i>Marshall</i>. Pengujian ini dilakukan pada berbagai variasi tingkat substitusi limbah <i>Styrofoam</i>, yakni 0%, 5%, dan 10%. Campuran dibuat dan dipadatkan melalui metode tumbukan sebanyak 2×75 tumbukan, sesuai standar. Parameter yang diuji meliputi stabilitas, <i>flow</i>, densitas, VIM, VFB, VMA, MQ, dan durabilitas. Data primer diperoleh melalui pengujian langsung di laboratorium, sementara data sekunder berupa dokumen dan standar yang dipakai sebagai acuan.	sebagai substitusi pada campuran aspal, yaitu 0%, 5%, dan 10%. Variabel terikat meliputi parameter <i>Marshall</i> seperti stabilitas, <i>flow</i>, densitas, VIM, VFB, VMA, MQ, serta tingkat durabilitas dari campuran tersebut. Variabel ini diukur untuk mengetahui pengaruh substitusi terhadap performa campuran jalan.	memenuhi syarat durabilitas dan parameter <i>Marshall</i> secara umum cukup baik. Namun, ketika limbah <i>Styrofoam</i> ditambahkan sebesar 5% dan 10%, beberapa parameter seperti durabilitas dan <i>flow</i> tidak memenuhi standar yang ditetapkan, meskipun stabilitas dan parameter lainnya tetap memenuhi syarat. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada variasi 10% substitusi, yaitu 2461 kg, yang menunjukkan peningkatan dibandingkan tanpa limbah <i>Styrofoam</i>. Akan tetapi, penurunan durabilitas pada variasi 5% dan 10% menandakan bahwa penggunaan limbah <i>Styrofoam</i> dalam jumlah tertentu bisa mempengaruhi ketahanan jangka panjang campuran jalan. Secara umum, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah
--	--	--	--	---

				plastik <i>Styrofoam</i> dalam campuran beton aspal memiliki potensi meningkatkan beberapa sifat mekanik, tetapi harus diperhatikan batas substitusi agar tidak mengurangi kualitas dan daya tahan perkerasan jalan secara keseluruhan.
4	(Rahmat Tisnawan, Rizki Ramadhan, M Yazid, 2025)	Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan pendekatan pengujian laboratorium. Khususnya, dilakukan pengujian Marshall untuk menentukan karakteristik fisik dan mekanik dari campuran yang dimodifikasi dengan <i>styrofoam</i> pada berbagai variasi persentase <i>styrofoam</i> (6%, 8%, 10%, dan 12%). Pengujian ini dilakukan untuk mengukur	Variabel independen dalam penelitian ini adalah persentase <i>styrofoam</i> yang ditambahkan ke dalam campuran aspal, yaitu 6%, 8%, 10%, dan 12%. Sedangkan variabel dependen meliputi parameter <i>Marshall flow</i> , <i>Marshall Quotient</i> , VMA, VFA, dan VIM, yang digunakan untuk menilai kualitas dan karakteristik campuran setelah penambahan <i>styrofoam</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan <i>styrofoam</i> sebesar 6% dan 8% mampu menghasilkan campuran yang memenuhi seluruh kriteria karakteristik <i>Marshall</i> berdasarkan standar yang ditetapkan. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada variasi <i>styrofoam</i> 10%, tetapi nilai ini tidak sepenuhnya memenuhi standar karena stabilitasnya di bawah batas minimal. Begitu juga, variasi <i>styrofoam</i> 10% dan 12% secara umum tidak memenuhi standar karakteristik tertentu, seperti stabilitas dan <i>Marshall Quotient</i> .

		parameter-parameter seperti stabilitas, <i>flow</i> , <i>Marshall Quotient</i> , serta parameter volumetrik VMA, VFA, dan VIM, dan kemudian membandingkannya dengan standar yang berlaku, yaitu Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018		Oleh karena itu, peneliti menyimpulkan bahwa penambahan <i>styrofoam</i> pada tingkat 6% dan 8% sangat berpotensi digunakan sebagai bahan modifikasi aspal dengan hasil yang baik dan ramah lingkungan, serta memenuhi standar kinerja yang berlaku
5	(Moh Alkam, Frice, 2023)	Metode yang digunakan adalah pengujian <i>Marshall</i> untuk menentukan sifat mekanik campuran aspal yang dimodifikasi dengan plastik PET. Proses pencampuran dilakukan pada suhu sekitar +170°C dan pemadatan pada suhu +150–160°C. Variasi kadar plastik yang diuji antara 0,3% sampai 1,5% berdasarkan berat campuran.	Variable utama yang diperhatikan adalah kadar plastik PET dalam campuran, yaitu 0,3%; 0,6%; 0,9%; 1,2%; dan 1,5%. Variabel tergantung meliputi parameter <i>Marshall</i> seperti stabilitas, <i>flow</i> , VIM (<i>Void in Mineral</i>), VMA (<i>Void in Mineral Aggregate</i>), VFA (<i>Void Filled with Asphalt</i>), dan densitas campuran. Variabel ini	Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa penambahan plastik PET efektif meningkatkan sifat mekanik campuran aspal. Nilai stabilitas tertinggi dicapai pada kadar 1,2% sebesar 1176,06 kg, yang meningkat 38% dari nilai stabilitas campuran tanpa plastik. Selain itu, penambahan plastik pada kadar tersebut juga meningkatkan nilai VIM dan VMA, menunjukkan peningkatan rongga dalam campuran yang dapat mengurangi

		Parameter yang diukur meliputi stabilitas, <i>flow</i>, VIM, VMA, VFA, serta densitas campuran, untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik terhadap kualitas campuran aspal.	bertujuan untuk menilai kekuatan, fleksibilitas, dan ketahanan campuran terhadap deformasi.	kemungkinan retak dini dan deformasi. Sebaliknya, penambahan plastik menurunkan nilai VFA dan densitas, yang menunjukkan pengurangan kadar aspal dalam campuran dan pengaruh terhadap konsistensi pori-pori dalam struktur. Secara keseluruhan, kadar plastik 1,2% dianggap sebagai kadar terbaik karena memberikan kombinasi kekuatan yang optimal serta memenuhi standar yang berlaku. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik PET dalam campuran aspal dapat memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan jalan, sekaligus menjadi solusi pengelolaan limbah plastik yang ramah lingkungan.
--	--	---	--	--