

BAB 3

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

Mengacu pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006, keberadaan jalan sebagai prasarana transportasi memiliki peran esensial dalam menunjang kelancaran mobilitas kendaraan serta mempermudah pergerakan masyarakat antarwilayah. Struktur perkerasan jalan tersusun dari sejumlah lapisan di atas tanah dasar yang dirancang untuk menopang beban lalu lintas. Oleh karena itu, konstruksi jalan wajib dibangun dengan sistem perkerasan yang andal dan sesuai dengan ketentuan teknis, guna menjamin keselamatan kendaraan yang melintasinya (Gemo, 2019).

Menurut Sukirman (1999), konstruksi perkerasan jalan dilihat dari kemampuannya untuk menahan dan mendistribusikan beban lalu lintas di atasnya, yang harus memenuhi beberapa syarat kekuatan atau struktural sebagai berikut:

- a. Memiliki ketebalan yang memadai untuk menyalurkan beban kendaraan yang melintas ke permukaan tanah dasar.
- b. Kedap air, untuk mencegah kerusakan pada struktur di bawah lapisan permukaan.
- c. Lapisan permukaan harus dapat mengalirkan air dengan efektif, sehingga air pada lapisan tersebut bisa cepat terbuang.
- d. Memiliki kekakuan yang cukup agar dapat menahan beban yang bekerja tanpa menyebabkan deformasi pada lapisan.

3.1.1 Jenis Konstruksi Perkerasan Jalan

Menurut Sukirman (1999), konstruksi perkerasan jalan harus disesuaikan dengan kebutuhan lalu lintas di suatu wilayah. Tujuannya adalah agar lapisan perkerasan jalan dapat menahan beban yang melintas di atasnya. Berikut adalah beberapa jenis konstruksi perkerasan jalan yang dibedakan berdasarkan bahan pengikatnya.

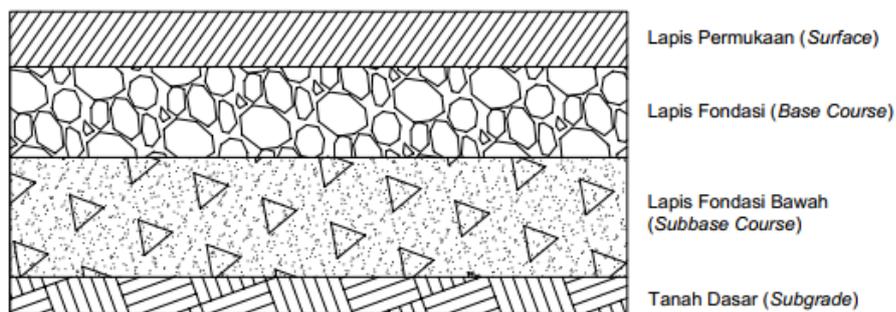
- a. Perkerasan lentur merupakan jenis struktur perkerasan yang memanfaatkan aspal sebagai material pengikat utama dalam pembentukannya.

- b. Perkerasan kaku adalah tipe perkerasan yang mengandalkan *portland cement* sebagai bahan perekat pada pelat beton, baik bertulang maupun tidak bertulang, yang dibangun di atas tanah dasar, dengan atau tanpa tambahan lapisan fondasi bawah.
- c. Perkerasan komposit adalah kombinasi dari perkerasan lentur dan perkerasan kaku, yang bisa tersusun dari perkerasan kaku yang ditempatkan di atas lapisan lentur, ataupun sebaliknya.

Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan komposit.

a. Perkerasan Lentur

Jenis konstruksi perkerasan lentur menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, dengan bahan berbutir pada lapisan bawahnya. Perkerasan ini memiliki kelenturan serta kemampuan untuk mendistribusikan beban lalu lintas secara merata ke tanah dasar. Hal ini memungkinkan kenyamanan bagi kendaraan yang melintas di atasnya (Tasik, 2021). Perkerasan lentur memiliki kelebihan diantaranya yaitu biaya awal dan perbaikan yang terjangkau dan dapat digunakan dengan cepat untuk lalu lintas. Sedangkan kekurangannya yaitu memiliki daya tahan yang relatif kurang untuk menahan beban berat, biaya pemeliharaan (*maintenance*) yang mahal, dan umur konstruksi yang relatif pendek (tidak tahan lama).



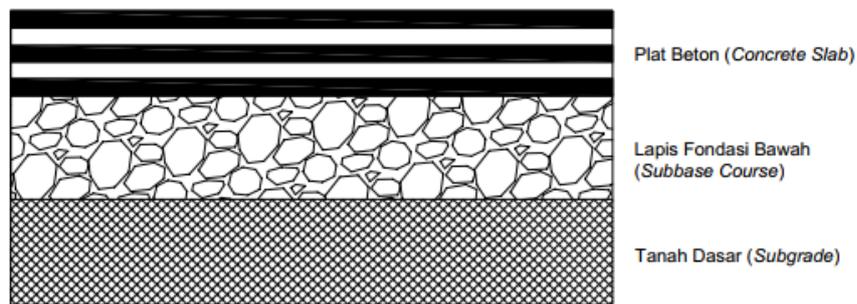
Gambar 3.1 Komponen Perkerasan Lentur

(Sumber: Analisa Penulis, 2025)

b. Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku merupakan jenis struktur jalan yang memanfaatkan semen *portland* (PC) sebagai material pengikat utama. Elemen utama dari sistem ini adalah pelat beton yang berperan dalam menahan beban kendaraan secara langsung. Pelat beton tersebut dapat dipasang dengan atau tanpa tulangan, dan diletakkan di

atas tanah dasar, baik disertai lapis fondasi bawah maupun tidak. Di Indonesia, penggunaan perkerasan jenis ini cukup dominan karena ketahanannya yang lebih tinggi serta masa layan yang lebih panjang jika dibandingkan dengan perkerasan lentur. Saat ini, perkerasan kaku kerap diterapkan pada jalur-jalur strategis seperti jalan nasional dan jalan tol, mengingat tingginya frekuensi lalu lintas kendaraan berat pada ruas-ruas tersebut (Sidabutar et al., 2021). Adapun urutan lapisan pada struktur perkerasan kaku adalah sebagai berikut.

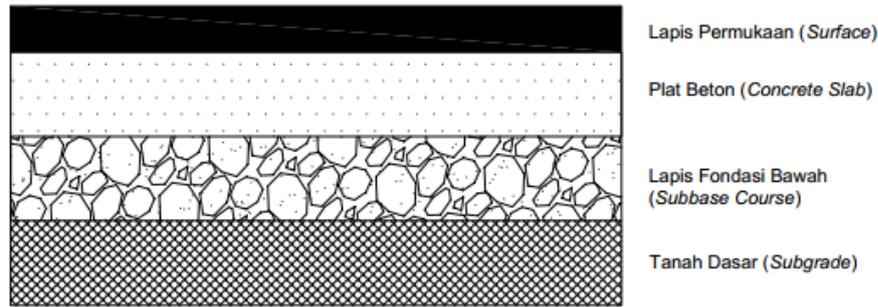


Gambar 3.2 Komponen Perkerasan Kaku

(Sumber: Analisa Penulis, 2025)

c. Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit merupakan bentuk struktur perkerasan yang menggabungkan karakteristik dari perkerasan kaku dan perkerasan lentur dalam satu sistem terpadu. Sinergi antara kedua jenis perkerasan ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas struktur jalan dalam menahan beban lalu lintas secara lebih efisien. Umumnya, konfigurasi perkerasan komposit terdiri atas lapisan perkerasan lentur yang ditempatkan di atas perkerasan kaku, atau sebaliknya, tergantung pada kebutuhan desain dan kondisi lapangan. Menurut (Lourdes et al., 2023) perencanaan ketebalan lapisan pada perkerasan komposit dilakukan melalui pendekatan analisis kombinasi antara perkerasan lentur dan kaku, yang disesuaikan dengan metode perencanaan berdasarkan Pd T-14-2002 dan SNI 1792-1987-F. Pendekatan ini memungkinkan rancangan struktur jalan yang lebih tahan terhadap beban berulang dan perubahan lingkungan, sekaligus mengoptimalkan umur layanan perkerasan.



Gambar 3.3 Komponen Perkerasan Komposit

(Sumber: Analisa Penulis, 2025)

3.1.2 Fungsi Lapis Perkerasan

Untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan struktur, daya tahan, serta efisiensi biaya, konstruksi perkerasan jalan umumnya dirancang dalam bentuk sistem berlapis (Haswar & Puspawati, 2018). Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik dalam mendistribusikan beban lalu lintas dan menjaga kestabilan struktur perkerasan secara keseluruhan. Secara umum, susunan lapisan perkerasan jalan terdiri atas beberapa bagian utama, antara lain:

- a. Lapis Permukaan, terdiri dari lapisan permukaan dasar dan lapis aus.
- b. Lapis Fondasi Atas, merupakan lapis utama yang berperan dalam mendistribusikan beban yang diterima oleh jalan.
- c. Lapis Fondasi Bawah, berfungsi untuk menyebarkan beban, mendukung drainase, dan memberikan permukaan yang stabil selama proses konstruksi.
- d. Tanah Dasar, merupakan merupakan bagian paling bawah dari struktur perkerasan yang berfungsi sebagai penyangga seluruh beban dari lapisan-lapisan di atasnya.

Berikut ini adalah penjelasan lebih detail mengenai fungsi lapis perkerasan.

a. Lapis Permukaan (*Surface Course*)

Lapis permukaan adalah bagian perkerasan yang terletak paling atas. Fungsi lapis permukaan mencakup dua aspek utama, yaitu:

1) Struktural

Lapis permukaan merupakan bagian teratas dari struktur perkerasan yang berperan dalam menerima, mendistribusikan, dan menahan beban kendaraan, baik yang bersifat vertikal maupun horizontal (gaya geser). Oleh

karena itu, lapisan ini dituntut memiliki karakteristik kekuatan struktural, kekokohan terhadap deformasi, serta kestabilan terhadap pengaruh lalu lintas dan lingkungan. Kualitas lapis permukaan sangat menentukan kenyamanan berkendara dan umur layan perkerasan secara keseluruhan.

2) Non-Struktural

Fungsi non-struktural lapis permukaan meliputi:

- a) Memiliki sifat kedap air, sehingga mampu melindungi lapisan-lapisan di bawahnya dari penyerapan air yang dapat merusak struktur perkerasan.
- b) Menyediakan bidang lintasan yang halus dan rata, guna menunjang kelancaran arus lalu lintas serta meningkatkan kenyamanan bagi pengguna jalan.
- c) Memberikan tekstur permukaan yang tidak licin, dengan nilai ketahanan selip (*skid resistance*) yang memadai untuk menjamin keselamatan berkendara, terutama saat kondisi jalan basah.
- d) Berperan sebagai lapisan aus, yaitu bagian perkerasan yang dirancang untuk menerima keausan akibat lalu lintas dan cuaca, serta dapat diganti atau diperbarui tanpa harus membongkar seluruh struktur perkerasan.

Lapis permukaan itu sendiri masih bisa dibagi menjadi dua lapisan lagi, yaitu:

1) Lapis Aus (*Wearing Course*)

Lapis aus adalah lapisan teratas dari struktur perkerasan jalan yang berfungsi sebagai elemen pertama yang menerima beban lalu lintas secara langsung. Lapisan ini memiliki peran krusial dalam menjaga kinerja dan umur panjang jalan, karena bertugas melindungi lapisan di bawahnya dari kerusakan akibat infiltrasi air, paparan sinar ultraviolet, dan tekanan berulang dari roda kendaraan. Selain itu, lapis aus juga berfungsi menyediakan permukaan jalan yang halus, rata, dan nyaman dilalui, serta memberikan tingkat kekesatan yang cukup agar kendaraan tidak mudah tergelincir, terutama saat kondisi jalan basah.

Kualitas lapis aus sangat memengaruhi umur teknis perkerasan jalan secara keseluruhan. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa campuran yang digunakan memenuhi persyaratan teknis, seperti stabilitas tinggi, daya

ikat yang baik, serta ketahanan terhadap penetrasi air. Dengan demikian, lapis aus tidak hanya berfungsi sebagai elemen penutup permukaan, tetapi juga sebagai pelindung utama dari keseluruhan struktur jalan.

2) Lapis Antara (*Binder Course*)

Lapis antara adalah lapisan perkerasan jalan yang terletak di bawah lapis aus dan di atas lapis pondasi. Peran utama dari lapis ini adalah untuk mengikat antara lapisan permukaan dengan lapisan di bawahnya, serta mendistribusikan beban lalu lintas dari lapisan atas ke struktur jalan di bawahnya secara lebih merata. Meskipun lapis antara tidak langsung bersentuhan dengan beban roda seperti lapis aus, namun kekuatan dan kualitasnya tetap sangat penting. Lapisan ini harus cukup kuat untuk menahan tegangan akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu, serta cukup lentur untuk menyesuaikan diri terhadap pergerakan dari lapisan pondasi.

Jika lapis antara gagal berfungsi, maka dapat menyebabkan kerusakan dini pada lapis aus, seperti retak, gelombang, atau bahkan pengelupasan. Material yang digunakan pada lapis antara umumnya berupa campuran aspal dan agregat, namun dengan karakteristik yang berbeda dari lapis aus. Campurannya biasanya lebih tebal, memiliki gradasi agregat yang lebih kasar, dan lebih fokus pada kekuatan struktural daripada kualitas permukaan.

b. Lapis Fondasi Atas (*Base Course*)

Lapis fondasi atas merupakan bagian dari struktur perkerasan yang berada tepat di bawah lapis permukaan dan berfungsi sebagai perantara dalam mendistribusikan beban lalu lintas ke lapis fondasi bawah atau langsung ke tanah dasar apabila tidak terdapat lapisan bawah. Material yang digunakan untuk lapisan ini umumnya terdiri dari batu pecah, kerikil pecah, pasir alami, slag, atau kombinasi dari material tersebut yang telah memenuhi spesifikasi teknis tertentu. Untuk meningkatkan kekuatan, lapisan ini dapat distabilisasi dengan bahan tambahan seperti semen, kapur, atau aspal. Sesuai SNI 1989-F dan AASHTO (1993), mutu material lapis fondasi atas harus lebih tinggi dibanding subbase, terutama dalam hal kekuatan (tegangan), plastisitas, dan gradasi. Nilai CBR > 50% menunjukkan bahwa material harus bebas dari bahan

organik, lempung, dan material lain yang tidak diinginkan. Nilai abrasi maksimum dari agregat kasar adalah 50%, dan indeks plastisitas harus $< 4\%$, yang menandakan deformasi plastis yang rendah dan kestabilan yang baik. Fungsi utama dari lapis fondasi atas dalam struktur perkerasan antara lain:

- 1) Menopang lapis permukaan, sehingga mampu menjaga kestabilan dan kekuatan lapisan di atasnya.
- 2) Meneruskan dan menyebarkan beban lalu lintas, baik beban vertikal maupun horizontal, ke lapisan di bawahnya.
- 3) Berperan sebagai elemen struktural pendukung bagi lapis fondasi bawah atau langsung tanah dasar, tergantung konfigurasi perkerasan yang digunakan.

c. Lapis Fondasi Bawah (*Sub-base Course*)

Lapis fondasi bawah merupakan bagian dari struktur perkerasan yang terletak antara lapis fondasi atas dan tanah dasar. Material penyusunnya berupa agregat granular tanpa bahan pengikat, yang berfungsi sebagai lapisan perkuatan tambahan. Meskipun kualitasnya berada di bawah lapis fondasi atas, subbase tetap harus memiliki mutu yang lebih baik dibanding tanah dasar, terutama dalam hal kekuatan, plastisitas, dan gradasi. Berdasarkan standar, nilai CBR $\geq 20\%$ digunakan sebagai acuan kelayakan material, yang juga harus bebas dari kandungan organik, gumpalan lempung, dan material tidak stabil lainnya. Fungsi utama dari lapis fondasi bawah antara lain:

- 1) Meneruskan dan menyebarkan beban roda ke tanah dasar.
- 2) Berperan sebagai lapisan drainase, guna mengalirkan air dan mengurangi akumulasi kelembapan dalam struktur.
- 3) Mencegah kontaminasi antara tanah dasar dan lapisan fondasi di atasnya.
- 4) Sebagai lapisan awal dalam proses pembangunan struktur perkerasan.

d. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar adalah lapisan tanah asli, hasil galian, atau timbunan yang telah dipadatkan dan berfungsi sebagai dasar seluruh struktur perkerasan. Umumnya, tanah dasar memiliki nilai CBR 2%–6%. Jika nilai CBR $< 2\%$, seperti pada tanah rawa atau gambut, perlu dilakukan perbaikan dengan cara pengupasan, stabilisasi kimia, atau penggunaan material tambahan seperti serusuk dan aspal

khusus. Alternatif modern seperti geosintetik dan kolom pasir juga dapat digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah.

3.2 Aspal

Menurut Sukirman (1992), aspal merupakan bahan dasar berjenis hidrokarbon yang dikenal sebagai bitumen, dan umumnya diperoleh dari hasil destilasi minyak bumi, meskipun kini aspal dari pulau Buton juga banyak digunakan. Aspal berfungsi sebagai material pengikat dalam perkerasan lentur, meskipun hanya digunakan sekitar 4%–10% berdasarkan berat atau 10%–15% berdasarkan volume, namun memiliki harga yang relatif tinggi. Aspal didefinisikan sebagai material berwarna hitam atau coklat tua yang bersifat padat atau semi-padat pada suhu ruang (Suhardi et al., 2016). Ketika dipanaskan, aspal menjadi cair sehingga mampu membungkus agregat atau mengisi pori-pori. Setelah mendingin, aspal mengeras dan mengikat agregat di tempatnya, menunjukkan bahwa aspal bersifat termoplastik (Sukirman, 1992).

Aspal terdiri dari sekitar 80% karbon, 10% hidrogen, 6% belerang, serta sejumlah kecil oksigen, nitrogen, dan logam berat seperti besi, nikel, dan vanadium (Arlia et al., 2018). Dalam bidang konstruksi jalan, aspal memiliki peran penting sebagai material pengikat dan pelapis agregat. Adapun fungsi utama aspal antara lain:

- a. Mengikat agregat agar tetap menyatu dan tidak terlepas akibat beban lalu lintas.
- b. Berfungsi sebagai bahan pelapis dan perekat antar komponen agregat.
- c. Digunakan sebagai lapis resap pengikat (*prime coat*), yaitu lapisan tipis aspal cair yang diaplikasikan di atas fondasi sebelum pelapisan berikutnya.
- d. Sebagai lapis pengikat (*tack coat*), yaitu aspal cair yang dihampar di atas permukaan beraspal lama untuk merekatkan lapisan baru.
- e. Mengisi rongga antara agregat kasar, halus, dan *filler* untuk menciptakan struktur perkerasan yang padat dan stabil.

Beberapa jenis aspal yang umum digunakan dalam konstruksi jalan memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda (Ade I & Nugroho, 2008), di antaranya:

- a. Aspal Beton, merupakan jenis aspal paling umum dalam pembangunan jalan raya. Tersusun dari campuran agregat dan aspal yang membentuk lapisan perkerasan yang kuat dan tahan lama.

- b. Aspal Pracetak, diproduksi secara pabrikan dalam bentuk panel atau elemen prefabrikasi, kemudian dipasang langsung di lapangan. Aspal jenis ini cocok untuk percepatan konstruksi dan perbaikan lokal.
- c. Aspal Emulsi, yaitu aspal yang telah dicampur dengan air dan bahan *emulsifier*, digunakan pada permukaan lalu lintas ringan, terutama untuk pelapisan tipis seperti *fog seal* atau *chip seal*.
- d. Aspal Modifikasi, merupakan aspal yang ditambahkan bahan aditif seperti polimer, serat, atau karet, untuk meningkatkan kinerja, elastisitas, dan ketahanannya terhadap deformasi serta perubahan suhu.

Menurut (Gunarto & Candra, 2019) aspal memiliki berbagai aplikasi dalam bidang konstruksi, terutama dalam proses manufaktur infrastruktur. Beberapa penggunaannya meliputi:

- a. Sebagai material utama dalam konstruksi jalan raya, jalan kota, jalan tol, hingga jalur pejalan kaki, karena mampu memberikan permukaan yang kuat, awet, dan nyaman dilalui.
- b. Sebagai pelapis pada landasan pacu bandara, pelabuhan, dan area parkir, karena ketahanannya terhadap beban berat dan intensitas lalu lintas tinggi.
- c. Dimanfaatkan dalam pembangunan fasilitas olahraga seperti lapangan sepak bola, lintasan atletik, dan arena balap, berkat kemampuannya menciptakan permukaan yang rata, stabil, dan seragam.

3.1.3 Jenis Campuran Beraspal

Dikutip dari Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2020, campuran beraspal dibagi ke dalam beberapa jenis antara lain sebagai berikut:

- a. *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

Stone Matrix Asphalt merupakan campuran bergradasi tidak merata dengan proporsi agregat kasar yang tinggi, sehingga membentuk kontak langsung antar butiran batu yang efektif dalam mendistribusikan beban roda. Struktur ini menjadikan SMA lebih tahan terhadap deformasi plastis, memiliki umur layan lebih panjang, dan cocok digunakan pada jalan dengan lalu lintas berat. Kadar aspal dalam SMA relatif tinggi dan distabilkan dengan bahan tambahan seperti serat selulosa, yang membantu menjaga kestabilan campuran (Sandabunga et

al., 2020). SMA diklasifikasikan berdasarkan ukuran maksimum agregat menjadi tiga jenis:

- 1) SMA Tipis: ukuran agregat maksimum 12,5 mm
- 2) SMA Halus: ukuran agregat maksimum 19 mm
- 3) SMA Kasar: ukuran agregat maksimum 25 mm

b. Lapis Tipis Aspal Beton (*Hot Rolled Sheet*, HRS)

Lataston (*Hot Rolled Sheet/HRS*) adalah lapisan permukaan perkerasan jalan yang terdiri dari lapis aus (HRS-WC) dan lapis antara (HRS-Binder), yang menggunakan agregat bergradasi tidak merata dengan dominasi pasir serta aspal keras. Campuran ini dihampar dan dipadatkan dalam kondisi panas pada suhu tertentu. Lataston dibagi menjadi dua jenis, yaitu HRS-Base sebagai lapisan fondasi dengan proporsi agregat kasar yang lebih tinggi, dan HRS-WC sebagai lapisan aus. Keduanya menggunakan agregat dengan ukuran maksimum 19 mm (Marianto et al., 2020). HRS memiliki beberapa karakteristik, antara lain:

- 1) Merupakan lapisan non-struktural, yang berarti tidak berfungsi untuk menahan beban.
- 2) Berperan sebagai lapisan kedap air dan lapisan aus.
- 3) Ketebalan padat HRS berkisar antara 2,5 cm hingga 3 cm.
- 4) Memiliki karakteristik durabilitas dan fleksibilitas yang baik.
- 5) Menggunakan aspal keras jenis AC 60-70 dan AC 80-100.

c. Lapis Aspal Beton (*Asphalt Concrete*, AC)

Menurut Asphalt Institute (1996), aspal beton adalah campuran agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan aspal keras sebagai bahan pengikat, yang dicampur dan dipadatkan dalam kondisi panas. Campuran ini digunakan untuk berbagai lapisan perkerasan, seperti lapisan aus, lapisan perata, maupun lapisan fondasi. Aspal beton dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan fungsinya, yaitu AC-WC (lapis aus) dengan agregat maksimum 19 mm, AC-BC (lapis antara) dengan agregat maksimum 25,4 mm, dan AC-Base (lapis fondasi) dengan agregat maksimum 37,5 mm (Thanaya et al., 2016).

3.1.4 Karakteristik Campuran Beraspal

Menurut Sukirman (2003), campuran beton aspal ideal harus memenuhi tujuh karakteristik utama, yaitu: stabilitas (*stability*) untuk menahan beban lalu lintas

tanpa deformasi permanen; keawetan (*durability*) agar tahan terhadap pengaruh cuaca dan oksidasi; kelenturan (*flexibility*) untuk mengikuti pergerakan tanah atau beban tanpa retak; ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) dalam menghadapi lendutan berulang; kekesatan permukaan atau ketahanan geser (*skid resistance*) guna mencegah tergelincirnya kendaraan; kedap air (*impermeability*) agar lapisan tidak mudah dimasuki air; serta kemudahan pelaksanaan (*workability*) yang mencakup kemudahan dalam pencampuran, pemadatan, dan penghamparan campuran.

a. Stabilitas (*stability*) merupakan kemampuan perkerasan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen seperti alur, gelombang, atau *bleeding*. Stabilitas sangat dipengaruhi oleh volume dan jenis lalu lintas; jalan yang dilalui kendaraan berat dalam intensitas tinggi memerlukan stabilitas yang lebih tinggi (Akbar & Wesli, 2012). Nilai stabilitas campuran beton aspal dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- 1) Gesekan internal, yaitu gaya tahan dalam campuran yang berasal dari kekasaran permukaan agregat, bentuk dan kontak antar butir, gradasi agregat, tingkat kepadatan, serta ketebalan film aspal yang melapisi agregat. Semua faktor ini berkontribusi pada sejauh mana butir agregat dapat saling mengikat dan menahan deformasi.
- 2) Kohesi, yang merupakan gaya ikat yang dihasilkan oleh daya lekat aspal, sehingga mampu mempertahankan tekanan kontak antar butir agregat dan menjaga kestabilan struktur campuran aspal.

b. Keawetan (*durability*) adalah kemampuan campuran beton aspal untuk bertahan terhadap beban lalu lintas berulang dan gesekan roda, serta terhadap pengaruh lingkungan seperti air, udara, dan perubahan suhu (Pangemanan et al., 2015). Durabilitas ini dipengaruhi oleh ketebalan lapisan aspal yang melapisi agregat, jumlah pori dalam campuran, tingkat kepadatan, dan sifat kedap air dari campuran tersebut (Fahmi et al., 2017).

c. Kelenturan (*flexibility*) merupakan kemampuan lapisan perkerasan untuk beradaptasi terhadap deformasi yang disebabkan oleh beban lalu lintas berulang tanpa menimbulkan retak atau perubahan volume (Rosyad et al., 2020).

Deformasi ini dapat timbul akibat akumulasi beban kendaraan maupun tekanan dari tanah timbunan di atas tanah dasar.

- d. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) adalah kemampuan campuran beton aspal untuk menahan lendutan berulang akibat beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan seperti retak atau alur. Ketahanan ini dapat ditingkatkan melalui penggunaan kadar aspal yang tinggi dalam campuran (Rabihati et al., 2018).
- e. Kekesatan atau tahanan geser (*skid resistance*) adalah kemampuan permukaan beton aspal, terutama saat basah, untuk menghasilkan gaya gesek yang cukup agar kendaraan tidak tergelincir. Kekesatan ini dipengaruhi oleh faktor-faktor yang juga berperan dalam stabilitas campuran, seperti kekasaran dan bentuk butir agregat, luas bidang kontak antar butir, gradasi, kepadatan campuran, serta ketebalan film aspal.
- f. Kedap air (*impermeability*) adalah kemampuan beton aspal untuk mencegah masuknya air atau udara ke dalam lapisan beton aspal. Kehadiran air dan udara dapat mempercepat proses penuaan aspal serta menyebabkan pengelupasan selimut aspal dari permukaan agregat.
- g. Kemudahan pelaksanaan (*workability*) adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan. Kemudahan pelaksanaan sangat menentukan efisiensi pekerjaan, dan beberapa faktor yang memengaruhi kemudahan dalam proses penghamparan dan pemadatan adalah viskositas aspal, kepekaan aspal terhadap perubahan suhu, serta gradasi dan kondisi agregat.

3.1.5 Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)

Direktorat Jenderal Bina Marga saat ini banyak menerapkan penggunaan lapisan aus aspal beton (AC-WC) sebagai bagian dari sistem perkerasan jalan. AC-WC merupakan salah satu varian dari struktur lapis beraspal beton yang terdiri atas tiga tipe utama, yaitu lapis aus (AC-WC), lapis antara (AC-BC), dan lapis pondasi (AC-Base). Ketiga tipe campuran ini merupakan hasil penyempurnaan spesifikasi teknis yang dikembangkan oleh Bina Marga bersama Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan guna meningkatkan kualitas serta kinerja struktur perkerasan aspal secara keseluruhan.

Untuk mengembangkan spesifikasi campuran yang baru, metode yang digunakan mengacu pada prinsip kepadatan mutlak. Di antara ketiga lapisan aspal beton, AC-WC memiliki tekstur paling halus dan gradasi yang rapat, sehingga mengandung sedikit rongga udara. Karakteristik ini menjadikan campuran AC-WC sangat peka terhadap perubahan proporsi material. Karena posisinya berada di permukaan paling atas, lapisan ini langsung terpapar oleh beban kendaraan dan kondisi lingkungan, seperti panas, hujan, dan perubahan suhu. Oleh sebab itu, AC-WC perlu dirancang agar memiliki tingkat kekedapan air dan kekesatan yang tinggi untuk menjamin keselamatan dan daya tahan. Adapun ketebalan minimum untuk masing-masing lapisan ditetapkan: 4 cm untuk AC-WC, 5 cm untuk AC-BC, dan 6 cm untuk AC-Base. Adapun fungsi dari lapisan aspal beton AC-WC adalah sebagai berikut:

a. Sebagai lapisan penahan beban

Lapisan AC-WC memiliki peran krusial dalam struktur perkerasan karena letaknya yang berada di paling atas, sehingga menjadi bagian pertama yang berinteraksi langsung dengan beban lalu lintas. Untuk itu, campuran ini harus dirancang dengan ketahanan deformasi yang tinggi, agar tidak mudah mengalami kerusakan seperti *rutting* dan *bleeding*. Meskipun demikian, nilai stabilitas yang dibutuhkan tidak bersifat seragam, melainkan sangat bergantung pada karakteristik lalu lintas yang melewati ruas jalan tersebut. Pada jalan dengan intensitas kendaraan berat yang tinggi, diperlukan lapisan AC-WC yang mampu menahan beban berulang dalam jangka panjang, sedangkan pada jalan dengan lalu lintas ringan, spesifikasi stabilitas dapat disesuaikan agar tetap efisien secara teknis dan ekonomis.

b. Sebagai lapisan aus

Selain berperan sebagai elemen struktural yang secara langsung menahan beban kendaraan, lapisan AC-WC juga berfungsi sebagai media kontak antara roda dan permukaan jalan. Pada posisi ini, lapisan AC-WC mengalami gesekan terus-menerus akibat lintasan ban, yang dalam jangka panjang dapat menyebabkan keausan baik pada permukaan jalan maupun ban kendaraan itu sendiri. Oleh karena itu, struktur permukaan lapisan ini harus dirancang agar memiliki daya cengkeram (gaya gesek) yang memadai, terutama dalam kondisi

basah, guna mengurangi risiko tergelincir dan menjamin keselamatan pengguna jalan.

c. Melindungi lapisan di bawahnya

Paparan air dan udara dapat mempercepat penuaan serta pengelupasan lapisan aspal. Oleh karena itu, lapisan AC-WC perlu dirancang kedap air untuk melindungi lapisan di bawahnya dari penetrasi air hujan. Tingkat kedekatan ini dapat dinilai dari jumlah pori yang terbentuk dalam campuran setelah proses pemadatan.

d. Menyebarkan beban

Karena posisinya berada di paling atas, lapisan AC-WC menjadi bagian yang pertama kali menerima tekanan langsung dari beban lalu lintas. Beban yang diterima lapisan ini harus disalurkan secara proporsional ke lapisan di bawahnya agar struktur perkerasan tetap stabil dan tidak mudah rusak. Setiap lapisan memiliki peran masing-masing, namun keberhasilan distribusi beban sangat bergantung pada kinerja lapisan permukaan.

3.1.6 Aspal Modifikasi Polimer Elastomer

Aspal modifikasi polimer (*Polymer Modified Asphalt*) merupakan aspal minyak yang telah ditingkatkan kualitasnya melalui penambahan polimer, baik yang bersifat alami maupun sintesis. Modifikasi ini bertujuan untuk memperbaiki performa aspal, seperti meningkatkan ketahanan terhadap beban, mencegah deformasi dan retak, serta memperpanjang masa layanan jalan. Aspal polimer diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu aspal polimer plastomer dan aspal polimer elastomer. Plastomer merupakan jenis polimer yang bersifat plastis, sedangkan elastomer adalah polimer yang bersifat elastis, menyerupai karet yang mampu meregang saat diberi tegangan dan kembali ke bentuk semula setelah tegangan dilepaskan. Jenis-jenis polimer elastomer yang umum digunakan sebagai bahan campuran dalam aspal keras meliputi SBS (*Styrene Butadiene Styrene*), SBR (*Styrene Butadiene Rubber*), dan SIS (*Styrene Isoprene Styrene*), serta karet alam. Semua bahan ini digunakan untuk meningkatkan performa aspal, khususnya dalam hal elastisitas dan daya tahan terhadap beban.

Aspal PG 70 memiliki beberapa kelebihan dibandingkan aspal penetrasi, terutama dalam hal stabilitas, ketahanan terhadap suhu tinggi dan rendah, serta umur layan. Aspal PG 70 memiliki stabilitas yang lebih baik, yang berarti lebih tahan terhadap deformasi permanen seperti alur atau gelombang akibat beban lalu lintas dan suhu tinggi. Aspal PG 70 dirancang untuk berkinerja baik pada berbagai suhu, termasuk suhu tinggi dan rendah, mengurangi risiko retak pada suhu dingin dan deformasi pada suhu panas (Wibisono & Yuantika, 2024). Aspal PG 70 cenderung memiliki kepadatan campuran yang lebih tinggi, yang berarti lebih sedikit rongga udara dalam campuran aspal, sehingga lebih tahan terhadap kerusakan. Kombinasi karakteristik PG 70 yang unggul dapat memperpanjang umur jalan sehingga dapat mengurangi biaya perawatan dan perbaikan (N. G. Pratama & Haratama, 2024).

Penelitian ini memanfaatkan aspal modifikasi polimer PG-70 jenis elastomer sebagai bahan pengikat utama yang diperoleh dari PT. Aspal Polimer Emulsindo. Berikut merupakan spesifikasi dari aspal modifikasi polimer PG-70 menurut Bina Marga Tahun 2024.

Tabel 3.1 Spesifikasi Aspal Pen 60/70 dan Aspal Modifikasi Polimer

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60-70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				PG70	PG76
1.	Penetrasi, 25 °C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70	Dilaporkan	
2.	Temperatur yang menghasilkan geser dinamis ($G^*/\sin\delta$) pada osilasi rad/detik $\geq 1,0$ kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-	70	76
3.	Viskositas kinematis 135 °C (cSt)	SNI 7729:2011	≥ 300	≤ 3000	
4.	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	Dilaporkan	
5.	Daktilitas pada 25 °C (cm)	SNI 2434:2011	≥ 100	-	
6.	Titik nyala (°C)	SNI 2434:2011	≥ 232	≥ 230	
7.	Kelarutan dalam <i>trichloroethylene</i> (%)	SNI 2438:2015	≥ 99	≥ 99	
8.	Berat jenis	SNI 2441:2011	$\geq 1,0$	-	

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60-70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				PG70	PG76
9.	Stabilitas penyimpanan: Perbedaan Titik Lembek (°C)	ASTM D7173-20 dan SNI 2434:2011	-	≤ 2,2	
10.	Kadar parafin lilin (%)	SNI 03-3639-2002	≤ 2	-	
Pengujian Residu Hasil TFOT (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)					
11.	Penurunan berat (%)	SNI 06-2440-1991	≤ 0,8	-	
	Perubahan berat (naik/turun) (%)	SNI 03-6835-2002	-	≤ 1,0	
12.	Temperatur yang menghasilkan geser dinamis ($G^*/\sin\delta$) pada osilasi rad/detik $\geq 2,2$ kPa, (°C)	SNI 06-6443-2000	-	70	76
13.	Penetrasi pada 25 °C (% semula)	SNI 2456:2011	≥ 54	-	
14.	Daktilitas pada 25 °C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 50	-	
Pengujian Residu PAV (SNI ASTM D6521:2012) Pada Temperatur 100 °C PG 70 atau 110 °C untuk PG 76 dengan Tekanan 2,1 MPa					
15	Temperatur yang menghasilkan geser dinamis ($G^*\sin\delta$) maksimum 6000 kPa dan sudut fasa (δ) minimum 42° pada osilasi 10 rad/detik; (°C)	SNI 06-6442-2000	-	31	34

(Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga, 2024)

3.2 Agregat

Menurut Bina Marga (1987), agregat merupakan campuran material seperti batu pecah, pasir, kerikil, dan mineral lain yang dapat berasal dari alam atau buatan. Agregat dibedakan menjadi kasar ($\geq 2,36$ mm) dan halus ($< 2,36$ mm). Dalam campuran aspal, agregat menyusun sebagian besar komposisi, yaitu sekitar 90–95% dari berat dan 75–85% dari volume total campuran (Sukirman, 2003), sehingga sangat memengaruhi kinerja perkerasan (Sukirman, 2003).

Berdasarkan ukurannya, agregat dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

a. Agregat Halus

Agregat halus dapat berasal dari pasir alam, hasil pelapukan alami batuan, maupun pasir buatan dari proses pemecahan batu (*stone crusher*). Rentang ukuran butirnya berkisar antara 0,063 mm hingga 4,76 mm, mencakup pasir halus hingga kasar. Pada beton khusus, seperti beton penahan radiasi, digunakan agregat halus khusus seperti serbuk baja atau besi pecah. Adapun ketentuan teknis untuk agregat halus diatur dalam Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI):

- 1) Agregat halus harus terdiri atas butiran dengan distribusi ukuran yang bervariasi (*well-graded*).
- 2) Kandungan lumpur tidak boleh melebihi 5% dari berat kering agregat. Jika melebihi, agregat harus dicuci terlebih dahulu agar tidak menurunkan mutu beton.
- 3) Zat organik (bahan hidup) dalam agregat harus minimal dan dibuktikan melalui uji warna dengan larutan NaOH 3% sesuai metode Abrams-Harder.
- 4) Butiran agregat harus memiliki sifat tajam, keras, dan tahan terhadap pengaruh cuaca, serta tidak mudah hancur akibat perubahan suhu atau kelembaban.
- 5) Angka kehalusan (*Fineness Modulus*) untuk pasir kasar (*Coarse Sand*) berada dalam rentang 3,2 – 4,5.
- 6) Angka kehalusan untuk pasir halus (*Fine Sand*) berada pada kisaran 2,2 – 3,2.
- 7) Agregat halus yang tidak lolos uji persyaratan masih dapat dipakai apabila kekuatan tekan beton pada umur 7 dan 28 hari mencapai minimal 95% dari beton normal, dengan catatan agregat dicuci terlebih dahulu menggunakan larutan NaOH 3% lalu dibilas dengan air bersih.

b. Agregat Kasar

Agregat kasar, atau kerikil, merupakan material hasil pelapukan alami batuan maupun hasil pemecahan batu (*stone crusher*), dengan ukuran butiran berkisar antara 4,76 mm hingga 150 mm. Dalam penggunaannya sebagai komponen

beton, agregat kasar harus memenuhi sejumlah persyaratan teknis sebagai berikut:

- 1) Kandungan bagian lemah, berdasarkan uji gores batang tembaga maksimal 5%.
- 2) Angka kehalusan berada pada rentang 6,0 – 7,5.
- 3) Dapat berupa kerikil alami atau batu pecah, asalkan sesuai standar.
- 4) Tidak mengandung zat berbahaya, seperti senyawa alkali yang dapat merusak beton.
- 5) Harus lulus uji kekerasan dengan bejana Rudeloff di bawah beban 20 ton.
- 6) Kandungan lumpur maksimal 1% dari berat kering agregat; jika melebihi, wajib dicuci.
- 7) Butiran harus keras, tidak berpori, dan jumlah butir pipih tidak melebihi 20% dari total berat.

3.3 Filler

Dalam teknologi campuran perkerasan lentur, *filler* didefinisikan sebagai fraksi agregat mineral yang lolos ayakan saringan No.200 (0,075 mm). *Filler* berperan penting dalam meningkatkan kepadatan volumetrik campuran dengan mengisi rongga antarpartikel agregat, sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan stabilitas struktural campuran aspal (Sukirman, 2010). *Filler* berfungsi memperbaiki ikatan antara agregat dengan aspal, serta meningkatkan kohesi internal campuran. Santosa (2001) menambahkan bahwa *filler* yang digunakan harus memiliki berat jenis dalam rentang 0,5–0,9 gram/cm³ dan berasal dari mineral halus yang bersifat stabil terhadap reaksi kimia dalam campuran. Sifat fisik dan kimia *filler* sangat memengaruhi performa campuran, seperti stabilitas, *flow*, dan rongga dalam agregat (VMA). Oleh karena itu, pemilihan *filler* harus memperhatikan karakteristik material, kompatibilitas dengan aspal, dan kemampuan mengisi rongga udara antar agregat dengan optimal.

Filler merupakan material berukuran sangat halus yang berfungsi sebagai pengisi ruang kosong di antara butiran agregat dalam campuran beton aspal. Keberadaan *filler* berperan dalam meningkatkan kerapatan struktur campuran, mengurangi rongga udara, serta memperbaiki sifat mekanis seperti stabilitas dan daya tahan

terhadap deformasi. Secara gradasi, *filler* yang digunakan dalam campuran harus sepenuhnya lolos saringan No.100 dan sedikitnya 75% lolos saringan No.200. Material *filler* dapat diperoleh dari proses alami maupun hasil samping industri, seperti abu batu, semen *portland*, kapur padam, abu terbang (*fly ash*), debu dolomit, serta residu tanur tinggi. Syarat utama bahan pengisi ini adalah memiliki sifat non-plastis dan tidak bereaksi negatif dengan aspal (Hamzah dkk., 2016).

Penambahan *filler* dalam campuran aspal berfungsi untuk meningkatkan viskositas bitumen serta mengurangi sensitivitas campuran terhadap fluktuasi temperatur. Salah satu keuntungan utama dari keberadaan *filler* adalah kemampuannya untuk terdispersi dalam matriks aspal, yang secara tidak langsung meningkatkan volume efektif bitumen. Selain itu, *filler* mampu mengisi rongga antar butiran agregat, sehingga menghasilkan campuran dengan tingkat kepadatan lebih tinggi dan permeabilitas lebih rendah (Hamzah dkk., 2016).

Secara proporsional, komposisi *filler* dalam campuran aspal dibatasi antara 4% hingga 9% dari berat total campuran aspal beton. Jika kadarnya melebihi batas optimum, campuran cenderung menjadi getas dan rawan mengalami retak akibat beban lalu lintas berulang. Sebaliknya, kadar *filler* yang terlalu rendah menyebabkan kelebihan aspal bebas, yang dapat menurunkan kekakuan dan membuat campuran mudah mengalami deformasi plastis, terutama saat suhu tinggi (Pratama et al., 2017). Menurut Sheheard P.B., ada beberapa karakteristik yang harus dimiliki oleh material *filler*, yaitu:

- a. Tidak bersifat reaktif terhadap aspal atau tidak menurunkan kualitas aspal saat dicampur.
- b. Tidak larut dalam air, sehingga tidak mudah tercuci oleh air hujan dan menjaga stabilitas campuran.
- c. Tidak higroskopis, artinya tidak menyerap kelembapan dari udara yang dapat mempengaruhi performa aspal.
- d. Memiliki warna gelap, guna mengurangi penyerapan panas berlebih dari sinar matahari yang dapat mempercepat oksidasi aspal.
- e. Memiliki stabilitas fisik, yaitu tidak mudah hancur saat proses pencampuran panas maupun selama masa layanan perkerasan.

3.4 Polyvinyl Chloride (PVC)

Polivinil klorida (PVC) merupakan salah satu jenis polimer termoplastik yang secara global menempati urutan ketiga dalam hal volume penggunaan, setelah polietilena dan polipropilena. Proses pembentukan PVC dilakukan melalui reaksi polimerisasi monomer vinil klorida ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$). Dengan komposisi sekitar 57% massa unsur klor, PVC memiliki karakteristik unik seperti ketahanan terhadap degradasi kimia, kemudahan dalam proses manufaktur, serta fleksibilitas tinggi dalam aplikasi. Di tingkat global, lebih dari 50% produksi PVC dimanfaatkan pada industri kelistrikan, khususnya sebagai pelapis kabel. Selain itu, PVC banyak digunakan dalam sektor konstruksi karena harganya yang ekonomis, ketahanan terhadap korosi, serta kemudahan dalam pemasangan. Aplikasi PVC mencakup berbagai produk, antara lain sistem perpipaan, bahan pelapis atap, perangkat medis, hingga material tekstil dan pakaian (Linggo & Kurniawan, 2015).

PVC merupakan salah satu jenis polimer termoplastik yang bersifat stabil dan tidak mudah terurai secara alami, sehingga sering menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Limbah PVC dapat diperoleh dari berbagai produk pasca konsumsi seperti pipa bekas, talang air, pelindung kabel, komponen kelistrikan (steker, soket), botol plastik, dan peralatan rumah tangga berbahan dasar plastik (Pratama et al., 2017).

Dalam aplikasinya pada teknologi perkerasan jalan, limbah PVC memiliki potensi sebagai bahan *additive* (tambahan) dalam campuran aspal, baik sebagai modifikasi langsung terhadap aspal (*binder modifier*) maupun sebagai *filler* dalam campuran beton aspal. Suroso (2004) menyatakan bahwa pemanfaatan plastik, khususnya jenis polimer sintetis seperti PVC, dapat berkontribusi dalam peningkatan performa campuran beraspal, terutama dalam hal ketahanan terhadap deformasi permanen, stabilitas struktural, serta daya tahan terhadap pengaruh suhu ekstrem.

Sifat termoplastik PVC memungkinkan material ini melebur pada suhu pencampuran aspal ($\pm 150\text{--}160\text{ }^\circ\text{C}$), lalu menyatu dengan binder, membentuk ikatan yang lebih elastis dan kuat terhadap beban lalu lintas berulang. Selain itu, pemanfaatan limbah PVC dalam campuran aspal juga mendukung pendekatan

pembangunan berkelanjutan (*green pavement*) melalui reduksi limbah padat plastik di lingkungan (Rasul & Sari, 2022).



Gambar 3.4 Serbuk PVC

(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2025)

3.5 Marshall Test

Marshall Test atau Pengujian *Marshall* adalah metode yang digunakan untuk mengukur karakteristik fisik dan mekanik campuran aspal, serta untuk menentukan kekuatan dari campuran tersebut. Tujuan utama dari uji ini adalah untuk mengevaluasi dua parameter utama, yaitu stabilitas dan kelelahan (*flow*), yang menunjukkan sejauh mana campuran aspal dapat menahan beban dan seberapa besar deformasi yang terjadi ketika diberi tekanan. Selain itu, uji *Marshall* juga digunakan untuk mengukur kepadatan dan jumlah pori yang terbentuk dalam campuran aspal, yang mempengaruhi durabilitas dan performa jalan tersebut, terutama dalam hal ketahanan terhadap keausan, deformasi, dan permeabilitas air.

Hasil pengujian *Marshall* digunakan untuk membuat grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dengan beberapa parameter kunci campuran aspal. Beberapa parameter yang dianalisis dalam uji *Marshall* adalah:

a. Stabilitas

Untuk menilai karakteristik campuran yang memenuhi spesifikasi teknis, dilakukan evaluasi terhadap hasil pengujian *Marshall*, salah satunya melalui parameter stabilitas. Stabilitas didefinisikan sebagai kemampuan campuran aspal dalam menahan beban sampai terjadi deformasi maksimum. Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan jarum dial pada alat uji *Marshall*, yang umumnya menunjukkan satuan *pound-force* (Lbf). Data tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan kilogram (kg) agar sesuai dengan standar analisis.

Selain itu, koreksi juga dilakukan terhadap dimensi benda uji, seperti ketebalan atau volume, guna mendapatkan nilai stabilitas yang representatif terhadap kondisi lapangan.

$$S = P \times \text{Angka Korelasi} \times r \quad (3.1)$$

Dimana:

S = Stabilitas (kg)

P = Kalibrasi *proving ring*

r = Nilai pembacaan arloji stabilitas

b. Kelelahan (*Flow*)

Nilai kelelahan (*flow*) yang diperoleh dari pengujian *Marshall* menunjukkan deformasi maksimum yang terjadi pada saat stabilitas optimum tercapai, menandakan batas kekuatan campuran sebelum mengalami kerusakan. Seperti halnya stabilitas, nilai *flow* diperoleh dari pembacaan jarum dial pada alat uji. Namun, pada umumnya, alat dial *flow* sudah terkalibrasi dalam satuan milimeter (mm), sehingga tidak diperlukan konversi satuan tambahan.

c. Rongga diantara Mineral Agregat (VMA - *Void In The Mineral Agregat*)

Rongga diantara Mineral Agregat (VMA) merupakan parameter volumetrik yang menggambarkan volume rongga antar butiran agregat dalam campuran aspal, termasuk rongga udara (*air voids*) dan volume aspal efektif (aspal yang berada di luar agregat, tidak termasuk yang diserap oleh pori-pori agregat). VMA menjadi indikator penting dalam menilai seberapa efisien susunan agregat dalam campuran beraspal dapat menampung aspal untuk mencapai keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap deformasi. VMA dihitung dalam satuan persen terhadap volume total campuran setelah pemadatan dan berdasarkan berat jenis *bulk* agregat (*Gsb*). Perhitungan VMA terhadap campuran dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (3.2)$$

Dimana:

VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%)

Gmb = Berat jenis campuran setelah pemadatan (g/ml)

Gsb = Berat jenis *bulk* agregat (g/ml)

Ps = Kadar agregat (%)

d. Rongga dalam Campuran (VIM - *Void in The Compacted Mixture*)

Rongga dalam campuran (VIM) digunakan untuk mengukur persentase rongga yang ada dalam campuran. Kandungan rongga udara dalam campuran aspal ditentukan oleh konfigurasi gradasi agregat serta bentuk dan tekstur permukaan butiran agregat. Ketidakteraturan bentuk agregat dan distribusi ukuran partikel yang kurang seragam dapat menghasilkan rongga udara yang lebih tinggi. Rongga udara ini menjadi parameter penting dalam mengevaluasi durabilitas campuran beraspal, karena berfungsi sebagai ruang untuk ekspansi termal dan aliran air. Volume rongga udara dalam campuran dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$VIM = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (3.3)$$

Dimana:

VIM = Rongga udara dalam campuran setelah pemadatan (%)

Gmm = Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (g/ml)

Gmb = Berat jenis campuran setelah pemadatan (g/ml)

e. Rongga Terisi Aspal (VFA - *Void Filled with Asphalt*)

Rongga terisi aspal (VFA) adalah persentase rongga yang terdapat di antara partikel agregat VMA (*Void in Mineral Aggregate*) yang terisi oleh aspal, namun tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. VFA yang tinggi menunjukkan campuran yang lebih padat dan lebih stabil.

$$VFA = 100 \times \frac{(VMA - VIM)}{VMA} \quad (3.4)$$

Dimana:

VFA = Rongga udara yang terisi aspal (%)

VMA = Rongga udara antar agregat (%)

VIM = Rongga udara dalam campuran setelah pemadatan (%)

f. *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kekakuan relatif campuran aspal berdasarkan hasil uji *Marshall*. MQ dihitung sebagai rasio antara stabilitas *Marshall* (dalam satuan kg) terhadap

nilai *flow* atau keelehan (dalam satuan mm). Parameter ini mencerminkan ketahanan campuran terhadap deformasi plastis permanen ketika menerima beban lalu lintas berulang.

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (3.5)$$

Dimana:

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

S = Stabilitas *marshall* (kg)

F = *Flow/Kelelehan* (mm)