

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Aspal

Salah satu bangunan sipil yang banyak memanfaatkan aspal sebagai material utama adalah jalan. Jalan memiliki peranan penting sebagai prasarana transportasi darat karena berfungsi menghubungkan berbagai wilayah, pusat kegiatan, dan simpul transportasi, sehingga dapat mendukung mobilitas masyarakat serta distribusi barang dan jasa. Dalam sistem transportasi, jaringan jalan juga berperan dalam memperlancar arus lalu lintas dan meningkatkan efisiensi perjalanan. Hal ini sejalan dengan ketentuan Undang-Undang tentang Jalan yang menyatakan bahwa jalan merupakan bagian dari prasarana transportasi serta memiliki peran penting dalam bidang ekonomi, sosial, budaya, dan kehidupan masyarakat (Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan, 2004).

Perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama dikenal sebagai perkerasan lentur atau *flexible pavement*. Perkerasan lentur merupakan struktur berlapis yang tersusun atas lapis aus (*wearing layer*), lapis pengikat (*binder layer*), lapis pondasi atas (*base course*), lapis pondasi bawah (*subbase course*), dan tanah dasar (*subgrade*), yang bekerja bersama untuk menerima serta menyebarkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya (Mohamed & Al-Sherrawi, 2024). Karena sifatnya yang lebih fleksibel dibandingkan perkerasan kaku, perkerasan lentur mampu menahan lendutan akibat beban kendaraan dan memberikan kenyamanan yang lebih baik bagi pengguna jalan (Marlina et al., 2023).

Aspal merupakan material hidrokarbon berwarna coklat tua hingga hitam yang memiliki kekentalan tinggi dan berperan sebagai bahan pengikat dalam campuran perkerasan. Dalam konstruksi jalan, aspal berfungsi sebagai perekat yang kedap air, termoplastis, dan viskoelastis, sehingga banyak digunakan pada perkerasan jalan, area parkir, landasan pacu, serta infrastruktur transportasi lainnya (Britannica Editors, 2026). Sifat termoplastis aspal ditunjukkan dari kemampuannya melunak ketika dipanaskan dan kembali mengeras saat suhu menurun. Aspal memiliki kepekaan terhadap suhu, di mana sifat viskoelastisnya berubah sesuai dengan perubahan suhu. Dalam kondisi panas, aspal

cenderung menjadi lebih lunak dan mudah mengalami deformasi, sedangkan pada suhu rendah, kekerasannya meningkat. Sifat ini penting dalam perencanaan dan penerapan campuran aspal di berbagai kondisi iklim dan beban lalu lintas di lapangan (Bi et al., 2025)

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70 karena merupakan jenis aspal keras yang umum digunakan pada campuran beraspal panas sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Aspal Pen 60/70 dipilih karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk kondisi iklim dan lalu lintas di Indonesia serta banyak digunakan pada lapisan AC-WC.

Aspal memiliki beberapa sifat penting yang harus diperhatikan. Berikut adalah sifat-sifat utama aspal menurut tersebut:

1. Daya tahan (Stabilitas)

Stabilitas adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen. Nilai stabilitas menunjukkan kekuatan campuran dalam menahan tekanan sebelum terjadi kerusakan. Pengujian stabilitas umumnya dilakukan dengan metode Marshall sesuai standar yang digunakan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025)

2. Kekentalan (*Viscosity*)

Viskositas adalah ukuran kekentalan aspal yang menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalir pada temperatur tertentu. Parameter ini penting dalam proses pencampuran dan pemadatan karena mempengaruhi *workability* campuran beraspal. Pengujian viskositas mengacu pada metode standar seperti SNI 06-6721:2002 (Badan Standarnisasi Nasional, 2002).

3. Penetrasi

Penetrasi adalah ukuran kekerasan atau konsistensi aspal yang dinyatakan dari dalamnya jarum standar yang menembus aspal pada kondisi tertentu. Semakin besar nilai penetrasi, maka aspal semakin lunak. Pengujian ini mengacu pada SNI 2456:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011c)

#### 4. Titik lembek (Softening Point)

Titik lembek adalah suhu di mana aspal mulai melunak hingga mencapai kondisi tertentu. Parameter ini menunjukkan ketahanan aspal terhadap temperatur tinggi. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 2434:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011b).

#### 5. Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan aspal untuk meregang sebelum putus, yang menunjukkan sifat elastisitas aspal. Nilai daktilitas yang tinggi menunjukkan aspal lebih tahan terhadap retak. Pengujian ini mengacu pada SNI 2432:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011a).

#### 6. VIM (*Void in the Mix*)

VIM adalah persentase rongga udara yang terdapat di dalam campuran beraspal setelah dipadatkan. Nilai VIM menunjukkan seberapa banyak ruang kosong dalam campuran yang dapat diisi udara atau air. Jika VIM terlalu besar, campuran akan mudah dimasuki air dan udara sehingga mempercepat kerusakan, sedangkan jika terlalu kecil dapat menyebabkan bleeding. Oleh karena itu, nilai VIM harus berada dalam batas spesifikasi agar campuran memiliki durabilitas yang baik (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

#### 7. VMA (*Void in Mineral Aggregate*)

VMA adalah volume rongga antar butiran agregat dalam campuran yang mencakup rongga udara dan aspal efektif. VMA menunjukkan kemampuan agregat dalam menampung aspal. Nilai VMA yang cukup diperlukan agar aspal dapat menyelimuti agregat dengan baik, sehingga meningkatkan daya tahan dan kekuatan campuran (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

#### 8. VFA (*Voids Filled with asphalt*)

VFA adalah persentase rongga dalam agregat (VMA) yang terisi oleh aspal. Parameter ini menunjukkan seberapa besar rongga agregat yang berhasil diisi oleh

aspal. Nilai VFA yang terlalu rendah menandakan campuran kurang aspal, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak. Oleh karena itu, nilai VFA harus memenuhi spesifikasi agar keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas tetap terjaga (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).



Gambar 2. 1 Gambar Jenis Perkerasan

Berdasarkan Gambar 2.1 jenisnya aspal dibedakan menjadi:

a. *AC-WC*

*Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)* atau Laston Lapis Aus merupakan lapisan perkerasan aspal yang ditempatkan pada bagian paling atas struktur jalan. Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan permukaan yang langsung berhubungan dengan beban kendaraan dan kondisi lingkungan, seperti air hujan, perubahan suhu, serta gesekan roda kendaraan. Oleh karena itu, AC-WC perlu memiliki karakteristik yang baik dari segi stabilitas, keawetan, kedekatan terhadap air, serta kenyamanan permukaan jalan bagi pengguna. Dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, AC-WC dikategorikan sebagai salah satu jenis Lapis Aspal Beton atau Laston, bersama dengan AC-BC dan AC-Base (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018).

b. *AC-BC*

*Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)* atau Laston Lapis Antara merupakan lapisan perkerasan aspal yang berada di antara lapis permukaan dan lapis fondasi. Lapisan ini berfungsi sebagai penghubung sekaligus lapisan struktural yang membantu menyalurkan beban lalu lintas dari lapisan atas ke lapisan di bawahnya. Berbeda dengan AC-WC yang lebih menekankan pada kenyamanan dan ketahanan permukaan, AC-BC lebih diarahkan untuk memberikan kekuatan struktural, stabilitas, dan ketahanan terhadap deformasi akibat beban kendaraan. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, AC-BC termasuk ke dalam kelompok

Lapis Aspal Beton atau Laston sebagai lapis antara, dengan tebal nominal minimum 6 cm (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018).

## 2.2 Agregat

Agregat merupakan material granular berupa butiran mineral seperti batu pecah, kerikil, pasir, maupun bahan pengisi yang digunakan sebagai komponen utama dalam pekerjaan konstruksi, khususnya pada perkerasan jalan. Agregat berfungsi sebagai kerangka utama campuran beraspal yang memengaruhi kekuatan, stabilitas, dan durabilitas lapis perkerasan (Smith & Collis, 2001; Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2). Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat., 2020). Dalam campuran beraspal panas, agregat tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengisi, tetapi juga membentuk kerangka utama campuran yang menahan beban lalu lintas. Spesifikasi Bina Marga menjelaskan bahwa agregat untuk campuran beraspal harus memenuhi persyaratan rumusan campuran kerja, disetujui sebelum digunakan, serta memiliki sifat tertentu seperti kebersihan, kekerasan, keawetan, dan bebas dari lempung atau bahan lain yang tidak dikehendaki (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020)

Dalam perkerasan aspal, agregat umumnya dibedakan menjadi agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengisi atau *filler*. Agregat kasar berperan membentuk struktur rangka campuran yang kuat, sedangkan agregat halus mengisi rongga antarbutiran agregat kasar agar campuran menjadi lebih rapat dan stabil. Agregat merupakan elemen penting dalam konstruksi, pemeliharaan, dan rehabilitasi perkerasan aspal, perkerasan beton, lapis fondasi jalan, serta sistem drainase. Oleh karena itu, pemilihan agregat perlu dipertimbangkan sejak tahap perencanaan dan desain campuran agar kinerja perkerasan dapat bertahan sesuai umur rencana (FHWA, 2024). Dari beberapa pendapat tersebut, agregat dapat diartikan sebagai kumpulan butiran batuan dengan ukuran tertentu yang diperoleh dari alam maupun hasil pemecahan batu, serta digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran konstruksi.

Kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kinerja campuran aspal, terutama terhadap stabilitas, ketahanan deformasi, keawetan, dan kemampuan campuran dalam menerima beban lalu lintas. Campuran aspal panas pada dasarnya tersusun dari dua bahan utama, yaitu agregat dan bahan pengikat aspal, sehingga proses desain campuran

bertujuan menentukan jenis agregat, jenis aspal, serta komposisi optimum keduanya (HMA Mix Design Fundamentals, 2025). Penelitian internasional juga menunjukkan bahwa gradasi agregat memiliki pengaruh penting terhadap parameter volumetrik dan ketahanan alur (*rutting*) pada campuran aspal; struktur gradasi yang lebih optimal dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan deformasi akibat beban kendaraan (Li et al., 2022; Zhu et al., 2024).

### **2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)**

RAP merupakan material hasil pembongkaran atau penggilingan lapisan perkerasan aspal lama yang dapat digunakan kembali sebagai bahan campuran dalam konstruksi perkerasan jalan baru. RAP terdiri atas agregat yang masih terlapisi oleh aspal lama sehingga masih memiliki nilai guna sebagai material daur ulang dalam campuran beraspal (Widayanti et al., 2020). Pemanfaatan RAP menjadi salah satu alternatif yang efektif dalam mengurangi penggunaan material baru serta mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di bidang konstruksi jalan (Nono & Hamdani, 2021).

RAP merupakan material hasil pembongkaran atau penggilingan lapisan perkerasan aspal lama yang telah rusak atau mencapai akhir umur layan, yang kemudian dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan campuran pada perkerasan jalan baru. Material ini diperoleh melalui proses *cold milling* dan masih mengandung agregat serta aspal lama yang melekat pada agregat tersebut sehingga memiliki nilai guna sebagai material daur ulang (Sulaiman & Kurniati, 2025). Pemanfaatan *RAP* menjadi salah satu inovasi dalam konstruksi jalan karena mampu mengurangi kebutuhan material baru serta mendukung efisiensi sumber daya dan pembangunan berkelanjutan (Prawistamandala, 2023).

Namun, aspal yang terdapat dalam RAP telah mengalami proses penuaan (*aging*) akibat paparan suhu, oksidasi, dan beban lalu lintas selama masa pelayanan jalan. Proses penuaan aspal dapat disebabkan oleh penguapan fraksi minyak ringan, oksidasi, serta perubahan temperatur, yang kemudian menyebabkan aspal menjadi lebih keras dan kaku sehingga memengaruhi kinerja campuran (Podungge et al., 2022). Pada material RAP, penuaan selama masa layan menyebabkan sebagian sifat reologi dan mekanik aspal menurun, sehingga campuran yang menggunakan RAP cenderung lebih kaku dan

berpotensi mengalami keretakan (Sepriyanna et al., 2025). Kondisi tersebut berdampak pada penurunan durabilitas campuran, terutama terhadap kerusakan seperti retak dan pelepasan butiran agregat (*raveling*) (National Academies of Sciences, 2025; Podungge et al., 2022) Sumber yang saya temukan menyebut penuaan aspal dapat menyebabkan pengerasan dan kekakuan, serta penuaan jangka panjang selama masa pelayanan membuat aspal lebih keras dan getas. Sumber lain tentang RAP juga menyebut aspal RAP telah mengalami penuaan selama masa layan sehingga kehilangan sebagian sifat reologi dan mekaniknya.

Majidifard et al. (2019) menyatakan bahwa campuran dengan kadar RAP tinggi lebih rentan terhadap retak suhu rendah dan memiliki masalah *workability* akibat meningkatnya kekakuan binder RAP. Kondisi ini dapat berkontribusi pada pelepasan butiran (*ravelling*) jika ikatan agregat–aspal melemah-

Salah satu kelemahan penggunaan RAP dalam campuran beraspal adalah potensi terjadinya penurunan daya lekat antara aspal dan agregat akibat kondisi binder lama yang telah mengalami penuaan. Penurunan daya lekat tersebut dapat menyebabkan ikatan antarbutir agregat menjadi kurang kuat, sehingga campuran lebih rentan mengalami pelepasan butiran pada permukaan perkerasan. Kondisi inilah yang kemudian dapat berkembang menjadi kerusakan berupa *raveling*, terutama apabila komposisi campuran, kadar aspal, dan kemampuan bahan pengikat dalam menyelimuti agregat tidak bekerja secara optimal.

Raveling atau *ravelling* merupakan kerusakan jalan berupa pelepasan butiran agregat pada permukaan perkerasan akibat hilangnya ikatan antara agregat dan aspal. Kerusakan ini dapat terjadi karena menurunnya nilai kohesi dan adhesi pada campuran beraspal, terutama ketika rongga dalam campuran memungkinkan air dan udara masuk sehingga melemahkan ikatan aspal-agregat (Susanto et al., 2021). Ketahanan terhadap *raveling* sangat dipengaruhi oleh kualitas material, komposisi campuran, serta kemampuan bahan pengikat dalam mempertahankan daya lekat antara aspal dan agregat. Penambahan bahan tertentu, seperti limbah plastik polypropylene (PP) atau polivinil klorida (PVC), dilaporkan dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap *ravelling* melalui penurunan nilai abrasi atau *Cantabro Loss* (Helmi, 2025; Susanto et al., 2021)

Penggunaan *RAP* memiliki banyak keuntungan menurut (Widayanti et al., 2018), antara lain:

1. Ekonomis  
Mengurangi kebutuhan agregat dan aspal baru.
2. Ramah Lingkungan  
Mengurangi limbah konstruksi dan penggunaan sumber daya alam.
3. Efisiensi Energi  
Mengurangi energi produksi material baru.

Secara global, *RAP* telah digunakan luas dan menjadi praktik umum dalam konstruksi jalan di berbagai negara. Meskipun memiliki banyak keunggulan, *RAP* juga memiliki keterbatasan menurut (Sepriyanna et al., 2025):

1. Aspal pada *RAP* mengalami penuaan (*aging*) akibat paparan oksigen, sinar matahari, perubahan temperatur, dan beban lalu lintas selama masa pelayanan perkerasan. Proses ini menyebabkan aspal menjadi lebih keras, kaku, dan berkurangnya sifat elastis sehingga dapat memengaruhi kinerja campuran. Menyebabkan campuran menjadi kaku dan rapuh.
2. Variabilitas material *RAP* yang tinggi dipengaruhi oleh kondisi dan sumber perkerasan jalan asal sehingga menyebabkan perbedaan karakteristik material.
3. Ikatan antara aspal dan agregat pada *RAP* mengalami penurunan akibat proses penuaan (*aging*) pada aspal sehingga daya lekat berkurang, yang dapat memengaruhi kinerja campuran dan meningkatkan potensi terjadinya *ravelling*.
4. Penggunaan *RAP* umumnya memerlukan bahan tambahan seperti *rejuvenator* atau *modifier* untuk mengembalikan sifat aspal mendekati kondisi awal

Penelitian menyebutkan bahwa penggunaan bahan peremaja (*rejuvenator*) diperlukan untuk mengembalikan sifat reologi aspal lama.

#### 2.4 *Natural rubber latex (NRL)*

NRL merupakan bahan alami yang berasal dari getah pohon karet (*Hevea brasiliensis*) dalam bentuk sistem koloid dan termasuk material terbarukan. NRL dari *Hevea brasiliensis* dijelaskan sebagai material terbarukan, sementara Wen et al. membahas NRL sebagai modifier berkelanjutan untuk binder aspal (Andrade et al., 2022; Wen et al., 2017b). Dalam konteks perkerasan jalan, penggunaan NRL menjadi salah satu alternatif material modifikasi yang berbasis sumber daya lokal dan ramah lingkungan.

NRL memiliki kandungan utama berupa partikel karet, air, protein, lipid, karbohidrat, serta sejumlah mineral dalam jumlah kecil. Sifat elastomer yang dimiliki menyebabkan NRL mampu memberikan peningkatan fleksibilitas pada bahan pengikat aspal. Penambahan NRL pada campuran beraspal bertujuan untuk meningkatkan kemampuan aspal dalam menerima beban lalu lintas, mengurangi kerusakan akibat deformasi, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh lingkungan dan perubahan temperatur. Selain itu, penggunaan bahan berbasis karet alam juga dinilai lebih ramah lingkungan karena berasal dari sumber daya terbarukan dibandingkan bahan modifikasi sintesis (Al-Sabaei et al., 2019).

Sifat elastis yang dimiliki NRL diperkirakan mampu meningkatkan daya lekat (*adhesion*) dan kohesi campuran sehingga ikatan antara agregat dan aspal menjadi lebih baik. Ikatan yang meningkat akan membantu campuran dalam menahan pelepasan agregat akibat gaya gesek maupun beban kendaraan. Oleh karena itu, penggunaan NRL berpotensi meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan permukaan seperti *ravelling* dan kehilangan material pada lapisan aus (*wearing course*) (Hermadi et al., 2021; Al-Sabaei et al., 2019).

Penambahan NRL pada campuran beraspal juga dapat mempengaruhi sifat adhesi dan kohesi campuran. Adhesi merupakan kemampuan aspal melekat pada permukaan agregat, sedangkan kohesi berkaitan dengan kekuatan internal pengikat aspal itu sendiri. Kedua sifat tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas lapisan aus karena berhubungan langsung dengan ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran agregat.

Semakin baik nilai adhesi dan kohesi maka potensi terjadinya *ravelling* akan semakin kecil (Mashaan et al., 2013).

Dalam bidang perkerasan jalan, penambahan NRL diketahui dapat meningkatkan karakteristik aspal melalui perubahan sifat reologi binder. Aspal yang dimodifikasi menggunakan bahan berbasis lateks umumnya memiliki elastisitas yang lebih baik sehingga campuran menjadi lebih lentur dan mampu mereduksi kerusakan akibat beban berulang. Peningkatan elastisitas tersebut menyebabkan distribusi tegangan pada lapisan perkerasan menjadi lebih merata sehingga potensi kerusakan seperti retak, deformasi permanen, dan pelepasan agregat dapat dikurangi (Suaryana & Sofyan, 2019).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan NRL pada campuran beraspal memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik Marshall. Suaryana dan Sofyan (2019) menjelaskan bahwa penggunaan bahan berbasis lateks pada campuran beraspal mampu meningkatkan stabilitas campuran serta memperbaiki karakteristik mekanis dibandingkan campuran tanpa modifikasi. Peningkatan stabilitas tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menerima beban dan mempertahankan bentuknya saat menerima gaya dari lalu lintas kendaraan. Selain itu, penambahan NRL juga berpotensi meningkatkan nilai *Marshall Quotient* yang menunjukkan peningkatan kekakuan dan ketahanan deformasi campuran.

Penambahan NRL atau karet alam pada campuran aspal telah banyak diteliti dengan variasi kadar yang berbeda. Beberapa penelitian menggunakan kadar 3% dan 5% sebagai variasi campuran untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap stabilitas Marshall, modulus resilien, ketahanan deformasi, dan karakteristik mekanik campuran aspal (Chandra et al., 2026; Hoy et al., 2024; Nirwana et al., 2025; Sholichin & Wahjudijanto, 2023; WIDIANTO & FAISAL, 2020). Selain itu, NRL juga dapat meningkatkan daya lekat (*adhesion*) antara aspal dan agregat, sehingga mengurangi potensi terjadinya raveling dan raveling pada permukaan jalan. Pada campuran beraspal, NRL terbukti dapat meningkatkan karakteristik mekanik seperti tensile strength, stiffness modulus, fatigue life, serta kinerja lingkungan dibanding campuran konvensional (Suwanto et al., 2023)

Penggunaan NRL Penggunaan karet alam dalam aspal juga relevan dengan pemanfaatan sumber daya lokal dan peningkatan konsumsi karet alam domestik Bina Marga menyebut teknologi aspal karet dapat meningkatkan ketahanan terhadap temperatur dan deformasi sekaligus meningkatkan konsumsi karet alam dalam negeri; Kemenperin juga menyebut pemanfaatan aspal karet sebagai upaya peningkatan penyerapan karet alam domestik (Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum, 2023; Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2020). Oleh karena itu, penggunaan NRL tidak hanya memberikan manfaat teknis tetapi juga manfaat ekonomi dan lingkungan.

## 2.5 Uji Kinerja Marshall pada Aspal

Uji Marshall merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal melalui parameter stabilitas dan keelehan plastis (flow). Pengujian ini mengacu pada prinsip Marshall Stability and Flow, yaitu pengukuran beban maksimum yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami keruntuhan serta besarnya deformasi yang terjadi pada saat pembebanan. Berdasarkan standar ASTM D6927-22, hasil uji Marshall dapat digunakan untuk mengevaluasi stabilitas, flow, kepadatan, rongga udara dalam campuran, serta parameter volumetrik lainnya yang berhubungan dengan penentuan kadar aspal optimum pada campuran beraspal (ASTM International, 2022). Dalam pelaksanaannya, alat Marshall dilengkapi dengan sistem pembebanan, proving ring atau load cell, serta flow meter untuk membaca besarnya deformasi plastis benda uji selama proses pembebanan. Parameter utama yang diperoleh dari pengujian Marshall meliputi stabilitas, flow, VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate), VFA (Void Filled with Asphalt), dan Marshall Quotient (MQ).

Setelah dilakukan pengujian Marshall, maka akan diperoleh beberapa parameter yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal, yaitu sebagai berikut:

1. Stabilitas, yaitu nilai beban maksimum yang mampu diterima oleh benda uji sebelum mengalami keruntuhan. Stabilitas menunjukkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas serta ketahanan terhadap deformasi permanen seperti *rutting* dan *shoving* (Asi et al., 2024; Awan et al., 2022).

2. Kelelehan plastis (*flow*), yaitu besarnya deformasi atau perubahan bentuk benda uji pada saat menerima beban maksimum. Nilai *flow* dinyatakan dalam satuan mm dan digunakan sebagai indikator kelenturan campuran beraspal. Nilai *flow* yang terlalu rendah menunjukkan campuran cenderung kaku dan mudah retak, sedangkan nilai *flow* yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu plastis dan mudah mengalami deformasi (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022)
3. VIM (*Void In Mix*), yaitu persentase rongga udara yang terdapat di dalam campuran beraspal yang telah dipadatkan. Nilai VIM menunjukkan tingkat kepadatan campuran dan berpengaruh terhadap durabilitas perkerasan. VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran mudah dimasuki air dan udara sehingga mempercepat kerusakan, sedangkan VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan campuran mudah mengalami *bleeding* (ASTM International, 2022; Khan et al., 2025)
4. VMA (*Void in Mineral Agregat*), yaitu persentase rongga antarbutir agregat dalam campuran beraspal yang telah dipadatkan, termasuk rongga yang terisi aspal dan rongga udara. Nilai VMA menunjukkan ruang yang tersedia untuk menampung aspal dalam campuran. VMA yang cukup diperlukan agar aspal dapat menyelimuti agregat dengan baik sehingga campuran memiliki daya lekat dan durabilitas yang baik (ASTM International, 2022; Khan et al., 2025)
5. *Marshall Question*, yaitu nilai perbandingan antara stabilitas dan *flow* yang dinyatakan dalam satuan kg/mm atau kN/mm. Nilai MQ digunakan sebagai pendekatan untuk menunjukkan tingkat kekakuan campuran beraspal dalam menerima beban. Semakin tinggi nilai MQ, maka campuran cenderung semakin kaku, sedangkan nilai MQ yang terlalu rendah menunjukkan campuran lebih plastis dan kurang mampu menahan deformasi (Awan et al., 2022; Khan et al., 2025)

## 2.6 Pengujian Cantabro Loss

Cantabro Loss merupakan parameter pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap kehilangan massa akibat abrasi, tumbukan, dan pelepasan butiran agregat. Parameter ini berkaitan dengan fenomena raveling, yaitu kerusakan permukaan berupa terlepasnya agregat dari lapisan perkerasan

akibat lemahnya ikatan antara aspal dan agregat, pengaruh beban lalu lintas, penuaan aspal, serta menurunnya daya lekat pada antarmuka aspal-agregat (Abouelsaad & White, 2022b). Pengujian Cantabro dilakukan menggunakan mesin Los Angeles Abrasion tanpa bola baja, kemudian benda uji diputar dalam jumlah putaran tertentu untuk mengetahui persentase kehilangan berat setelah pengujian. Standar AASHTO T 401-22 menjelaskan bahwa pengujian Cantabro digunakan untuk menentukan persentase kehilangan abrasi pada benda uji campuran aspal menggunakan mesin Los Angeles Abrasion (AASHTO, 2022a).

Nilai *Cantabro Loss* dinyatakan sebagai persentase kehilangan berat benda uji sebelum dan sesudah pengujian. Semakin kecil nilai Cantabro Loss, maka semakin baik ketahanan campuran terhadap pelepasan agregat, sedangkan nilai Cantabro Loss yang tinggi menunjukkan bahwa campuran lebih mudah mengalami keausan, disintegrasi, dan kerusakan permukaan. Pada campuran beraspal yang menggunakan material daur ulang seperti RAP, pengujian Cantabro dapat digunakan sebagai indikator durabilitas dan ketahanan aus campuran. Meena et al. (2024) menggunakan Cantabro Abrasion Loss untuk menilai ketahanan kohesi campuran aspal daur ulang berbasis RAP, sedangkan Carruth et al. (2023) menggunakan Cantabro Mass Loss dalam evaluasi campuran berbasis RAP dan bahan pengikat polimer. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian Cantabro relevan digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap kehilangan massa, khususnya pada campuran yang mengandung material daur ulang (Carruth et al., 2023; Meena et al., 2024).

Dalam konteks penelitian ini, Cantabro Loss digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran AC-WC berbasis RAP dengan penambahan NRL terhadap pelepasan agregat. Penambahan NRL pada campuran aspal berfungsi meningkatkan elastisitas, daya lekat, dan karakteristik mekanik campuran, sehingga berpotensi mengurangi kehilangan agregat akibat abrasi dan pembebanan berulang. Ramadhani et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan lateks pravulkanisasi pada campuran AC-WC dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan modulus kekakuan campuran (Ramadhani et al., 2024). Selain itu, Udomchai et al. (2024) dan Yeanyong et al. (2024) juga menunjukkan bahwa penggunaan karet alam pada campuran aspal dapat

meningkatkan performa mekanik campuran, seperti stabilitas, kekuatan tarik tidak langsung, modulus resilien, ketahanan terhadap *rutting*, dan ketahanan terhadap kelelahan (Udomchai et al., 2024; Yeanyong et al., 2024). Oleh karena itu, dengan membandingkan nilai Cantabro Loss pada setiap variasi campuran, dapat diketahui sejauh mana efektivitas penambahan NRL dalam meningkatkan durabilitas campuran AC-WC berbasis RAP terhadap pelepasan agregat.

1. Rumus *Cantabro Loss* :

$$CL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

W1 = berat awal benda uji

W2 = berat setelah pengujian

## 2.7 Peneliti Terdahulu

Penelitian sebelumnya terkait Penelitian terdahulu menjadi landasan penelitian ini:

Penelitian	Metode & Material	Hasil Utama	Keterbatasan/Gap
Wang et al., 2023	Eksperimen pembagian gradasi RAP dan penambahan rejuvenator.	Pembagian gradasi RAP membantu mengurangi variasi material dan meningkatkan kinerja campuran daur ulang.	Belum membahas RAP dengan NRL/latex pada AC-WC dan Cantabro.
Song, Lu, Feng, & Wu, 2026	Uji campuran recycled asphalt dengan variasi RAP dan regenerator.	kadar RAP sebaiknya tidak melebihi 30% untuk memastikan kinerja dan stabilitas perkerasan yang memadai.	RAP tinggi tetap berisiko membuat campuran lebih kaku akibat aspal tua.
Suwarto et al., 2025	Analisis mechanistic-empirical design dan life cycle cost pada campuran aspal NRL.	NRL terbukti meningkatkan ketahanan deformasi permanen dan retak lelah pada skala laboratorium.	Belum khusus membahas RAP 30%, AC-WC, dan Cantabro.
Paotong et al., 2020a	Uji UCS dan CBR pada RAP dengan semen dan NRL 5–15%.	RAP dengan semen dan NRL memenuhi spesifikasi UCS dan CBR untuk lapis perkerasan.	Masih untuk base/subbase, bukan lapisan aus AC-WC.

Nirwana et al., 2025	Uji Marshall dengan variasi karet alam 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5%.	Karet alam memengaruhi stabilitas, flow, density, VIM, VMA, VFB, dan MQ.	Belum menggunakan RAP dan belum menguji Cantabro/pengelupasan.
Carruth et al., 2023	Uji rutting, ITS, dan Cantabro mass loss pada RAP basah/kering dengan polymer binder.	RAP dengan polymer binder memiliki ketahanan rutting tinggi dan Cantabro mass loss mendekati campuran dense-graded.	Fokus pada perbaikan kecil lapangan terbang, bukan AC-WC dengan NRL.
Abdel-Jaber et al., 2022	Uji Marshall stability dan flow pada variasi RAP 25%, 50%, dan 75%.	Stabilitas meningkat seiring kenaikan RAP, dengan stabilitas maksimum pada RAP 75%.	Stabilitas tinggi belum tentu paling baik untuk lapis aus karena RAP tinggi dapat menurunkan fleksibilitas.
Nadhifah & Mahardi, 2025	Uji Marshall dan Marshall immersion pada AC-WC dengan RAP sebagai agregat halus.	Substitusi 25% RAP menghasilkan nilai IKS optimum 109%.	Belum memakai NRL/latex dan belum menguji Cantabro.
Xiao et al., 2023	Marshall design pada campuran permeable asphalt dengan RAP 10%, 20%, dan 30%.	RAP 30% digunakan sebagai salah satu variasi dan menunjukkan potensi	Jenis campuran bukan AC-WC, sehingga masih perlu kajian untuk lapisan aus.

		pemanfaatan RAP pada campuran aspal.	
Utami et al., 2020	Uji Marshall, UMATTA resilient modulus, dan four-point fatigue pada AC-BC dengan natural rubber latex 0%, 2%, dan 3%.	Natural rubber latex 3% menghasilkan stabilitas Marshall tertinggi dan menurunkan kadar aspal optimum.	Fokus pada AC-BC, bukan AC-WC berbasis RAP, dan belum menguji Cantabro/pengelupasan.
Al-Saffar et al., 2021	Uji Marshall, ITS, moisture damage, dan Cantabro loss pada 100% RAP dengan rejuvenator 2%, 3%, 4%, dan 5%.	RAP tanpa peremaja memiliki Cantabro loss tinggi, sedangkan penambahan 4% PelletRAP menurunkan Cantabro loss menjadi 7,07%.	Menggunakan rejuvenator komersial, bukan NRL, tetapi sangat relevan untuk pengelupasan RAP.
Prayuda, 2020	Uji Marshall, ITS, IRS, dan Cantabro Loss pada campuran SMA 0/11 dengan RAP dan peremaja 0–5%.	Semua variasi memenuhi syarat Cantabro Loss $\leq 20\%$ , dan kadar peremaja 2–3% dapat digunakan pada campuran RAP.	Fokus pada SMA, bukan AC-WC dan bukan NRL, tetapi relevan sebagai dasar uji pengelupasan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, RAP memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai material alternatif dalam campuran perkerasan jalan karena masih mengandung agregat dan aspal lama yang dapat digunakan kembali. Pemanfaatan RAP dapat mengurangi kebutuhan material baru, menekan biaya konstruksi, serta mengurangi limbah hasil pembongkaran perkerasan. Wang et al., 2023 menunjukkan bahwa pengaturan gradasi RAP melalui RAP Gradation Subdivision Method/RGSM mampu menurunkan variasi material, meningkatkan stabilitas, dan memperbaiki ketahanan campuran terhadap deformasi. Hal ini menunjukkan bahwa RAP dapat memberikan kinerja yang baik apabila gradasi dan karakteristik materialnya dikontrol dengan tepat.

Penelitian Song et al., 2026 juga memperkuat bahwa RAP dapat memberikan manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan pada campuran perkerasan. Pada campuran Coarse-Grained Recycled Asphalt Mixture/CRAM, peningkatan kadar RAP mampu memperbaiki ketahanan terhadap deformasi permanen atau rutting. Namun, penggunaan RAP dalam kadar tinggi tetap memiliki kelemahan karena aspal lama pada RAP telah mengalami penuaan sehingga campuran cenderung lebih kaku dan berpotensi menurunkan fleksibilitas serta ketahanan retak. Oleh karena itu, penggunaan RAP perlu dikombinasikan dengan bahan tambahan yang mampu membantu memperbaiki sifat elastis dan daya lekat campuran.

Selain RAP, beberapa penelitian menunjukkan bahwa NRL atau lateks karet alam berpotensi meningkatkan kinerja campuran aspal. (Suwanto et al., 2025) menyatakan bahwa modifikasi aspal menggunakan NRL mampu meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak lelah dibandingkan aspal konvensional. Campuran dengan NRL juga dinilai memiliki umur layanan yang lebih baik dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih rendah, sehingga berpotensi menjadi bahan modifikasi yang ekonomis dan berkelanjutan. Hal ini menjadi dasar bahwa NRL dapat digunakan untuk memperbaiki kelemahan campuran yang cenderung kaku akibat penggunaan RAP.

Penelitian Paotong et al., 2020 tidak dilakukan pada campuran AC-WC, melainkan pada campuran lapisan base course dan subbase course berbasis RAP. Pada campuran RAP dengan semen dan NRL, penambahan NRL pada kadar tertentu mampu

meningkatkan nilai kuat tekan dan daya dukung material, sedangkan kadar NRL yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan kekuatan campuran. Oleh karena itu, penelitian tersebut digunakan sebagai acuan awal bahwa kombinasi RAP dan NRL memiliki potensi dalam meningkatkan kualitas material daur ulang. Namun, karena objek penelitian Paotong et al. masih terbatas pada lapisan base course dan subbase course, hasilnya belum dapat digeneralisasikan langsung pada campuran lapis aus AC-WC. Perbedaan fungsi lapisan, gradasi, serta parameter kinerja menjadi alasan perlunya penelitian lebih lanjut pada campuran AC-WC berbasis RAP dengan penambahan NRL.

Penelitian lain juga menunjukkan adanya gap yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Nirwana et al., (2025) menunjukkan bahwa penggunaan karet alam pada campuran aspal dapat meningkatkan karakteristik Marshall apabila digunakan pada kadar yang tepat, tetapi penelitian tersebut belum menggunakan RAP dan belum mengkaji ketahanan terhadap pelepasan butir melalui uji Cantabro. Sementara itu, Carruth et al., (2023) menunjukkan bahwa RAP yang dimodifikasi dengan bahan pengikat polimer memiliki ketahanan rutting dan ketahanan pelepasan butir yang baik berdasarkan uji Cantabro, namun penelitian tersebut masih difokuskan pada material perbaikan kecil untuk lapangan terbang, bukan pada campuran AC-WC dengan modifikasi NRL. Dengan demikian, pengujian Cantabro penting dilakukan karena lapisan AC-WC berada di permukaan dan lebih rentan terhadap abrasi, pengelupasan, serta kehilangan ikatan antarbutir akibat beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan.

Sementara itu, pemilihan kadar aspal dalam penelitian ini perlu mengacu pada Kadar Aspal Optimum/KAO karena kadar aspal berpengaruh langsung terhadap ikatan antaragregat, stabilitas, rongga campuran, dan potensi pelepasan butir. Kadar aspal yang terlalu rendah dapat menyebabkan ikatan agregat menjadi lemah sehingga risiko pengelupasan meningkat, sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis, berpotensi mengalami bleeding, menurunkan stabilitas, dan mengganggu komposisi rongga campuran. Oleh karena itu, kombinasi RAP 30% dan variasi NRL 0%, 3%, dan 5% digunakan untuk mengevaluasi apakah penambahan NRL mampu mempertahankan stabilitas, meningkatkan fleksibilitas, serta memperbaiki

ketahanan campuran AC-WC terhadap pelepasan butir berdasarkan karakteristik Marshall dan uji Cantabro.