

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan Lentur

2.1.1. Definisi dan Fungsi Perkerasan Lentur

Struktur perkerasan jalan didirikan di atas tanah dasar (*subgrade*) dengan fungsi menopang sekaligus menyalurkan beban lalu lintas dengan aman selama periode yang telah direncanakan. Dari segi jenis bahan pengikat, konstruksi perkerasan jalan umumnya dibagi menjadi tiga kategori, yakni perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (Pasaribu & Simanullang, 2021). Sebagai komponen krusial dari infrastruktur transportasi darat, keberadaan jalan memungkinkan perpindahan orang dan barang berlangsung secara efisien, sehingga kondisi jalan yang baik berkontribusi langsung terhadap stabilitas ekonomi suatu wilayah (Bakri, 2025).

Ciri khas perkerasan lentur terletak pada penggunaan aspal sebagai pengikatnya, sehingga beban yang diterima disebarkan secara berjenjang dari lapisan teratas menuju tanah dasar, di mana tiap lapisan menahan sebagian beban sebelum diteruskan ke lapisan berikutnya (Pasaribu & Simanullang, 2021). Saat ini, perencanaan ketebalan perkerasan lentur di Indonesia mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan (*Manual Desain Perkerasan Jalan*, 2024), yang menerapkan bagan desain (*design chart*) untuk menetapkan susunan lapisan perkerasan berdasarkan data lalu lintas kumulatif (CESAL) dan daya dukung tanah dasar (CBR) (*Manual Desain Perkerasan Jalan*, 2024). Pendekatan berbasis katalog desain ini memungkinkan perencana untuk lebih berfokus pada akurasi data input lapangan guna menghasilkan struktur perkerasan yang optimal, dibandingkan melakukan perhitungan analitis yang kompleks pada setiap proyek (Bakri, 2025).

Karakteristik utama perkerasan lentur adalah sifatnya yang fleksibel, yaitu mampu mengalami deformasi elastis kecil akibat beban kendaraan tanpa mengalami keruntuhan getas, sehingga memberikan tingkat kenyamanan tertentu bagi pengguna jalan (Pasaribu & Simanullang, 2021). Ditinjau dari fungsinya, perkerasan lentur perlu memenuhi beberapa syarat pokok, yakni sanggup memikul

serta menyalurkan beban lalu lintas tanpa merusak struktur di bawahnya, bersifat kedap air, dan menghasilkan permukaan rata dengan kekesatan memadai demi keamanan berkendara. Dominannya perkerasan lentur sebagai pilihan konstruksi jalan di Indonesia tidak lepas dari faktor ekonomis dan kepraktisan pelaksanaannya, mengingat jenis perkerasan ini lebih mudah menyesuaikan diri dengan iklim tropis serta lebih hemat dari sisi biaya konstruksi awal dibandingkan perkerasan kaku (Bakri, 2025).

2.1.2. Struktur Lapisan Perkerasan Lentur

Secara garis besar, perkerasan lentur pada umumnya dibangun dari beberapa lapisan yang saling terikat dan disusun secara berjenjang di atas lapisan tanah dasar yang telah dipadatkan sebelumnya. Urutannya, mulai dari yang paling bawah, terdiri atas lapisan tanah dasar (*subgrade*), lapisan pondasi bawah (*subbase course*), lapisan pondasi atas (*base course*), hingga lapisan permukaan (*surface course*) (Pasaribu & Simanullang, 2021). Setiap lapisan dalam susunan ini dirancang dengan mutu material yang semakin tinggi seiring mendekati permukaan, mengikuti prinsip bahwa lapisan yang menerima tegangan terbesar akibat beban roda kendaraan harus memiliki modulus kekakuan dan daya dukung yang lebih tinggi dibandingkan lapisan di bawahnya (*Manual Desain Perkerasan Jalan*, 2024).

Lapisan tanah dasar terdiri dari tanah asli atau tanah timbunan yang telah dipadatkan, berperan sebagai fondasi utama bagi keseluruhan struktur di atasnya, dengan syarat tertentu terkait kepadatan dan daya dukung yang tercermin dalam nilai CBR. Berada tepat di atas tanah dasar, lapisan pondasi bawah bekerja meneruskan beban roda ke lapisan tanah dasar. Selain itu, lapisan ini juga berfungsi sebagai lapisan peresapan untuk mencegah genangan air di lapisan pondasi atas dan menghindari terangkatnya partikel halus dari tanah dasar akibat efek pompa (Pasaribu & Simanullang, 2021).

Selanjutnya, lapisan pondasi atas, yang berada di antara lapisan pondasi bawah dan lapisan permukaan, bertugas menahan gaya lateral dari beban roda kendaraan dan meneruskan sebagian bebannya ke lapisan di bawahnya (Pasaribu & Simanullang, 2021). Sebagai lapisan paling atas, *surface course* langsung

berhadapan dengan roda kendaraan, menanggung beban lalu lintas sekaligus paparan cuaca secara langsung, sehingga membutuhkan material dengan ketahanan tinggi terhadap deformasi dan penuaan. Pada perkerasan lentur masa kini, lapisan permukaan umumnya terbagi menjadi dua sublapisan, yaitu lapis aus (*wearing course*) di bagian paling atas dan lapis antara (*binder course*) tepat di bawahnya (Bakri, 2025).

Berdasarkan fungsi masing-masing lapisan, penggunaan RAP dalam penelitian ini difokuskan pada campuran AC-WC, bukan pada AC-BC atau AC-Base, sebab AC-WC-lah lapisan yang paling banyak terpapar kontak langsung roda kendaraan sekaligus faktor lingkungan seperti air, sinar matahari, dan fluktuasi suhu, sehingga menjadi lapisan yang paling menentukan kinerja permukaan jalan secara keseluruhan (Zuhad et al., 2025). Selain itu, AC-WC memiliki ukuran maksimum agregat yang lebih kecil (19 mm) dibandingkan AC-BC (25,4 mm) dan AC-Base (37,5 mm), sehingga proporsi RAP yang perlu difraksinasi dan dikendalikan gradasinya relatif lebih sederhana dan konsisten dengan ukuran fraksi RAP (>9,5 mm, 9,5-4,75 mm, dan <4,75 mm) yang digunakan dalam penelitian ini. Pertimbangan lain adalah bahwa AC-WC menuntut keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, dan durabilitas secara bersamaan pada satu lapisan tipis, sehingga efektivitas *rejuvenator* komposit RHA-WEO dalam menyeimbangkan pelunakan dan penstabilan *binder* RAP dapat dievaluasi secara lebih sensitif pada AC-WC dibandingkan pada AC-BC atau AC-Base yang secara fungsional lebih menitikberatkan pada kekuatan struktural semata dan kurang menuntut ketahanan permukaan terhadap air dan cuaca (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025).

2.1.3. Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) sebagai Lapis Permukaan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC), yang juga disebut Laston Lapis Aus, tergolong salah satu jenis campuran beraspal panas (*hot mix asphalt*) yang ditempatkan sebagai lapisan paling atas pada struktur perkerasan lentur. Sebagai lapisan aus, AC-WC harus memiliki sifat tahan terhadap cuaca, kedap air, dan langsung bersentuhan dengan roda kendaraan, sehingga lapisan ini paling cepat mengalami degradasi dibandingkan lapisan-lapisan di bawahnya (Zuhad et al.,

2025). Karena satu-satunya lapisan yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan, AC-WC juga dituntut memberikan kekesatan permukaan (*skid resistance*) yang memadai, terutama pada kondisi jalan basah, sehingga pemilihan agregat bertekstur kasar dan tahan terhadap polishing menjadi pertimbangan tambahan dalam merancang campurannya.

Berdasarkan Spesifikasi Umum 2025 Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, campuran beraspal panas Laston (AC) terbagi atas tiga jenis berdasarkan letaknya dalam struktur perkerasan, yakni Laston Lapis Aus (AC-WC), Laston Lapis Antara (AC-BC), dan Laston Lapis Fondasi (AC-Base), dengan batas ukuran agregat maksimum berturut-turut 19 mm, 25,4 mm, dan 37,5 mm (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Perbedaan ukuran agregat maksimum pada ketiganya mencerminkan perbedaan peran strukturalnya. AC-WC dengan agregat lebih kecil dirancang menghasilkan permukaan lebih rapat dan halus, sedangkan AC-BC dan AC-Base dengan agregat lebih besar lebih menitikberatkan pada kekuatan struktural untuk menopang beban jangka panjang. Ketentuan tebal nominal minimum untuk masing-masing jenis campuran tersebut ditetapkan dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Tebal Nominal Minimum Campuran Beraspal

Jenis Campuran	Tebal Nominal Minimum (cm)
Laston Lapis Aus (AC-WC)	4
Laston Lapis Antara (AC-BC)	6
Laston Lapis Fondasi (AC-Base)	7.5

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025

Karena posisinya yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan, AC-WC dituntut memiliki tingkat stabilitas tinggi untuk mengatasi deformasi permanen berupa alur (*rutting*), disertai fleksibilitas yang memadai supaya mampu mengikuti pergerakan kecil pada struktur di bawahnya tanpa mengalami retak, sekaligus durabilitas untuk mempertahankan kinerjanya selama umur rencana meski terus-menerus terpapar air dan perubahan suhu (Zuhad et al., 2025). Ketiga tuntutan tersebut pada praktiknya kerap kali saling bertentangan, sebab peningkatan stabilitas melalui penggunaan agregat bergradasi rapat atau aspal berpenetrasi rendah berpotensi menurunkan fleksibilitas serta durabilitas campuran. Kondisi

tersebut menjadikan pemilihan dan pengendalian mutu material penyusun, baik agregat maupun aspal, sebagai faktor determinan dalam pencapaian kinerja AC-WC yang optimal.

2.2 Material Penyusun Campuran AC-WC

Campuran AC-WC pada dasarnya tersusun atas dua komponen utama, yaitu agregat sebagai kerangka struktural campuran dan aspal sebagai bahan pengikat antaragregat. Penelitian ini membatasi pengujian karakteristik material pada parameter yang paling representatif untuk menilai kelayakan dasar material sebelum diproporsikan ke dalam campuran, yaitu berat jenis dan penyerapan serta analisis saringan (gradasi) untuk seluruh fraksi agregat (agregat kasar 3/4", agregat kasar 1/2", pasir alam, dan abu batu), serta penetrasi, titik lembek, daktilitas, dan berat jenis untuk aspal keras Pen 60/70. Pembatasan ini konsisten dengan prinsip bahwa pengujian berat jenis, penyerapan, dan gradasi merupakan parameter dasar (*basic properties*) yang wajib dipenuhi sebelum agregat dapat digunakan dalam rancangan campuran, sebagaimana disyaratkan dalam berbagai standar pengujian material perkerasan jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025).

2.2.1. Agregat Kasar Fraksi 3/4

Agregat kasar fraksi 3/4 inci, setara dengan ukuran nominal 19 mm, merupakan hasil pemecahan mesin yang tertahan pada saringan berukuran 3/4 inci dan berperan sebagai fraksi kasar utama pembentuk kerangka campuran beraspal. Fraksi ini tergolong agregat kasar, yaitu bagian yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm), dengan syarat harus keras, awet, bersih, serta bebas dari lempung maupun bahan lain yang tidak diinginkan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Fungsi utama fraksi 3/4" dalam campuran adalah memberikan gesekan antarbutir (*interlocking*) yang menjadi sumber utama stabilitas Marshall campuran beraspal, sebab partikel-partikel bersudut tajam saling mengunci satu sama lain di bawah tekanan pemadatan, menciptakan kerangka batu (*stone skeleton*) yang mampu menahan

beban tanpa bergantung sepenuhnya pada kekuatan ikatan aspal (Zuhad et al., 2025).

Karakterisasi agregat kasar fraksi 3/4" dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian berat jenis dan penyerapan mengacu pada SNI 1969:2016 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025), serta analisa saringan mengacu pada SNI ASTM C136:2012. Nilai berat jenis agregat menjadi parameter penting dalam perhitungan volumetrik campuran beraspal, khususnya dalam penentuan berat jenis maksimum teoretis (G_{mm}) dan berat jenis *bulk* campuran padat (G_{mb}), yang pada gilirannya digunakan untuk menghitung nilai VIM, VMA, dan VFB sebagaimana disyaratkan dalam kriteria Marshall (Y. Li et al., 2022)

2.2.2. Agregat Kasar Fraksi 1/2

Agregat kasar fraksi 1/2 inci (setara ukuran nominal 12,5 mm) adalah fraksi agregat pecah mesin berukuran lebih kecil dari fraksi 3/4" yang juga tertahan pada saringan No. 4, namun memiliki peran melengkapi gradasi gabungan pada rentang ukuran menengah. Keberadaan fraksi ini penting untuk mengisi kekosongan antarbutir yang tidak dapat dijangkau oleh fraksi 3/4" semata, sehingga gradasi campuran menjadi lebih rapat dan seragam (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Dapat dilihat pada Tabel 2.2 terkait Fraksi Agregat Kasar.

Tabel 2. 2 Fraksi Agregat Kasar Penampung Dingin untuk Laston Lapis Aus (AC-WC)

Fraksi Ukuran (mm)	Digunakan pada AC-WC
5-10	Ya
10-16	Ya
16-22	Tidak
22-30	Tidak

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025

Berdasarkan Tabel 2.2, campuran AC-WC hanya memerlukan dua fraksi penampung dingin, sehingga fraksi 1/2" menjadi fraksi kasar terbesar yang diizinkan untuk campuran ini. Karakterisasi fraksi 1/2" tunduk pada pengujian yang sama dengan fraksi 3/4", yaitu berat jenis-penyerapan (SNI 1969:2016) dan analisa

saringan (SNI ASTM C136:2012), mengingat keduanya sama-sama tergolong agregat kasar (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025; Y. Li et al., 2022).

2.2.3. Agregat Halus

Berbeda dari agregat hasil pemecahan mesin, pasir alam merupakan agregat halus yang diambil langsung dari alam, dengan butiran yang lolos ayakan No. 4 (4,75 mm). Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga (2025), penggunaan pasir alam pada campuran Laston (AC) dibatasi maksimal 15% terhadap berat total campuran, sebab butirannya yang cenderung membulat (*rounded*) dapat mengurangi gesekan antarbutir apabila proporsinya berlebihan dibandingkan agregat hasil pemecahan mesin. Dalam penelitian ini, karakterisasi pasir alam dilakukan lewat pengujian berat jenis dan penyerapan berdasarkan SNI 1970:2016, disertai analisa saringan mengacu SNI ASTM C136:2012 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Tingginya nilai penyerapan air pada agregat mengindikasikan besarnya porositas internal, yang berisiko menyerap aspal secara berlebihan saat pencampuran sehingga mengurangi kadar aspal efektif yang tersisa untuk menyelimuti permukaan agregat (Jatoi et al., 2025).

2.2.4. Agregat Halus Abu Batu

Agregat Abu batu (*stone dust*) adalah agregat halus hasil sampingan proses pemecahan batu (*crushing*) yang berbentuk partikel bersudut tajam (*angular*) dan lolos ayakan No. 4. Berbeda dengan pasir alam yang butirannya membulat, abu batu memiliki permukaan yang lebih kasar sehingga memberikan ikatan mekanis antarbutir yang lebih baik dan berkontribusi positif terhadap nilai stabilitas Marshall campuran beraspal (RA et al., 2025). Sebagai fraksi halus yang mendominasi komposisi agregat pada campuran tanpa *filler* tambahan seperti pada penelitian ini, abu batu memegang peranan penting dalam mengisi rongga antaragregat kasar sekaligus menyumbang luas permukaan yang berikatan dengan aspal.

Studi yang menilai pengaruh abu batu sebagai bahan pengisi pada campuran AC-WC mendapati bahwa penambahannya secara konsisten mendongkrak nilai

stabilitas Marshall dibandingkan campuran dengan proporsi abu batu lebih sedikit, karena partikel halus bersudut tajam tersebut turut mengisi rongga mikro antaragregat kasar sekaligus memperluas bidang kontak dengan aspal (RA et al., 2025). Sama seperti pasir alam, karakterisasi abu batu pada penelitian ini juga dibatasi pada pengujian berat jenis-penyerapan (SNI 1970:2016) dan analisa saringan (SNI ASTM C136:2012), sebagaimana berlaku untuk seluruh jenis agregat halus (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025).

2.2.5. Amplop Gradasi Agregat Gabungan untuk AC-WC

Setelah keempat fraksi agregat di atas dipersiapkan sesuai persyaratan mutunya masing-masing, keempatnya diproporsikan melalui proses *aggregate blending* sedemikian rupa sehingga gradasi gabungan berada dalam rentang amplop gradasi pada Tabel 2.3 yang disyaratkan untuk AC-WC.

Tabel 2. 3 Amplop Gradasi Agregat Gabungan untuk Laston Lapis Aus (AC-WC)

Ukuran Ayakan (mm)	% Lolos terhadap Total Agregat
19	100
12.5	90-100
9.5	77-90
4.75	53-69
2.36	33-53
1.18	21-40
0.600	14-30
0.300	9-22
0.150	6-15
0.075	4-9

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025

Gradasi pada Tabel 2.3 tergolong sebagai gradasi menerus (*dense-graded*), yang menuntut proporsi terkendali antara agregat kasar dan agregat halus agar rongga dalam campuran (VIM) tetap berada dalam rentang yang disyaratkan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025; Le et al., 2024)

2.2.6. Aspal Keras Penetrasi 60/70 sebagai Bahan Pengikat

Sebagai bahan pengikat (*binder*) antaragregat, aspal memiliki sifat termoplastis, yakni melunak pada suhu tinggi dan mengeras kembali pada suhu ruang (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Jenis aspal yang dipakai dalam penelitian ini adalah Aspal Tipe I berpenetrasi 60/70, pilihan yang paling lazim digunakan pada campuran AC-WC di Indonesia karena sesuai dengan volume lalu lintas sedang hingga tinggi serta karakteristik iklim tropis.

Sesuai lingkup penelitian ini, karakteristik aspal dievaluasi melalui empat parameter, yaitu penetrasi (SNI 2456:2011), titik lembek (SNI 2434:2011), daktilitas (SNI 2432:2011), dan berat jenis (SNI 2441:2011). Keempat parameter ini dipilih karena secara kolektif merepresentasikan tingkat kekerasan, kepekaan terhadap suhu, keelastisan, serta volumetrik *binder* aspal. Empat sifat yang paling relevan untuk mengevaluasi perubahan kondisi *binder* RAP setelah diberi perlakuan *rejuvenator* komposit (Mehmood et al., 2024). Persyaratan mutu keempat parameter tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2. 4 Ketentuan Aspal Keras Penetrasi 60/70

No.	Sifat-Sifat	Metode Pengujian	Persyaratan
1.	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70
2.	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48
3.	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
4.	Berat Jenis pada 25°C	SNI 2441:2011	1,0-1,04

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025

Kondisi *binder* pada RAP yang berasal dari ruas Jalan Tol Pemalang-Batang telah mengalami proses oksidasi selama masa layannya, akibatnya, secara empiris teramati penurunan nilai penetrasi disertai peningkatan titik lembek dibandingkan ambang persyaratan yang berlaku pada Tabel 2.4, yang menjadi dasar pertimbangan teknis penambahan *rejuvenator* komposit RHA-WEO (Mehmood et al., 2024).

2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

2.3.1. Definisi dan Sumber RAP

RAP diperoleh dari proses pengerukan atau penggarukan (*milling*) terhadap lapisan perkerasan aspal lama yang telah mengalami kerusakan sepanjang masa layannya, kemudian dihancurkan menjadi agregat yang berpeluang dimanfaatkan kembali sebagai penyusun campuran beraspal baru (Abdelrahman et al., 2024). Material RAP terdiri dari dua komponen yang menyatu secara fisik, yaitu agregat yang telah terselimuti aspal lama (*aged binder*), sehingga RAP tidak dapat dipisahkan lagi menjadi agregat dan aspal murni tanpa melalui proses ekstraksi laboratorium (Mehmood, et al., 2024).

Karakteristik RAP yang diperoleh dari satu ruas jalan dapat sangat bervariasi tergantung pada usia perkerasan, jenis campuran asal, riwayat pembebanan lalu lintas, serta kondisi iklim yang dialami selama masa layannya, sehingga setiap sumber RAP memerlukan karakterisasi tersendiri sebelum dimanfaatkan kembali (Jiang et al., 2023). Untuk mengendalikan variabilitas material tersebut, RAP dalam penelitian ini dipisahkan menjadi tiga fraksi ukuran, yaitu fraksi tertahan saringan 9,5 mm, fraksi lolos saringan 9,5 mm dan tertahan saringan 4,75 mm, serta fraksi lolos saringan 4,75 mm. Berdasarkan Spesifikasi Umum 2025, agregat kasar didefinisikan sebagai fraksi yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm), sedangkan agregat halus adalah fraksi yang lolos saringan No. 4 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Dengan acuan tersebut, fraksi RAP >9,5 mm dan 9,5 sampai 4,75 mm menggantikan sebagian agregat kasar, sedangkan fraksi RAP <4,75 mm menggantikan sebagian agregat halus. Pembagian tiga fraksi tersebut memungkinkan proporsi RAP terhadap agregat baru dikendalikan secara lebih presisi, mengingat fraksi yang lebih halus umumnya membawa proporsi *binder* teroksidasi yang lebih signifikan akibat luas permukaan spesifik yang lebih besar (Jiang et al., 2023; Pradhan, 2023)

2.3.2. Karakteristik RAP melalui Ekstraksi dan Pengujian Berat Jenis

Proses ekstraksi dimaksudkan untuk memisahkan sementara agregat dari *binder* aspal lama yang menyelimuti RAP, sehingga kadar aspal yang terkandung di

dalamnya dapat diketahui secara kuantitatif, dengan mengacu pada SNI 03-6894-2002 sebagai standar nasional (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Kadar aspal hasil ekstraksi ini menjadi parameter krusial dalam perhitungan proporsi campuran, sebab *binder* yang telah terkandung dalam RAP perlu diperhitungkan sebagai bagian dari total kadar aspal campuran (Abdelrahman et al., 2024).

Setelah proses ekstraksi, agregat RAP kemudian diuji berat jenisnya mengacu pada SNI 1969:2016 untuk fraksi kasar dan SNI 1970:2016 untuk fraksi halus. Pengujian berat jenis RAP menjadi penting karena lapisan film aspal residual yang masih menempel pada permukaan agregat memengaruhi nilai berat jenis *bulk* dan penyerapan air yang terukur, sehingga perbedaan ini perlu diperhitungkan dalam desain volumetrik campuran gabungan RAP-agregat baru (Mehmood et al., 2024). Pendekatan pembatasan pengujian pada ekstraksi dan berat jenis ini konsisten dengan praktik karakterisasi dasar RAP yang umum dilakukan sebagai tahap awal sebelum evaluasi kinerja campuran lebih lanjut (Jiang et al., 2023; Pradhan, 2023).

2.3.3. Pemanfaatan RAP dalam Campuran Beraspal pada Kadar 20%

Pemanfaatan RAP memberikan manfaat teknis dan ekonomis secara simultan. Secara teknis, penambahan RAP pada kadar tertentu justru dapat meningkatkan nilai stabilitas Marshall dibandingkan campuran konvensional. Pada kadar RAP 20%, stabilitas Marshall meningkat sekitar 10-21% dibandingkan campuran konvensional, diiringi dengan penurunan nilai *flow* akibat kekakuan tambahan tersebut (Abd Ali et al., 2024b; Ali et al., 2024). Peningkatan kadar RAP secara konsisten meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen, namun menurunkan ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembapan, dengan kadar RAP 30% diidentifikasi sebagai kadar optimum berdasarkan analisis energi regangan, sehingga kadar RAP 20% yang digunakan dalam penelitian ini tergolong kadar rendah-sedang yang aman secara teknis (Jiang et al., 2023). Secara ekonomis, pemanfaatan RAP menekan kebutuhan agregat baru dan aspal baru secara proporsional terhadap kadar RAP yang digunakan (Abdelrahman et al., 2024).

2.4 Bahan Peremaja (*Rejuvenator*) pada Campuran RAP

2.4.1. Konsep dan Mekanisme Kerja *Rejuvenator*

Bahan peremaja atau *rejuvenator* adalah bahan tambah yang dicampurkan ke dalam *binder* aspal lama pada RAP dengan tujuan mengembalikan sifat fisik dan kimiawinya mendekati kondisi aspal baru (Bhatt & Wu, 2025a). *Rejuvenator* bekerja melalui dua tahapan, yaitu difusi molekul *rejuvenator* ke dalam struktur *binder* yang telah mengeras, dan pelunakan yang melarutkan kembali agregat *asphaltene* yang telah menggumpal akibat oksidasi. Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh derajat pencampuran (*degree of blending*) antara *rejuvenator* dan *binder* RAP, yang pada praktiknya jarang mencapai kondisi pencampuran sempurna meskipun asumsi tersebut umum digunakan dalam desain campuran teoretis (Bhatt & Wu, 2025a).

Studi eksperimental yang mengevaluasi pengaruh kadar *rejuvenator* terhadap sifat konvensional *binder* RAP menemukan bahwa nilai penetrasi dan daktilitas meningkat, sementara titik lembek menurun, seiring bertambahnya kadar *rejuvenator*, dengan kadar optimum umumnya berada pada kisaran 4% terhadap berat *binder* (Jiang et al., 2023). Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop gaya atom turut mengonfirmasi bahwa penambahan *rejuvenator* secara bertahap memulihkan struktur mikro khas aspal segar yang sebelumnya mengalami distorsi akibat oksidasi (Han et al., 2022; Jiang et al., 2023).

2.4.2. Pencampuran *Rejuvenator* dengan Metode *Dry mix* pada RAP

Terdapat beberapa metode pencampuran *rejuvenator* ke dalam sistem RAP, yaitu pencampuran basah (*wet mix*) dengan *binder* yang telah diekstraksi terlebih dahulu, atau pencampuran kering (*dry mix*) di mana *rejuvenator* ditambahkan langsung ke RAP tanpa ekstraksi *binder* terlebih dahulu (Bhatt & Wu, 2025). Penelitian ini menggunakan metode *dry mix*, yaitu *rejuvenator* komposit RHA-WEO dicampurkan langsung ke material RAP sebelum RAP dicampurkan dengan agregat dan aspal baru. Pendekatan *dry mix* dipilih karena lebih merepresentasikan kondisi produksi aktual di *Asphalt Mixing Plant*, di mana RAP umumnya diberi perlakuan *rejuvenator* terlebih dahulu dalam kondisi panas sebelum dicampur dengan

komponen lain (Tang et al., 2021). Metode *dry mix* juga menghindari risiko perubahan sifat kimiawi *binder* akibat paparan pelarut kimia selama proses ekstraksi-recovery, sehingga hasil evaluasi kinerja campuran akhir lebih representatif terhadap kondisi RAP yang sesungguhnya (Han et al., 2022).

2.4.3. Waste Engine Oil (WEO) sebagai Rejuvenator

Secara kimiawi, WEO tersusun dari senyawa hidrokarbon aromatik dan alifatik dengan berat molekul rendah (di bawah 200 g/mol), didominasi alkilbenzena dan alkana C9-C12, serta memiliki viskositas dan berat jenis rendah (Mehmood et al., 2024). Karakteristik inilah yang menjadikan WEO mampu berdifusi ke dalam struktur *binder* RAP yang telah mengeras dan melunakkannya kembali.

Penambahan WEO terbukti konsisten memperbaiki parameter penetrasi, titik lembek, dan daktilitas (Mehmood et al., 2024). Pada campuran dengan RAP 20%, WEO tercatat meningkatkan ketahanan terhadap *stripping* hingga 62% (Abd Ali et al., 2024b), dengan kadar optimum 3-4% (Ali et al., 2024). Namun, WEO memiliki keterbatasan berupa penurunan sifat kohesif dan peningkatan kerentanan terhadap kelembapan pada kadar berlebih (Mehmood et al., 2024), yang menjadi dasar kebutuhan bahan penstabil tambahan berupa RHA.

Kelebihan utama WEO sebagai *rejuvenator* terletak pada efektivitasnya dalam melunakkan *binder* RAP pada kadar rendah hingga sedang (Abd Ali et al., 2024). Namun, WEO memiliki keterbatasan teknis mendasar berupa peningkatan *moisture susceptibility*, yaitu kerentanan campuran terhadap penurunan kekuatan akibat masuknya air ke dalam struktur *binder* selama masa layan. Dari perspektif mekanistik, fenomena ini terjadi melalui proses *stripping*, di mana lapisan film aspal terlepas dari permukaan agregat akibat air yang menggantikan aspal pada antarmuka aspal-agregat, karena pada kondisi tertentu energi ikatan air-agregat lebih stabil secara termodinamika dibandingkan energi ikatan aspal-agregat (Mehmood et al., 2024). Sifat WEO yang hidrofilik memperbesar kecenderungan ini, sebab molekul-molekul WEO yang berdifusi ke dalam *binder* turut mengubah polaritas permukaan *binder* sehingga afinitasnya terhadap air meningkat relatif terhadap afinitasnya terhadap agregat.

Secara laboratorium, *moisture susceptibility* diukur melalui perbandingan kekuatan campuran sebelum dan sesudah kondisioning perendaman, pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 dikenal sebagai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) atau Stabilitas Marshall Sisa (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Nilai IKS rendah mengindikasikan campuran rentan *stripping*, sedangkan nilai tinggi mengindikasikan ikatan aspal-agregat yang tahan terhadap penetrasi air. Kerentanan WEO terhadap fenomena inilah yang menjadi dasar kebutuhan bahan penstabil tambahan

2.5 Rice Husk Ash (RHA)

2.5.1. Karakteristik dan Kandungan Kimia RHA

RHA adalah residu anorganik hasil pembakaran sekam padi. Dalam penelitian ini, karakterisasi RHA dilakukan melalui pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), yaitu metode analisis komposisi kimia unsur berdasarkan prinsip fluoresensi sinar-X, sehingga proporsi tiap senyawa oksida dalam RHA dapat diketahui secara kuantitatif (Ramadhani et al., 2025). Metode ini dipilih karena sanggup memberikan data komposisi kimia secara cepat dan akurat tanpa membutuhkan preparasi sampel yang rumit, menjadikannya prosedur standar pada berbagai penelitian karakterisasi RHA (Endale et al., 2023).

Hasil pengujian XRF pada penelitian RHA sebagai bahan pengganti pada campuran AC-WC menunjukkan kandungan silika (SiO_2) sebesar 91,5%, jauh melampaui abu batu konvensional yang hanya sekitar 48,1% (Ramadhani et al., 2025). Tingginya proporsi silika ini menjadi dasar sifat pozzolanik RHA, sebagaimana juga dikonfirmasi oleh tinjauan literatur yang menyebutkan kandungan silika RHA pada rentang 85-90% tergantung kondisi pembakaran (Endale et al., 2023).

2.5.2. RHA sebagai Agen Penstabil Fisik pada Binder Aspal

Selain berfungsi sebagai material pozzolanik, kandungan silika tinggi pada RHA menjadikan partikelnya berperan sebagai bahan pengisi (*filler*) yang mengembalikan kekakuan dan viskositas *binder* yang telah menurun akibat

pelunakan berlebih oleh *rejuvenator* berbasis minyak (Y. Li et al., 2022). Fungsi pengisi ini bekerja secara mekanis, partikel-partikel halus RHA yang tersebar dalam matriks *binder* mengisi rongga mikro dan meningkatkan luas bidang kontak antartikel, sehingga *binder* yang telah dilunakkan dapat kembali memperoleh kekakuan pada tingkat tertentu tanpa kehilangan seluruh fleksibilitas yang telah dipulihkan oleh bahan pelunak (Y. Li et al., 2022). Fungsi *filler* inilah yang menjadi mekanisme utama RHA dalam mengimbangi efek pelunakan *rejuvenator* secara langsung, sebab keduanya bekerja pada ranah yang sama, yaitu kekakuan mekanis *binder*, sehingga efeknya dapat saling menetralkan secara langsung.

Selain fungsi pengisi tersebut, kandungan silika tinggi pada RHA turut memberikan manfaat tambahan berupa sifat antioksidan yang menghambat reaksi oksidasi penyebab penuaan (*aging*) *binder* pada masa layan berikutnya, sebagaimana ditunjukkan melalui penurunan indeks kerentanan penuaan (*Aging Index Ratio*) pada penelitian RHA yang dipadukan dengan bahan modifikasi berbasis karet (Y. Li et al., 2022). Perlu ditekankan bahwa fungsi antioksidan ini bersifat kimiawi dan bekerja pada ranah yang berbeda dari fungsi pengisi, yaitu memperlambat laju degradasi *binder* dalam jangka panjang, bukan menjadi penawar langsung terhadap efek pelunakan mekanis yang ditimbulkan oleh *rejuvenator*. Dengan demikian, RHA memiliki peran ganda yang saling melengkapi, yaitu sebagai penstabil fisik yang secara langsung mengimbangi pelunakan akibat *rejuvenator*, sekaligus sebagai agen antioksidan yang memberikan manfaat tambahan berupa perlambatan penuaan *binder* dalam jangka panjang (Y. Li et al., 2022).

2.5.3. Pengaruh RHA terhadap Kekakuan dan Ketahanan Penuaan *Binder*

Berbeda dengan WEO yang bekerja melunakkan *binder* melalui difusi molekul aromatik ringan ke dalam struktur *binder* yang telah mengeras, RHA bekerja melalui mekanisme fisik yang berlawanan arah, yaitu mengisi rongga mikro dan meningkatkan kekakuan *binder* pada tingkat tertentu (Y. Li et al., 2022). Perbedaan mekanisme kerja inilah yang menjadikan kedua bahan tersebut saling melengkapi dan bukan memiliki fungsi yang sama, sebab WEO menurunkan viskositas *binder*

sedangkan RHA justru meningkatkannya kembali pada level yang terkendali, sehingga kombinasi keduanya berpotensi menghasilkan keseimbangan kekakuan yang tidak dapat dicapai oleh salah satu bahan secara tunggal.

Bukti empiris mengenai fungsi pengisi RHA ini ditunjukkan pada penelitian yang mengevaluasi RHA sebagai pengganti abu batu pada campuran AC-WC berbasis lateks pravulkanisasi, di mana substitusi RHA sebesar 50-100% terhadap abu batu konvensional meningkatkan stabilitas Marshall sebesar 27,12-52,12% serta meningkatkan modulus kekakuan (*stiffness modulus*) campuran (Ramadhani et al., 2025). Peningkatan stabilitas dan modulus kekakuan tersebut secara langsung mengonfirmasi fungsi RHA sebagai bahan pengisi yang memperkuat struktur campuran, berbeda dari fungsi lateks pada penelitian tersebut yang justru berperan melunakkan dan meningkatkan elastisitas *binder*, sebuah pola fungsi ganda (pelunak-penguat) yang analog dengan kombinasi RHA-WEO dalam penelitian ini. Temuan ini menjadi dasar empiris bahwa karakterisasi kimiawi RHA melalui XRF, khususnya kandungan silikanya, berkorelasi langsung dengan besarnya kontribusi RHA terhadap kekakuan mekanis campuran akhir, bukan sekadar data deskriptif komposisi (Ramadhani et al., 2025).

2.5.4. RHA dan *Moisture susceptibility*

Selain berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) yang mengembalikan kekakuan *binder*, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa RHA berpotensi memperbaiki ketahanan campuran terhadap *moisture susceptibility*, sejalan dengan fungsinya sebagai bahan pengganti *anti-stripping agent* konvensional. Penelitian yang mengevaluasi RHA sebagai pengganti *hydrated lime*, yang secara konvensional digunakan untuk mengurangi kerentanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembapan, menemukan bahwa substitusi RHA hingga 4% menghasilkan stabilitas Marshall yang lebih tinggi dan kadar aspal optimum yang lebih rendah dibandingkan campuran dengan *hydrated lime*, mengindikasikan potensi RHA menggantikan fungsi *anti-stripping* tersebut (Mistry et al., 2023).

Temuan serupa dilaporkan pada penelitian yang mengevaluasi RHA sebagai *filler* pada campuran beraspal dingin (*cold mix asphalt*), di mana penambahan RHA sebesar 5% terhadap berat campuran meningkatkan kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength*) sekaligus memperbaiki *moisture susceptibility* dibandingkan *filler* debu batu konvensional, yang dikaitkan dengan efek pozzolanik RHA dalam mengisi rongga mikro campuran (Deb & Singh, 2023). Tinjauan sistematis terhadap 72 studi RHA, abu ampas tebu, dan abu cangkang sawit yang diterbitkan antara tahun 2010 hingga 2024 turut menegaskan bahwa RHA secara konsisten memperbaiki stabilitas dan kekakuan campuran, dengan performa optimal pada kadar 6-8% terhadap berat *filler* (Pratiwi et al., 2025).

Pada tingkat *binder*, penelitian yang mengevaluasi pengaruh RHA terhadap sifat fisik *binder* aspal, meliputi penetrasi, titik lembek, viskositas, daktilitas, dan stabilitas penyimpanan, menemukan perbaikan pada indeks kinerja suhu *binder* yang berkaitan dengan ketahanannya terhadap kondisi lingkungan, termasuk paparan air (Abdelmagid et al., 2023). Bukti yang paling relevan dengan konteks penelitian ini datang dari studi yang secara khusus mengevaluasi *filler* komposit berbasis limbah pada campuran daur ulang mengandung RAP, di mana kombinasi cement kiln dust dan RHA pada proporsi 75:25 ditemukan sebagai kombinasi optimum yang memperbaiki stabilitas Marshall, ketahanan terhadap rutting, ketahanan retak, sekaligus *moisture susceptibility* campuran *hot-mix asphalt* daur ulang mengandung 30% RAP dibandingkan campuran kontrol (Rikambura et al., 2024).

Kelima temuan tersebut secara kolektif menunjukkan bahwa RHA memiliki potensi memperbaiki ketahanan campuran terhadap *moisture susceptibility*, termasuk pada konteks campuran berbasis RAP. Meskipun demikian, seluruh penelitian tersebut mengevaluasi RHA sebagai *filler* tunggal atau dipadukan dengan bahan mineral lain, bukan dalam konteks komposit dengan *rejuvenator* berbasis minyak seperti WEO. Oleh karena itu, potensi RHA mengimbangi peningkatan *moisture susceptibility* akibat WEO dalam penelitian ini bersifat rasionalisasi

berbasis analogi dari literatur tersebut, dan akan dievaluasi secara empiris melalui pengujian IKS pada sistem komposit RHA-WEO secara keseluruhan.

2.6 Rejuvenator Komposit WEO dan RHA

2.6.1. Konsep Sinergi Bahan Pelunak (WEO) dan Bahan Penstabil (RHA)

WEO dan RHA pada dasarnya memiliki fungsi mekanis yang saling berlawanan namun justru saling melengkapi dalam satu sistem *rejuvenator* komposit. WEO, sebagai komponen dengan viskositas rendah, berperan meremajakan dan melunakkan *binder* aspal yang telah mengeras akibat RAP, melalui mekanisme difusi molekul ringan ke dalam struktur *binder* yang telah mengoksidasi (Mehmood et al., 2024). Namun, pelunakan tersebut apabila tidak dikendalikan berpotensi menurunkan kekakuan *binder* secara berlebihan sekaligus meningkatkan kerentanan terhadap kelembapan.

RHA hadir untuk mengimbangi efek pelunakan tersebut secara langsung melalui fungsi pengisi (*filler*) yang bersifat mekanis, yaitu mengembalikan kekakuan dan viskositas *binder* pada tingkat tertentu tanpa menghilangkan fleksibilitas yang telah dipulihkan oleh WEO (Y. Li et al., 2022). Fungsi pengisi inilah yang menjadi mekanisme utama kesinambungan sistem komposit ini, sebab keduanya bekerja pada ranah yang sama (kekakuan mekanis *binder*) sehingga efeknya dapat saling menetralkan secara terukur melalui variasi kadar. Kekakuan yang pulih pada tingkat mikro turut merapatkan rongga campuran, sehingga air lebih sulit masuk ke dalam struktur *binder*. Kontribusi inilah yang secara langsung relevan terhadap ketahanan campuran yang dievaluasi melalui parameter IKS dalam penelitian ini. Selain fungsi pengisi tersebut, RHA turut memberikan manfaat tambahan berupa sifat antioksidan yang memperlambat penuaan *binder* dalam jangka panjang (Y. Li et al., 2022), namun fungsi ini bersifat pelengkap dan bukan menjadi mekanisme utama pengimbang pelunakan WEO.

Dengan demikian, penggabungan WEO dan RHA dalam satu sistem *rejuvenator* komposit memungkinkan tercapainya keseimbangan antara pelunakan (*softening*) oleh WEO dan penstabilan fisik (*stiffening*) oleh RHA pada *binder*

RAP, alih-alih hanya mengandalkan salah satu efek saja sebagaimana terjadi pada penggunaan WEO secara tunggal.

Penelitian ini tidak menyertakan variasi kadar WEO tanpa RHA sebagai kelompok pembanding, sehingga kontribusi spesifik RHA terhadap perbaikan IKS tidak dapat diisolasi secara empiris dari efek WEO itu sendiri. Seluruh mekanisme sinergi RHA-WEO yang diuraikan merupakan rasionalisasi teoretis berdasarkan literatur mengenai fungsi masing-masing komponen secara terpisah, sedangkan hasil pengujian Marshall dan IKS dalam penelitian ini merepresentasikan kinerja sistem komposit secara keseluruhan pada setiap kadar WEO yang diuji.

2.6.2. Mekanisme Kerja *Rejuvenator* Komposit pada *Binder* RAP

Pada metode *dry mix*, *rejuvenator* komposit RHA-WEO dicampurkan langsung ke permukaan RAP dalam kondisi panas. WEO yang berviskositas rendah lebih dahulu membasahi dan berdifusi ke permukaan *binder* RAP, sementara partikel RHA kemudian berinteraksi dengan *binder* yang telah dilunakkan, memberikan efek pengisian mikro sekaligus hambatan fisik terhadap oksidasi lanjutan (Bhatt & Wu, 2025a; Y. Li et al., 2022). Pemilihan *dry mix* dibandingkan *wet mix* memiliki relevansi praktis tinggi karena lebih merepresentasikan kondisi AMP aktual dan menghindari perubahan sifat *binder* akibat ekstraksi-*recovery* (Han et al., 2022; Tang et al., 2021).

2.6.3. Variasi Kadar *Rejuvenator* Komposit yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan variasi kadar *rejuvenator* komposit sebesar (0%, 2%, 4%, 6%) terhadap berat aspal RAP, dengan RHA dikunci pada 2%, sehingga variabel yang divariasikan murni adalah kadar WEO. Rentang ini selaras dengan kadar optimum yang dilaporkan pada berbagai penelitian terdahulu, yaitu 3-4% pada WEO (Abd Ali et al., 2024b), 4% pada *rejuvenator* berbasis minyak secara umum (Jiang et al., 2023), dan 1-6% pada *rejuvenator M-oil* (Pradhan, 2023).

Pemilihan kadar RHA 2% sebagai kadar tetap didasarkan pada dua pertimbangan literatur yang saling melengkapi, mengingat belum ditemukan

penelitian yang secara spesifik merekomendasikan kadar 2% sebagai kadar optimum RHA dalam konteks komposit dengan *rejuvenator* berbasis minyak.

Pertimbangan pertama datang dari literatur mengenai aditif berbasis silika pada *binder* aspal. Berbeda dari pendekatan RHA sebagai *filler* yang mengukur kadar terhadap berat agregat/*filler* (sehingga angkanya besar, mencapai 50-100% substitusi), pendekatan RHA sebagai aditif langsung ke *binder* mengukur kadar terhadap berat *binder*, sebagaimana cara penghitungan kadar RHA dalam penelitian ini. Dalam konteks ini, rentang uji 2-8% lazim digunakan pada aditif berbasis silika, dan penelitian yang mengevaluasi nano-silika pada rentang 2-8% dengan interval 2% menemukan bahwa efek *stiffening* sudah terdeteksi bahkan pada kadar terendah 2%, ditandai dengan penurunan penetrasi dan peningkatan titik lembek dibandingkan *binder* murni, meskipun peningkatan optimal umumnya ditemukan pada kadar yang lebih tinggi (Mashaan, 2022). Kandungan silika tinggi pada RHA menjadikannya analog dengan aditif berbasis silika tersebut, sehingga kadar 2% dipilih sebagai titik yang secara literatur telah menunjukkan efek *stiffening* terukur.

Pertimbangan kedua datang dari pola dosis yang lazim digunakan pada penelitian *rejuvenator* berbasis minyak. Penelitian yang mengevaluasi bio-oil pada kadar (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5%) terhadap *binder* teroksidasi menemukan bahwa kadar 2% sudah cukup untuk mendeteksi perubahan terukur pada koefisien difusi dan modulus geser kompleks *binder*, mengindikasikan bahwa kadar tersebut merupakan titik dosis rendah standar yang lazim digunakan untuk mendeteksi efek awal suatu bahan tambah pada *binder* (Zhang et al., 2021). Pola ini konsisten dengan tujuan penelitian ini yang mengevaluasi tren pengaruh kadar WEO secara bertahap terhadap sistem komposit, bukan mencari kadar RHA optimum secara terpisah.

Perlu dicatat bahwa penelitian yang secara konsep paling mendekati sistem komposit *oil*-RHA dalam penelitian ini, yaitu studi mengenai *castor oil* dan RHA sebagai bio-bitumen termodifikasi, justru menemukan bahwa pada kadar RHA rendah (2% dan 4%), efek *stiffening* RHA belum cukup untuk mengimbangi pelunakan signifikan yang disebabkan oleh minyak, dengan kadar optimum RHA berdasarkan model *Response Surface Methodology* berada di sekitar 6% (Kumar &

Suman, 2025). Temuan ini menjadi pertimbangan penting bagi penelitian ini. Kadar RHA 2% dipilih secara sengaja sebagai kadar konservatif atau rendah, bukan sebagai klaim kadar optimum, dengan tujuan agar RHA berperan sebagai penstabil ringan yang tidak mendominasi sistem komposit, sehingga pengaruh variasi kadar WEO terhadap Marshall dan IKS dapat dievaluasi secara lebih sensitif tanpa tertutupi oleh efek *stiffening* RHA yang berlebihan. Konsekuensinya, apabila hasil IKS pada penelitian ini belum mencapai ambang yang disyaratkan, temuan tersebut akan konsisten dengan Kumar & Suman (2025) yang mengindikasikan RHA pada kadar rendah belum cukup mengimbangi pelunakan oleh minyak, dan menjadi dasar saran penelitian lanjutan untuk mengevaluasi kadar RHA yang lebih tinggi.

Perhitungan kadar WEO dan RHA dalam penelitian ini didasarkan pada persentase terhadap berat aspal lama (*aged binder*) yang terkandung dalam material RAP, bukan terhadap berat total aspal dalam campuran maupun berat total campuran secara keseluruhan. Pendekatan ini konsisten dengan metode yang digunakan pada penelitian *rejuvenator* RAP terdahulu, di mana dosis *rejuvenator* dihitung berdasarkan berat binder RAP yang akan diremajakan (Abd Ali et al., 2024a, 2024b; Jiang et al., 2023). Basis perhitungan ini dipilih karena fungsi utama *rejuvenator* adalah meremajakan binder yang telah mengalami oksidasi pada RAP secara spesifik, sehingga proporsi *rejuvenator* yang tepat perlu disesuaikan dengan jumlah binder tua yang benar-benar memerlukan peremajaan, bukan terhadap keseluruhan sistem aspal dalam campuran yang sebagian besar terdiri dari aspal baru yang belum mengalami oksidasi. Berikut rincian variasi kadar *rejuvenator* komposit pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Variasi Kadar *Rejuvenator* Komposit

No.	Kode Benda Uji	Kadar RHA	Kadar WEO
1.	RHA 0 - WEO 0	0%	0%
2.	RHA 2 - WEO 2	2%	2%
3.	RHA 2 - WEO 4	2%	4%
4.	RHA 2 - WEO 6	2%	6%

2.7 Karakteristik Marshall Campuran Beraspal

2.7.1. Parameter Uji Marshall

Pengujian Marshall mengevaluasi karakteristik dasar campuran beraspal panas, mencakup stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFB, mengacu pada SNI 2489:2018 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Metode Marshall tetap menjadi metode paling banyak digunakan secara global karena kesederhanaan dan efektivitas biayanya, meskipun bersifat empiris (Jatoi et al, 2025). Pada campuran AC-WC berbasis RAP dengan *rejuvenator* komposit, kelima parameter tersebut memiliki keterkaitan kompleks dengan kadar WEO dan RHA, di mana WEO cenderung menurunkan stabilitas namun meningkatkan *flow*, sementara RHA berpotensi menurunkan VIM dan VMA akibat pengisian rongga mikro (Le et al., 2024).

2.7.2. Kadar Aspal Optimum (KAO)

KAO adalah kadar aspal yang memberikan kombinasi terbaik seluruh parameter Marshall (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Studi perbandingan metode Marshall dan *Balanced Mix Design* menemukan bahwa nilai KAO dapat berbeda signifikan antarmetode, dengan parameter VMA/VFB tetap menjadi kriteria wajib terlepas dari metode yang digunakan (Le et al., 2024). Penentuan KAO menjadi tahapan awal sebelum campuran dengan *rejuvenator* komposit dievaluasi lebih lanjut, mengingat variasi kadar *rejuvenator* berpotensi menggeser rentang KAO (Al-ammari et al., 2025).

2.7.3. Kriteria Marshall menurut Spesifikasi Umum 2025 dan Spesifikasi Khusus Interim Seksi SKh-1.6.27

Kriteria penerimaan parameter Marshall untuk campuran Laston (AC), termasuk AC-WC (Laston Lapis Aus) dan AC-WC RAP, ditetapkan dalam Spesifikasi Umum 2025 dan Spesifikasi Khusus Interim Seksi SKh-1.6.27 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC)

Sifat-sifat Campuran	Persyaratan AC-WC
Jumlah tumbukan per bidang	75
VIM (%)	3.0 – 5.0
VMA (%)	Min. 15
VFB (%)	65 – 75
Stabilitas Marshall (kg)	Min. 800
<i>Flow</i>	2 – 4
IKS	Min. 90

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025

Tabel 2. 7 Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC) RAP

Sifat-sifat Campuran	Persyaratan AC-WC
Jumlah tumbukan per bidang	75
VIM (%)	3.0 – 5.0
VMA (%)	Min. 14
VFB (%)	Min. 65
Stabilitas Marshall (kg)	Min. 1000
<i>Flow</i>	2 – 4
IKS	Min. 90

Sumber: Spesifikasi Khusus Interim SKh -1.6.27

Seluruh parameter pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6 menjadi acuan utama dalam mengevaluasi kelayakan setiap variasi kadar *rejuvenator* komposit RHA dan WEO (0%, 2%, 4%, 6%) yang diterapkan pada campuran AC-WC berbasis RAP 20% dalam penelitian ini, khususnya parameter stabilitas dan *flow* yang secara langsung merepresentasikan pengaruh pelunakan oleh WEO dan penstabilan oleh RHA terhadap kinerja mekanis campuran.

2.8 Durabilitas Campuran Beraspal

2.8.1. Konsep Durabilitas dan Faktor yang Mempengaruhinya

Durabilitas campuran beraspal adalah kemampuan campuran mempertahankan kinerjanya selama umur rencana meskipun terpapar air, suhu, dan beban lalu lintas berulang. *Moisture susceptibility* menjadi faktor dominan yang berpengaruh terhadap durabilitas, yakni kecenderungan campuran kehilangan kekuatannya akibat proses *stripping*, lepasnya lapisan film aspal dari permukaan agregat karena air berhasil menembus antarmuka aspal-agregat (Mehmood et al., 2024). Fenomena ini menjadi perhatian utama pada penelitian ini mengingat WEO berpotensi meningkatkan *moisture susceptibility* campuran (Mehmood et al., 2024), sementara RHA secara literatur menunjukkan potensi memperbaiki ketahanan terhadap fenomena tersebut ketika digunakan sebagai *filler* atau pengganti *anti-stripping agent* (Mistry et al., 2023). Tinjauan sistematis Marshall dan *Superpave* menegaskan bahwa durabilitas jangka panjang menjadi kelemahan utama Marshall konvensional, sehingga pengujian IKS tetap diperlukan sebagai pelengkap (Jatoi et al., 2025).

2.8.2. Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sebagai Parameter Durabilitas

Berdasarkan Spesifikasi Umum 2025, IKS didefinisikan sebagai persentase perbandingan antara stabilitas Marshall benda uji yang direndam 24 jam pada suhu 60°C dengan stabilitas standar yang perendamannya hanya berlangsung 30-40 menit sesuai dengan SNI 2489:2018 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Pengujian ini krusial mengingat kelemahan WEO terkait kelembapan (Mehmood et al., 2024) dan potensi RHA mengompensasinya melalui fungsi antioksidan (Y. Li et al., 2022).

2.8.3. Kriteria Nilai Minimum IKS

Spesifikasi Umum 2025 mensyaratkan nilai minimum Stabilitas Marshall Sisa (IKS) sebesar 90% untuk seluruh jenis campuran Laston (AC), termasuk AC-WC (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025). Kriteria ini tergolong ketat dibandingkan sejumlah standar internasional yang umumnya mensyaratkan nilai *Tensile Strength*

Ratio (TSR) minimum 80% (Mehmood et al., 2024), sehingga campuran AC-WC berbasis RAP dengan *rejuvenator* komposit RHA dan WEO dalam penelitian ini dituntut untuk memenuhi ambang durabilitas yang relatif tinggi agar dapat diterima sesuai standar teknis Bina Marga.

2.9 Analisis Biaya Campuran Beraspal

2.9.1. Komponen Biaya Produksi Campuran AC-WC

Biaya produksi campuran AC-WC secara umum dihitung menggunakan pendekatan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2023). Komponen biaya material umumnya mendominasi total biaya produksi campuran beraspal, mengingat harga aspal dan agregat yang terus berfluktuasi (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2023). Pada campuran AC-WC berbasis RAP, komponen biaya material mengalami perubahan proporsi dibandingkan campuran konvensional, sebab kebutuhan agregat baru dan aspal baru berkurang secara proporsional terhadap kadar RAP, namun timbul komponen biaya tambahan berupa biaya pengolahan RAP serta biaya bahan *rejuvenator* komposit WEO dan RHA (Abdelrahman et al., 2024).

2.9.2. Perbandingan Biaya Campuran Konvensional dan Campuran Berbasis RAP

Perbandingan biaya antara campuran AC-WC konvensional dan campuran berbasis RAP dilakukan dengan menghitung Rencana Anggaran Biaya (RAB) kedua jenis campuran menggunakan metode AHSP yang sama, kemudian membandingkan total biaya per satuan volume yang dihasilkan. Pemanfaatan RAP berpotensi menghasilkan penghematan biaya material signifikan (Abdelrahman et al., 2024), namun penghematan bersih (*net saving*) perlu memperhitungkan biaya pengolahan RAP dan bahan *rejuvenator* komposit, sehingga besarnya penghematan sebenarnya hanya dapat diketahui melalui perhitungan RAB yang komprehensif dan spesifik terhadap kondisi harga satuan di lokasi penelitian. Dalam penelitian ini, perbandingan biaya dihitung berdasarkan harga satuan dasar material dan peralatan

yang berlaku di lokasi penelitian, mengacu pada format AHSP Bina Marga sesuai Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023 (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2023), pada kadar WEO optimum hasil pengujian Marshall dan IKS.

2.10 Penelitian Terdahulu

Setelah konsep dan mekanisme masing-masing komponen penelitian diuraikan pada sub-bab 2.1 hingga 2.9, berikut Tabel 2.8 sampai Tabel 2.12 merangkum penelitian-penelitian terdahulu secara komparatif dari segi metode dan hasil, sebagai dasar untuk mengidentifikasi gap penelitian pada sub-bab berikutnya.

Tabel 2. 8 Penelitian Terkait RAP

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1.	Han et al. (2022)	Mekanisme <i>rejuvenator</i> (review mikroskopik)	AFM, mikroskopi	-	Ekstraksi- <i>recovery</i> ubah sifat asli <i>binder</i>	Justifikasi <i>dry mix</i> tanpa ekstraksi
2.	Jiang et al. (2023)	<i>Rejuvenator</i> berbasis minyak pada RAP	Marshall, AFM mikrostruktur	4%	RAP 30% optimal; <i>co-heating</i> perbaiki <i>rutting & moisture resistance</i>	Kerangka dosis <i>rejuvenator</i>
3.	Refaat et al. (2024)	RAP + WEO	Analisis biaya & kinerja	-	RAP+WEO tekan biaya produksi signifikan	Konteks manfaat ekonomis RAP

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
4.	Abd Ali et al. (2024a)	WEO pada RAP	Marshall, penetrasi, titik lembek	WEO 3-4%	Penetrasi kembali mendekati <i>binder</i> baru; stabilitas Marshall naik pada RAP 20%	Dasar rentang kadar WEO
5.	Abd Ali et al. (2024b)	WEO pada RAP	Marshall, ketahanan <i>stripping</i>	WEO 3-4%	Ketahanan <i>stripping</i> naik 62%	Acuan pengaruh WEO terhadap durabilitas

Tabel 2. 9 Penelitian Terkait WEO dan Rejuvenator Berbasis Minyak

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1.	Zhang et al. (2021)	Bio-oil pada <i>binder</i> teroksidasi	Koefisien difusi, modulus geser kompleks (DSR)	0-5% (interval 1%)	Perubahan terukur sudah terdeteksi sejak kadar 2%	Dasar pola dosis rendah standar pada <i>rejuvenator</i> berbasis minyak

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
2.	Jiao et al. (2022)	<i>Rejuvenator</i> + antioksidan + <i>light stabilizer</i> (fase cair)	DSR, BBR, FTIR, AFM	Antioksidan 0,6%; <i>light stabilizer</i> 0,4%	Perbaiki reologi suhu tinggi-rendah, adhesi aspal-agregat	Pembandingan metode <i>wet-mix</i> kimiawi dan <i>dry-mix</i> mineral
3.	Mehmood et al. (2024)	WEO (review)	Tinjauan literatur	3-4%	WEO turunkan TSR & <i>fatigue life</i> pada kadar tinggi	Dasar gap teknis WEO
4.	Bhatt & Wu (2025)	Review <i>rejuvenator</i> (<i>wet, dry, encapsulation</i>)	Tinjauan literatur	-	Metode <i>dry mix</i> lebih representatif kondisi AMP	Dasar pemilihan metode <i>dry mix</i>

Tabel 2. 10 Penelitian Terkait RHA

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1.	Jaya et al. (2022)	Nano-silika pada <i>binder</i> C320	Penetrasi, titik lembek, DSR	2-8% (interval 2%)	Efek <i>stiffening</i> terdeteksi sejak kadar 2%; optimal pada kadar lebih tinggi	Dasar justifikasi kadar RHA 2% sebagai titik dosis rendah yang tetap berefek terukur (pendekatan aditif silika, bukan <i>filler</i>)
2.	Li et al. (2022)	RHA + <i>crumb rubber powder</i>	<i>Aging Index Ratio</i> , SEM	-	RHA turunkan indeks penuaan; berfungsi <i>filler</i> & antioksidan	Dasar teori RHA sebagai penstabil fisik
3.	Mistry et al. (2023)	RHA pengganti <i>hydrated lime</i>	Marshall, dispersi optik	RHA 4%	Stabilitas naik 25,67%; OBC turun 5,95%	Dasar RHA berpotensi menggantikan fungsi <i>anti-stripping</i>
4.	Deb & Singh (2023)	RHA + <i>fly ash</i> pada <i>cold mix asphalt</i>	ITS, <i>moisture susceptibility</i>	RHA 5%	ITS naik; <i>moisture susceptibility</i> membaik	Bukti fungsi pozzolanik RHA terhadap ketahanan kelembapan

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
5.	Abdelmagid et al. (2023)	RHA pada <i>binder</i> aspal	Penetrasi, titik lembek, viskositas, daktilitas, stabilitas penyimpanan	-	Perbaikan indeks kinerja suhu <i>binder</i>	Dasar pengaruh RHA terhadap ketahanan <i>binder</i> terhadap lingkungan
6.	Endale et al. (2023)	RHA (<i>review</i> karakterisasi)	XRF, luas permukaan spesifik	-	Silika 85-90%, luas permukaan 30-80 m ² /g	Dasar karakterisasi fisik-kimia RHA
7.	Rikambura et al. (2024)	CKD-RHA komposit <i>filler</i> pada RAP 30%	Marshall, rutting, retak, <i>moisture susceptibility</i>	CKD:RHA 75:25	Stabilitas, rutting, retak, dan <i>moisture susceptibility</i> membaik	Bukti paling relevan: RHA pada konteks campuran RAP
8.	Zuhad et al. (2025)	RHA + arang kayu pada AC-WC	Marshall	-	RHA pengaruhi parameter Marshall AC-WC	Acuan lokal pemanfaatan RHA

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
9.	Ramadhani et al. (2025)	RHA sebagai pengganti abu batu pada AC-WC lateks	Marshall, <i>stiffness modulus</i> , XRF	Substitusi RHA 100%	Stabilitas naik 27-52%; XRF SiO ₂ 91,5%	Bukti empiris fungsi <i>filler</i> RHA
10.	Pratiwi et al. (2025)	Tinjauan sistematis RHA, BA, PSA (72 studi, 2010-2024)	Marshall (stabilitas, <i>flow</i> , VIM, VMA, VFB, MQ)	RHA 6-8%	RHA konsisten perbaiki stabilitas dan kekakuan	Konfirmasi rentang dosis optimum RHA secara umum
11.	Kumar & Suman (2025)	Castor <i>oil</i> + RHA (bio-bitumen komposit)	Marshall, ITS, TSR, Cantabro, RSM	RHA 6%; castor <i>oil</i> 8,99%	RHA 2% dan 4% belum cukup mengimbangi pelunakan <i>oil</i> ; optimal di 6%	Dasar bahwa kadar RHA 2% dalam penelitian ini bersifat konservatif/rendah, bukan klaim optimum; menjadi pembanding jika hasil IKS belum optimal

Tabel 2. 11 Penelitian Terkait Metode Marshall dan IKS

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1.	Le et al. (2024)	Marshall dan <i>Balanced Mix Design</i>	Marshall, kinerja retak	-	KAO berbeda signifikan antarmetode	Dasar prosedur penentuan KAO
2.	Jatoi et al. (2025)	Marshall dan <i>Superpave (review)</i>	Tinjauan literatur	-	Marshall relevan namun perlu uji durabilitas tambahan	Justifikasi Marshall + IKS

Tabel 2. 12 Penelitian Terkait Agregat Pendukung

No.	Peneliti (Tahun)	Bahan/Metode yang Dikaji	Jenis Pengujian	Dosis Optimum	Hasil Kinerja Utama	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1.	Arrahman et al. (2025)	Abu batu sebagai <i>filler</i> AC-WC	Marshall	-	Abu batu naikan stabilitas dibanding pasir alam	Dasar pemilihan abu batu sebagai agregat halus

Dapat dilihat dari Tabel 2.8 sampai 2.12, bahwa variasi hasil penelitian terdahulu bergantung pada jenis bahan, metode pencampuran, dan parameter pengujian yang digunakan, sehingga perbandingan antar penelitian perlu memperhatikan konteks metodologis masing-masing. Kajian yang secara khusus menggabungkan RHA dan WEO sebagai satu sistem *rejuvenator* komposit dengan metode *dry mix*, dievaluasi dari sisi Marshall dan IKS pada campuran AC-WC berbasis RAP 20% menjadi dasar gap penelitian ini.

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah diuraikan, berbagai teori, penelitian terdahulu, serta ketentuan dan standar yang relevan menjadi dasar dalam menentukan tahapan penelitian. Tinjauan pustaka digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik bahan, menentukan komposisi campuran, menetapkan variasi kadar WEO dan RHA, serta menentukan metode pengujian dan parameter yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja campuran. Keterkaitan antara hasil kajian pustaka dengan tahapan penelitian yang dilakukan disajikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 13 Keterkaitan Tinjauan Pustaka dengan Tahapan Penelitian

Tahapan pada Flowchart Penelitian	Sub-bab Rujukan Teori
Persiapan dan pengujian karakteristik agregat, aspal	2.2 Material Penyusun Campuran AC-WC
Karakterisasi RAP (ekstraksi, berat jenis)	2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
Pembuatan rejuvenator komposit dan metode dry mix	2.4 Bahan Peremaja (Rejuvenator) pada Campuran RAP
Karakterisasi RHA (XRF)	2.5 Rice Husk Ash (RHA)
Penetapan variasi kadar rejuvenator komposit	2.6 Rejuvenator Komposit WEO dan RHA
Penentuan KAO dan pengujian Marshall	2.7 Karakteristik Marshall Campuran Beraspal
Pengujian IKS	2.8 Durabilitas Campuran Beraspal
Analisis perbandingan biaya	2.9 Analisis Biaya Campuran Beraspal