

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

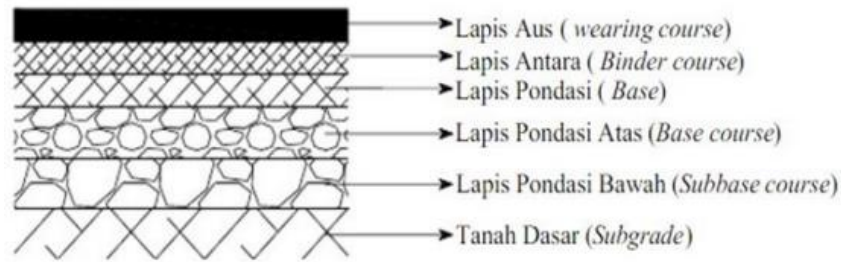
#### **2.1 Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)**

Perkerasan lentur merupakan jenis konstruksi perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama pada campurannya. Sistem perkerasan ini dirancang agar setiap lapisan mampu menerima, mendistribusikan, dan meneruskan beban lalu lintas secara bertahap ke lapisan yang berada di bawahnya hingga mencapai tanah dasar. Struktur perkerasan lentur umumnya tersusun atas lapis permukaan (*surface course*), lapis pondasi atas (*base course*), lapis pondasi bawah (*subbase course*), dan tanah dasar (*subgrade*) yang bekerja secara terpadu dalam mendukung kinerja perkerasan jalan (Setyawan et al., 2023).

Aspal yang digunakan sebagai bahan pengikat merupakan material hidrokarbon berwarna hitam hingga cokelat gelap dengan karakteristik fisik yang bervariasi dari semi padat hingga padat pada suhu ruang. Dalam campuran perkerasan, aspal berfungsi untuk mengikat butiran agregat sehingga membentuk lapisan yang stabil, kedap air, dan mampu menahan pengaruh beban lalu lintas. Oleh karena itu, selain agregat, aspal menjadi salah satu komponen utama yang sangat menentukan kualitas dan kinerja campuran perkerasan jalan (Sistra et al., 2016).

Perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan material granular dan aspal yang bersifat elastis dan menyebarkan beban secara bertahap ke lapisan di bawahnya (Lijuwardi & S, 2020). Struktur ini mampu mengikuti deformasi tanah dasar, dengan permukaan yang umumnya menggunakan aspal beton. Berikut karakteristik utama dari perkerasan lentur ialah:

1. Fleksibel terhadap deformasi permukaan.
2. Beban diteruskan ke lapisan bawah secara bertahap melalui distribusi tegangan.
3. Umur rencana biasanya 15-20 tahun, tergantung pemeliharaan.
4. Rentan terhadap suhu tinggi dan oksidasi aspal.
5. Perbaikan relatif mudah dengan *overlay*.



**Gambar 2. 1** Lapisan Perkerasan Jalan Lentur  
(Sumber: Sukirman (2003))

## 2.2 Lapis Aspal Beton

Aspal beton (*asphalt concrete*) merupakan campuran beraspal panas yang terdiri atas agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), serta aspal sebagai bahan pengikat. Seluruh material tersebut dicampurkan dalam komposisi tertentu pada temperatur tinggi sehingga aspal dapat melapisi permukaan agregat secara merata. Setelah proses pencampuran, campuran dihamparkan dan dipadatkan pada suhu yang telah ditentukan untuk membentuk lapisan perkerasan yang memiliki kekuatan struktural yang baik serta mampu menahan beban lalu lintas secara efektif (Raharjo et al., 2016).

Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025, campuran aspal beton (*Asphalt Concrete/AC*) dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan posisi dan fungsinya dalam struktur perkerasan jalan, yaitu lapis aus (*Asphalt Concrete-Wearing Course* atau *AC-WC*), lapis pengikat (*Asphalt Concrete-Binder Course* atau *AC-BC*), dan lapis pondasi (*Asphalt Concrete-Base* atau *AC-Base*). Masing-masing lapisan memiliki fungsi dan ketentuan ketebalan yang berbeda, yaitu sebagai berikut:

Berdasarkan fungsinya lapis aspal beton mempunyai 3 macam campuran yaitu:

- a. *AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course)* merupakan lapisan paling atas yang berhubungan langsung dengan lalu lintas dan kondisi lingkungan. Lapisan ini berfungsi sebagai lapis aus yang menerima tekanan roda kendaraan, gaya geser, serta pengaruh cuaca, sekaligus memberikan perlindungan terhadap masuknya air ke dalam struktur perkerasan. Ketebalan minimum lapisan *AC-WC* adalah 4 cm.
- b. *AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course)* merupakan lapisan pengikat yang

berada di antara lapis aus (AC-WC) dan lapis pondasi (AC-Base). Lapisan ini berperan dalam mendistribusikan beban kendaraan dari lapisan permukaan ke lapisan di bawahnya sehingga dapat meningkatkan kinerja struktur perkerasan. Ketebalan minimum AC-BC ditetapkan sebesar 6 cm.

- c. AC-Base (*Asphalt Concrete-Base*) merupakan lapisan pondasi beraspal yang terletak di bawah lapis pengikat. Lapisan ini berfungsi sebagai penopang utama struktur perkerasan dan umumnya digunakan pada pekerjaan pembangunan, peningkatan, maupun rehabilitasi jalan. Ketebalan minimum yang disyaratkan untuk lapisan AC-Base adalah 7,5 cm.

### 2.2.1 Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC)

Pada struktur perkerasan lentur, *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) adalah struktur yang berada pada lapisan terluar yang secara langsung menerima pengaruh beban kendaraan dan kondisi lingkungan. Lapisan ini berfungsi untuk melindungi lapisan di bawahnya sekaligus menyediakan permukaan jalan yang nyaman dan aman bagi pengguna jalan. Oleh karena itu, AC-WC harus memiliki ketahanan yang baik terhadap keausan, perubahan cuaca, dan gaya gesek akibat lalu lintas. Berdasarkan ketentuan yang berlaku, lapisan AC-WC direncanakan dengan ketebalan nominal paling sedikit 4 cm. Karakteristik campuran ini umumnya menghasilkan permukaan yang lebih rapat dan rata dibandingkan lapisan aspal beton lainnya, namun tetap mampu memberikan tingkat kekesatan yang memadai. Persyaratan teknis dan karakteristik campuran AC-WC selengkapnya disajikan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Laston AC-WC

Sifat-sifat Campuran		Laston			
		Lapis Aus (AC-WC)		Lapis Antara (AC-BC)	Lapis Fondasi (AC-Base)
Jumlah tumbukan yang dibutuhkan		50	75	75	112
Rasio partikel yang lolos ayakan 0,075 mm dengan kandungan aspal efektif	Min.	0,6			
	Maks.	1,6			

Rongga dalam campuran (%) <sup>(4)</sup>	Min	3,0			
	Maks.	5,0			
Rongga dalam agregat (VMA) (%)	Min.	15	14	13	
Rongga terisi aspal (%)	Min.	65	65	65	65
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min.	550	800	800	1800
<i>Flow</i> (mm)	Min.	2	2	3	
	Maks.	4	4	6	
Stabilitas <i>Marshall</i> sisa (%) setelah dilakukan perendaman selama 24 jam pada 60 °C <sup>(5)</sup>	Min.	90			
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal <sup>(6)</sup>	Min.	-	2	2	2

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3

### 2.2.2 Bahan Penyusun *Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC)*

Dalam pembuatan lapis perkerasan beraspal, diperlukan beberapa jenis material yang saling mendukung untuk menghasilkan campuran dengan karakteristik yang sesuai kebutuhan. Material tersebut terdiri atas aspal sebagai bahan pengikat, agregat berukuran kasar, agregat berukuran halus, pasir, dan bahan pengisi (filler). Sebelum dimanfaatkan dalam proses produksi campuran, seluruh material harus terlebih dahulu dievaluasi melalui pengujian laboratorium guna mengetahui kesesuaiannya terhadap persyaratan teknis yang berlaku. Tahapan ini penting untuk memastikan bahwa material yang digunakan mampu memberikan kinerja perkerasan yang baik dari segi kekuatan, stabilitas, maupun ketahanan selama masa pelayanan., berikut adalah bahan penyusun lapis aspal beton.

#### 1. Aspal

Aspal merupakan material perekat/cementitious yang berwarna hitam sampai coklat tua yang pada temperatur ruang berbentuk padat sampai semi padat. Secara kimia, aspal mengandung campuran senyawa hidrokarbon serta unsur heteroatom seperti sulfur, oksigen, dan nitrogen. Sifat kimia aspal sangat dipengaruhi oleh

unsur-unsur penyusunnya, yang pada akhirnya menentukan karakteristik dan performa aspal sebagai bahan pengikat dalam perkerasan jalan. Pada campuran beraspal, penggunaan aspal umumnya berkisar antara 4–10% dari berat total campuran, sedangkan berdasarkan volume campuran nilainya berada pada rentang 10–15%. Besaran tersebut dipilih untuk menghasilkan campuran yang mampu memenuhi persyaratan kinerja sesuai kebutuhan perkerasan (Pipintakos et al., 2024).

Aspal dapat dibedakan berdasarkan cara mendapatkannya dengan aspal alam dan aspal buatan. Aspal alam adalah aspal yang diperoleh dari alam, seperti aspal danau di Trinidad dan aspal gunung di Pulau Buton. Sedangkan aspal buatan adalah aspal yang diperoleh dari proses destilasi minyak bumi dan batu bara (Miswanto et al., 2023). Fungsi aspal adalah untuk bahan pengikat aspal dan agregat atau antara aspal sendiri, juga sebagai pengisi rongga pada agregat. Aspal padat dengan penentrasi 60/70 akan mengeras pada suhu ruangan dan mencair jika dipanaskan untuk jalanan yang volume lalu lintasnya sedang atau tinggi, dan daerah yang memiliki iklim panas. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 pada spesifikasi aspal pada Tabel 2.2

**Tabel 2. 2** Spesifikasi Aspal

No.	Sifat-Sifat	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60/70
1	Penetrasi pada 25°C (0,1mm)	SNI 2456:2011	60-70
2	Temperatur yang menghasilkan geser dinamis ( $G^*/\sin\delta$ ) pada osilasi 10 rad/detik $\geq 1,0$ kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-
3	Viskositas Kinematis 135°C (cSt) <sup>(3)</sup>	SNI 7729:2011	$\geq 300$
4	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	$\geq 48$
5	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	$\geq 100$
6	Titik nyala (°C)	SNI 2433:2011	$\geq 232$
7	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	SNI 2438:2015	$\geq 99$

No.	Sifat-Sifat	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60/70
8	Berat jenis	SNI 2441:2011	$\geq 1,0$
9	Stabilitas penyimpanan: perbedaan titik leleh ( $^{\circ}\text{C}$ )	ASTM D7173-20 dan SNI 2434:2011	-
10	Kadar parafin lilin (%)	SNI 03-3639-2002	$\leq 2$
	Pengujian residu hasil TFOT (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)		
11	Penurunan berat TFOT (%)	SNI 06-2440-1991	$\leq 0,8$
13	Penetrasi pada $25^{\circ}\text{C}$ (% semula)	SNI 2456:2011	$\geq 54$
14	Daktilitas pada $25^{\circ}\text{C}$ (cm)	SNI 2432:2011	$\geq 50$
	Residu aspal segar setelah PAV (SNI 03-6837-2002) pada temperatur $100^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 2,1 Mpa		
15	Temperatur yang menghasilkan geser dinamis ( $G^*/\sin \delta$ ) pada osilasi 10 rad/detik 5000 kPa setelah PAV	SNI 06-6442-2000	-

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3

## 2. Agregat

Agregat merupakan material utama dalam campuran perkerasan jalan karena proporsinya paling besar dibandingkan bahan lainnya. Pada campuran beraspal panas, agregat umumnya mencakup sekitar 90–95% dari berat total campuran atau sekitar 75–85% dari volume campuran, sedangkan sisanya berupa aspal dan bahan pengisi (*filler*). Karena komposisinya dominan, sifat fisik agregat seperti ukuran butir, gradasi, bentuk, porositas, tekstur permukaan, kekerasan, dan daya lekat terhadap aspal sangat memengaruhi mutu serta kinerja campuran beraspal (Korompis et al., 2015). Berikut persyaratan agregat kasar, halus dan *filler* yang harus dipenuhi:

### a. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah agregat dengan rancangan campuran tertahan ayakan

No.4 (4,75 mm) dengan syarat agregat kasar harus bersih, keras, awet, dan bebas dari bahan lainnya yang bisa menurunkan kualitas agregat. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 pada Tabel 2.3.

**Tabel 2. 3** Karakteristik Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Unit	Persyaratan	Standar yang digunakan
1	Berat Jenis Agregat Kasar	-	Min.2,5	SNI 1969-2016
2	Penyerapan Agregat Kasar	%	Maks.3	SNI 1969-2016
3	Material Lolos Ayakan No.200	%	Maks.1	SNI ASTM C117:2012
4	Keausan Agregat Ayakan	%	Maks.40	SNI 2417-2008

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3

b. Agregat Halus

Agregat Halus adalah agregat yang pengayakan batu pecah dan lolos ayakan No.4 (4,75 mm), dan tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm). Fungsi utama untuk mendukung stabilitas dan mengurangi deformasi permanen dari campuran melalui ikatan dan gesekan antara partikel. berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 pada Tabel 2.4.

**Tabel 2. 4** Karakteristik Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Unit	Persyaratan	Standar yang digunakan
1	Berat Jenis Agregat Halus	-	Min.2,5	SNI 1970-2016
2	Penyerapan Agregat Halus	%	Maks.3	SNI 03-1970-2016
3	Material Lolos Ayakan No.200	%	Maks.10	SNI ASTM C117:2012

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3

c. Gradasi Agregat

Distribusi ukuran partikel agregat dalam suatu campuran dikenal sebagai gradasi agregat. Karakteristik gradasi diperoleh melalui pengujian analisis saringan (*sieve analysis*), yaitu metode yang digunakan untuk mengetahui proporsi butiran agregat pada berbagai ukuran. Dalam pengujian tersebut,

agregat dilewatkan melalui serangkaian saringan dengan ukuran saringan yang berbeda sehingga dapat diketahui jumlah material yang lolos maupun tertahan pada setiap saringan. Hasil analisis kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase berat terhadap total sampel yang diuji. Gradasi agregat menjadi salah satu parameter penting karena berpengaruh terhadap kepadatan, stabilitas, dan kinerja campuran beraspal. Persyaratan gradasi agregat yang digunakan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025 Divisi 6 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.5.

**Tabel 2. 5** Amplop Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran Beraspal

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos terhadap Agregat		
		Laston (AC)		
ASTM	(mm)	WC	BC	Base
1 ½"	37,5			100
1 "	25		100	90-100
¾"	19	100	90-100	81-92
½"	12,5	90-100	75-90	67-82
3/8"	9,5	77-90	66-82	59-75
No.4	4,75	53-69	46-64	41-59
No.8	2,36	33-53	30-49	28-45
No.16	1,18	21-40	18-38	18-34
No.30	0,600	14-30	12-28	11-25
No.50	0,300	9-22	7-20	6-18
No.100	0,25	6-15	5-13	4-12
No.200	0,075	4-9	4-8	3-7

*Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3*

d. Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) adalah material yang lolos saringan no.200 lebih dari 75% terhadap beratnya. Salah satu jenis yang biasa digunakan adalah semen. Fungsi bahan pengisi filter untuk mengurangi kepekaan terhadap temperatur serta mengurangi jumlah rongga udara dalam campuran. Spesifikasi persyaratan untuk bahan pengisi (*filler*) dapat dilihat pada Tabel 2.6

**Tabel 2. 6** Spesifikasi Bahan Pengisi (*Filler*)

No.	Jenis Pengujian	Unit	Persyaratan	Standar yang digunakan
1	Berat Jenis <i>Filler</i>	-	Min.1	SNI 15-2531- 1991
2	Lolos Ayakan No.200	%	$\geq 75\%$	SNI ASTM C136:2012

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Seksi 6.3

### 2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

RAP merupakan material hasil pembongkaran, pengerukan, atau pengupasan lapisan perkerasan beraspal lama yang masih mengandung agregat dan aspal sisa. Material ini dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan penyusun campuran perkerasan baru, baik sebagai pengganti sebagian agregat alam maupun sebagai sumber aspal lama yang masih dapat berkontribusi dalam campuran. Pemanfaatan RAP banyak diterapkan pada campuran beraspal panas (*hot mix asphalt*), campuran beraspal hangat (*warm mix asphalt*), campuran dingin (*cold mix asphalt*), serta teknologi daur ulang di lapangan. Penggunaan RAP dinilai mendukung konstruksi jalan berkelanjutan karena dapat mengurangi kebutuhan agregat baru, menekan penggunaan aspal baru, mengurangi limbah bongkaran perkerasan, serta menurunkan dampak lingkungan dan biaya konstruksi (Sukhija & Coleri, 2025). Gambar RAP dapat dilihat pada Gambar 2.2,



**Gambar 2. 2** Reclaimed Asphalt Pavement

Kelebihan utama penggunaan RAP adalah kemampuannya dalam menghemat penggunaan material baru. Karena RAP masih mengandung agregat dan aspal, kebutuhan terhadap agregat alam dan aspal baru dapat dikurangi. Selain itu, penggunaan RAP juga dapat menekan biaya produksi, mengurangi aktivitas

penambahan agregat, mengurangi limbah perkerasan lama, dan mendukung konsep pembangunan jalan ramah lingkungan. Dari sisi teknis, binder tua pada RAP yang lebih kaku dapat meningkatkan stabilitas campuran dan memperbaiki ketahanan terhadap deformasi permanen atau *rutting*, khususnya pada kondisi lalu lintas berat dan temperatur tinggi (Loprencipe et al., 2025).

Meskipun memiliki banyak manfaat, RAP juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Kekurangan utama RAP berkaitan dengan kondisi aspal tua yang telah mengalami oksidasi dan penuaan. Proses penuaan tersebut menyebabkan aspal menjadi lebih keras, lebih kaku, lebih rapuh, dan kehilangan sebagian sifat elastisnya. Jika RAP digunakan dalam kadar tinggi tanpa desain campuran yang tepat, campuran beraspal dapat menjadi terlalu kaku. Kondisi ini memang dapat meningkatkan ketahanan terhadap *rutting*, tetapi di sisi lain dapat menurunkan kemampuan campuran dalam menahan retak, terutama retak lelah (*fatigue cracking*) dan retak akibat perubahan temperatur (Sukhija & Coleri, 2025a).

Permasalahan *cracking* atau retak merupakan salah satu aspek paling penting dalam penggunaan RAP, terutama pada campuran dengan kadar RAP sedang hingga tinggi. Retak dapat terjadi ketika campuran beraspal tidak mampu menahan tegangan dan regangan berulang akibat beban kendaraan. Pada campuran RAP, keberadaan binder tua yang kaku membuat campuran menjadi kurang fleksibel, sehingga kemampuannya untuk meredam dan menyebarkan energi pembebanan menjadi lebih rendah. Akibatnya, retak mikro dapat terbentuk di dalam lapisan beraspal, kemudian berkembang menjadi retak yang lebih besar pada permukaan jalan. Kondisi ini dikenal sebagai retak lelah atau *fatigue cracking*, yaitu kerusakan akibat pembebanan berulang dalam jangka waktu lama (Sukhija & Coleri, 2025a).

Risiko retak pada campuran RAP juga dipengaruhi oleh tingkat pencampuran antara aspal lama dan aspal baru. Dalam praktiknya, tidak semua binder tua pada RAP selalu aktif dan bercampur sempurna dengan binder baru. Apabila pencampuran tidak merata, campuran dapat menjadi tidak homogen, sehingga terdapat bagian tertentu yang lebih kaku dibandingkan bagian lainnya. Bagian yang terlalu kaku tersebut dapat menjadi titik awal munculnya retak. Oleh karena itu,

temperatur pencampuran, lama pencampuran, urutan pencampuran, kadar RAP, serta tingkat aktivasi binder tua perlu dikendalikan agar campuran memiliki kinerja yang lebih seimbang. Penelitian tentang RAP juga menunjukkan bahwa metode desain yang mempertimbangkan aglomerasi RAP dan pencampuran parsial binder dapat meningkatkan ketahanan retak dan umur lelah campuran beraspal daur ulang (Sukhija & Coleri, 2025a).

Untuk mengurangi potensi retak pada campuran RAP, penggunaan bahan peremaja atau *rejuvenator* dapat menjadi salah satu solusi. *Rejuvenator* berfungsi memperbaiki sifat binder tua dengan menurunkan kekakuan, meningkatkan fleksibilitas, dan membantu mengembalikan sebagian kemampuan binder dalam merelaksasi tegangan. Dengan dosis yang tepat, *rejuvenator* dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap retak lelah. Namun, penggunaannya tetap harus dikontrol karena dosis yang berlebihan dapat membuat campuran terlalu lunak dan menurunkan ketahanan terhadap deformasi permanen atau *rutting*. Oleh sebab itu, penggunaan *rejuvenator* perlu disesuaikan dengan kadar RAP, karakteristik binder tua, dan target kinerja campuran (Verani & Sihombing, 2023).

RAP adalah limbah sisa perkerasan jalan yang telah rusak atau habis umur rencananya. Pada dasarnya RAP dapat dimanfaatkan kembali sebagai salah satu material dalam perkerasan jalan. RAP memiliki kendala dalam hal kualitas, untuk memenuhi kualitas dan spesifikasi dalam perkerasan jalan maka RAP digunakan dengan adanya penambahan agregat baru, aspal, ataupun zat aditif lainnya untuk mencapai kualitas yang diinginkan (Mega et al, 2020).

Dengan demikian, RAP merupakan material daur ulang perkerasan yang memiliki potensi besar untuk digunakan kembali dalam campuran beraspal. Pemanfaatannya memberikan keuntungan dari sisi ekonomi, teknis, dan lingkungan karena mampu mengurangi penggunaan material baru, menekan biaya, dan mengurangi limbah perkerasan. Namun, penggunaan RAP juga harus direncanakan secara hati-hati karena kandungan aspal tua di dalamnya dapat meningkatkan kekakuan campuran dan berpotensi menimbulkan retak. Oleh karena itu, pemakaian RAP perlu didukung oleh pengujian laboratorium, pengendalian kadar RAP, pengaturan temperatur pencampuran, serta penggunaan *rejuvenator* apabila

diperlukan, sehingga campuran yang dihasilkan tetap stabil, fleksibel, tahan terhadap *rutting*, dan memiliki ketahanan retak yang memadai (Bhatt & Wu, 2025).

#### 2.4 *Natural Rubber Latex (NRL)*

NRL atau lateks karet alam merupakan polimer alami yang berasal dari getah pohon karet (*Hevea Brasiliensis*) dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan modifikasi aspal. NRL berbentuk cairan koloid berwarna putih dengan komponen utama berupa karet alam cis-1,4 poliisoprena, serta beberapa komponen *non-poliisoprena* seperti protein, lemak, dan karbohidrat. Kandungan *poliisoprena* tersebut memberikan sifat elastis pada NRL, sehingga material ini berpotensi digunakan untuk meningkatkan kinerja campuran beraspal. Akan tetapi, lateks karet alam tidak dapat langsung digunakan sebagai bahan aditif aspal tanpa proses pencampuran yang tepat karena kandungan air di dalamnya cukup tinggi dan dapat mempersulit proses pencampuran, terutama pada aspal panas (Prastanto et al., 2018). Gambar NRL dapat dilihat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** *Natural Rubber Latex*

NRL sebagai bahan modifikasi aspal dinilai ramah lingkungan karena berasal dari sumber daya alam terbarukan. Dalam bidang perkerasan jalan, NRL digunakan untuk meningkatkan kualitas aspal dan campuran beraspal, terutama karena memiliki sifat elastis yang dapat memperbaiki kelenturan, daya ikat, serta ketahanan campuran terhadap kerusakan. NRL merupakan biopolimer alami yang mampu meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap deformasi permanen (*rutting*) dan retak lelah (*fatigue cracking*). Penggunaan NRL tidak hanya meningkatkan kinerja teknis perkerasan jalan, tetapi juga dapat memberikan

keuntungan ekonomis dalam jangka panjang (Suwanto et al., 2025). Kajian terbaru juga menyebutkan bahwa lateks karet alam dan biopolimer karet lain banyak dikembangkan sebagai modifier aspal karena berpotensi meningkatkan sifat reologi, homogenitas, stabilitas, dan kinerja campuran aspal (Sani et al., 2025).

Dari segi sifat atau properties, NRL memiliki karakter utama berupa elastisitas tinggi, daya lekat yang baik, kemampuan pemulihan bentuk setelah menerima beban, serta fleksibilitas yang lebih baik dibandingkan bahan pengikat aspal konvensional. Struktur molekul *cis-1,4 poliisoprena* pada NRL memberikan sifat elastomerik, yaitu kemampuan material untuk mengalami deformasi saat menerima beban dan kembali mendekati bentuk semula setelah beban dilepaskan. Sifat ini sangat penting pada campuran beraspal karena lapisan perkerasan lentur harus mampu menahan beban lalu lintas berulang tanpa mengalami kerusakan dini. Selain itu, NRL juga memiliki sifat viskoelastis yang dapat membantu memperbaiki respons aspal terhadap perubahan suhu dan beban, sehingga campuran tidak terlalu getas pada kondisi tertentu dan tetap memiliki stabilitas yang cukup saat menerima beban kendaraan.

NRL umumnya dicampurkan ke dalam aspal melalui metode pencampuran basah (*wet process*), yaitu lateks dimasukkan terlebih dahulu ke dalam aspal panas sebelum dicampur dengan agregat. Metode ini bertujuan agar lateks tersebar merata dalam binder dan dapat berinteraksi dengan aspal secara optimal. Proses pencampuran harus dikendalikan dengan baik karena suhu, waktu pengadukan, homogenitas, dan stabilitas penyimpanan sangat memengaruhi kualitas aspal modifikasi yang dihasilkan. Karena NRL mengandung air dan memiliki karakteristik berbeda dari aspal, proses pencampuran dengan aspal panas memerlukan suhu dan waktu yang tepat agar lateks tidak menggumpal dan dapat terdistribusi secara merata. Kajian tentang biopolimer karet pada aspal menyebutkan bahwa penggunaan surfaktan dapat meningkatkan kemampuan campur, homogenitas, dan stabilitas aspal termodifikasi karet (Sani et al., 2025).

Kelebihan utama NRL adalah kemampuannya dalam meningkatkan fleksibilitas campuran beraspal. Pada perkerasan lentur, retak sering terjadi akibat regangan tarik berulang dari beban kendaraan. Jika campuran terlalu kaku, energi

akibat pembebanan tidak dapat diserap dengan baik sehingga terbentuk retak mikro yang lama-kelamaan berkembang menjadi retak yang lebih besar. Dengan adanya NRL, binder menjadi lebih elastis sehingga campuran dapat lebih baik dalam menyerap energi, menahan regangan tarik, dan memulihkan bentuk setelah menerima beban lalu lintas. Studi terbaru mengenai material aspal berkelanjutan menyatakan bahwa NRL pada skala laboratorium terbukti dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan fatigue cracking (Suwanto et al., 2025).

Selain meningkatkan fleksibilitas, NRL juga dapat memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat. Ikatan yang baik akan meningkatkan kohesi dalam campuran dan adhesi antara binder dengan agregat. Kohesi yang baik menunjukkan bahwa ikatan internal pada bahan pengikat menjadi lebih kuat, sedangkan adhesi yang baik menunjukkan bahwa aspal mampu melekat lebih kuat pada permukaan agregat. Campuran yang memiliki ikatan kuat akan lebih tahan terhadap pelepasan butir, pembentukan rongga, kerusakan akibat air, dan retak awal. Oleh karena itu, penggunaan NRL dapat membantu menghasilkan campuran yang lebih padat, lebih stabil, dan lebih tahan terhadap kerusakan. Kajian biopolimer karet pada aspal menjelaskan bahwa bahan berbasis lateks dan karet alam dapat meningkatkan kinerja binder maupun campuran aspal pada berbagai kondisi pengujian (Sani et al., 2025).

Pada perkerasan jalan fleksibel, lapisan aspal menerima beban berulang dari kendaraan serta pengaruh perubahan suhu lingkungan. Kondisi tersebut dapat menimbulkan tegangan tarik di dalam lapisan perkerasan. Apabila campuran tidak memiliki kelenturan yang cukup, tegangan tarik tersebut dapat menyebabkan retak lelah (*fatigue cracking*), retak memanjang, retak melintang, maupun retak yang berkembang dari retak mikro menjadi retak permukaan. Penambahan NRL dapat membantu mengurangi potensi kerusakan tersebut karena sifat elastisnya mampu meningkatkan kemampuan campuran dalam menyerap dan menyebarkan energi pembebanan. Dengan demikian, NRL berperan dalam memperlambat terbentuknya retak awal serta menghambat perambatan retak pada campuran beraspal.

Penggunaan NRL menjadi semakin penting pada campuran beraspal yang mengandung RAP. RAP mengandung aspal lama yang telah mengalami proses penuaan (*aging*) sehingga cenderung lebih kaku, rapuh, dan memiliki kemampuan regangan yang lebih rendah. Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko retak pada campuran, terutama apabila kadar RAP yang digunakan cukup tinggi. Penambahan NRL diharapkan mampu memperbaiki kekurangan tersebut dengan memberikan efek elastis pada binder, sehingga campuran menjadi lebih fleksibel dan mampu menahan tegangan tarik sebelum mengalami keruntuhan. Dengan demikian, NRL dapat membantu menyeimbangkan peningkatan kekakuan akibat RAP dengan kebutuhan fleksibilitas campuran agar ketahanan retak tetap terjaga.

Meskipun memiliki banyak kelebihan, penggunaan NRL tetap memiliki beberapa keterbatasan. Salah satu kendalanya adalah proses pencampuran yang harus dikontrol dengan baik. Jika proses pencampuran tidak optimal, lateks dapat tersebar tidak merata sehingga kualitas campuran menjadi tidak konsisten. Selain itu, kadar NRL yang terlalu tinggi belum tentu menghasilkan campuran yang lebih baik. Penambahan NRL yang berlebihan dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak atau terlalu elastis, sehingga stabilitas campuran dapat menurun dan deformasi permanen berpotensi meningkat. Oleh karena itu, kadar optimum NRL perlu ditentukan melalui pengujian laboratorium, seperti pengujian *Marshall* dan ITS. Kajian terbaru menegaskan bahwa kemampuan campur, homogenitas, dan stabilitas penyimpanan merupakan faktor penting pada aspal termodifikasi karet (Sani et al., 2025).

Secara keseluruhan, NRL merupakan bahan modifikasi aspal yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan kinerja perkerasan lentur. Sifat elastis, viskoelastis, daya lekat, dan kemampuan pemulihan bentuk yang dimiliki NRL menjadikannya efektif dalam memperbaiki kelemahan campuran beraspal yang terlalu kaku, terutama pada campuran yang mengandung RAP. Penggunaan NRL dalam kadar yang tepat dapat meningkatkan fleksibilitas campuran, memperbaiki ikatan aspal-agregat, meningkatkan ketahanan terhadap retak lelah, serta membantu memperpanjang umur layanan perkerasan jalan. Keunggulan paling penting dari NRL adalah kemampuannya dalam mengurangi risiko cracking, terutama fatigue

cracking akibat beban lalu lintas berulang. Oleh karena itu, NRL dapat menjadi alternatif bahan tambah yang ramah lingkungan dan potensial untuk mendukung pemanfaatan material daur ulang dalam konstruksi perkerasan jalan berkelanjutan.

## 2.5 Parameter *Marshall*

Parameter *Marshall* dari metode pengujian *Marshall* untuk mengetahui karakteristik campuran, menentukan ketahanan atau stabilitas terhadap kelelahan (*flow*) plastis dari campuran aspal. Karakteristik campuran aspal beton dapat dilihat dari parameter-parameter yang dapat dari pengujian *Marshall*.

### 1. Stabilitas

Berdasarkan SNI 2489:2018, nilai stabilitas dapat mampu menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk tetap (deformasi permanen) atau kerusakan. Nilai stabilitas akan menentukan dari penggunaan aspal dalam campuran. Pada penambahan aspal, nilai stabilitas akan meningkat hingga batas maksimum. Jika nilai stabilitas terlalu tinggi akan menghasilkan perkerasan yang terlalu kaku dan rentan retak.

### 2. Kelelahan (*Flow*)

Berdasarkan SNI 2489:2018, kelelahan (*flow*) adalah besarnya deformasi vertikal yang terjadi mulai saat awal pembebanan sampai kondisi kestabilan maksimum sehingga benda uji hancur. Syarat nilai *flow* minimal 2 – 4 mm.

### 3. Rongga dalam campuran/ *void in the mix* (VIM)

Rongga dalam campuran adalah persentase rongga yang didapat dari total campuran. Jika Nilai VIM tinggi, menghasilkan besar rongga dalam campuran sehingga bersifat *porous*, yang mengakibatkan air dan udara memasuki rongga – rongga dalam campuran sehingga pelepasan butiran (*revelling*) dan pengelupasan permukaan (*stripping*) pada lapis perkerasan.

### 4. Rongga pada campuran agregat / *void mineral aggregate* (VMA)

Rongga pada campuran agregat adalah volume rongga antar butiran agregat dalam campuran aspal yang berisi udara dan aspal efektif (tidak termasuk volume aspal yang diserap agregat). Penurunan nilai dapat mengakibatkan potensi retak pada campuran aspal. Syarat nilai minimum 15%.

5. Rongga terisi aspal/ *void filled with asphalt* (VFA)

Rongga yang terisi aspal adalah persen rongga terdapat diantara partikel agregat yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat.

6. Hasil bagi *Marshall* (*Marshall Quantient*)

*Marshall quantient* adalah hasil antara stabilitas dengan *flow* . Nilai MQ akan memberikan nilai fleksibilitas pada campuran. Semakin besar nilai MQ maka campuran semakin kaku, sebaliknya apabila semakin kecil nilainya maka campuran semakin lentur.

7. Indeks Kekuatan Sisa (IKS)

Indeks kekuatan sisa (IKS) adalah nilai yang digunakan sebagai parameter untuk mengetahui durabilitas campuran aspal. Untuk mendapatkan nilai IKS adalah *Marshall Immersion Test* yaitu uji perendaman, dengan didapatkan nilai stabilitas *Marshall* yang dihasilkan dengan perendaman selama 24 jam. Kemudian diperhitungkan kehilangan stabilitas yang didapat oleh stabilitas yang dihasilkan dengan perendaman 30 menit dalam persentase. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2025 adalah minimal 90%.

## 2.6 Uji *Indirect Tensile Strength* (ITS)

Pengujian ITS merupakan uji kuat tarik tidak langsung untuk mengetahui kemampuan campuran aspal. Nilai ITS akan memberikan tegangan maksimum yang dapat diterima campuran sebelum runtuh, sehingga dapat digunakan untuk mengetahui retak pada lapisan perkerasan lentur. Uji ITS dapat menghasilkan nilai ketahanan retak (*cracking*), kelelahan (*fatigue*), dan durabilitas. Oleh karena itu, uji ITS sangat diperlukan untuk melengkapi uji *Marshall* dalam nilai campuran aspal (Badaron et al., 2019).

Dalam pelaksanaannya, benda uji campuran aspal yang telah dipadatkan diletakkan di antara dua pelat penekan, kemudian diberi beban tekan secara vertikal sampai benda uji mengalami keruntuhan. Beban maksimum yang mampu ditahan oleh benda uji digunakan untuk menghitung nilai kuat tarik tidak langsung. Semakin besar nilai ITS, semakin tinggi kemampuan campuran dalam menahan tegangan tarik. Sebaliknya, nilai ITS yang rendah menunjukkan bahwa campuran

lebih mudah mengalami retak ketika menerima beban kendaraan. Uji ITS juga sering digunakan untuk mengevaluasi pengaruh bahan tambah, variasi kadar aspal, jenis agregat, suhu, kadar air, dan proses perendaman terhadap kinerja campuran beraspal. Penelitian terbaru menyebutkan bahwa uji ITS dapat digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap retak tarik dan *stripping*, serta dapat dikaitkan dengan parameter *Tensile Strength Ratio* (TSR) untuk membandingkan kuat tarik benda uji kondisi kering dan terendam (Widianto et al., 2025).

Uji ITS juga berhubungan erat dengan evaluasi kerentanan campuran terhadap air atau *moisture susceptibility*. Pada pengujian ini, benda uji biasanya dibagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi kering atau tidak direndam (*unconditioned*) dan kondisi basah atau direndam (*conditioned*). Setelah itu, nilai ITS dari kedua kondisi dibandingkan untuk mendapatkan nilai TSR. TSR menunjukkan kemampuan campuran mempertahankan kuat tariknya setelah terkena pengaruh air. Nilai TSR yang tinggi menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap kerusakan akibat air, sedangkan nilai TSR yang rendah menunjukkan campuran lebih rentan terhadap *stripping* atau pelepasan ikatan antara aspal dan agregat. Studi tahun 2024 menunjukkan bahwa uji ITS digunakan pada benda uji kondisi *conditioned* dan *unconditioned* untuk menilai pengaruh air dan temperatur terhadap kekuatan campuran aspal (Yardim, 2024).

Nilai ITS dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti gradasi agregat, kadar dan jenis aspal, tingkat pemadatan, rongga udara, temperatur pengujian, kadar air, serta bahan tambah. Campuran dengan gradasi baik, kadar aspal optimum, dan ikatan aspal-agregat yang kuat umumnya menghasilkan nilai ITS yang lebih tinggi. Namun, nilai ITS yang terlalu tinggi dapat menunjukkan campuran terlalu kaku dan rentan retak akibat pembebanan berulang, sedangkan ITS yang terlalu rendah menunjukkan lemahnya ikatan internal campuran sehingga lebih mudah mengalami retak, ravelling, atau kerusakan akibat air. Dengan demikian, ITS berperan penting dalam menilai respons mekanis campuran, khususnya terhadap retak tarik dan kerusakan akibat air (Widianto et al., 2025).

## **2.7 Penelitian Terdahulu**

Melalui kajian penelitian terdahulu, peneliti diharapkan dapat mengetahui perbedaan antara penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan penelitian yang akan dilakukan saat ini. Selain itu, kajian tersebut juga bertujuan untuk mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan penelitian terdahulu, sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan celah penelitian serta memperkuat arah penelitian ini. Analisis gap dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Analisis Gap Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti / Tahun	Tujuan Penelitian	Material / Campuran	Metode / Pengujian	Hasil Utama	Keterbatasan / Celah Penelitian
1	Song dkk. (2026)	Evaluasi kinerja teknis, lingkungan, ekonomi.	CRAM tipe AC-25; RAP 0%, 30%, 40%, 50%, 60%; <i>regenerator bio-oil</i> .	<i>Marshall Immersion; wheel tracking; bending beam; four-point bending fatigue; LCA; analisis biaya.</i>	RAP menguntungkan teknis, lingkungan, ekonomi; tanpa <i>regenerator</i> maksimal 30%; dengan <i>regenerator</i> sampai 50%; CRAM-40% menurunkan emisi 27,4% dan biaya 18,7%.	RAP tinggi berisiko pada retak suhu rendah dan fatigue; perlu bahan peremaja.
2	Le Trio Ho Minh dan Ohm Byung-Sik (2026)	Evaluasi WMA; RAP <i>polymer-modified</i> ; REOW; SBS.	WMA; RAP 30%; virgin binder 60/70; RAP binder 30%; REOW 3%; SBS 1–4%	Penetrasi; <i>softening point</i> ; viskositas; DSR; MSCR; RTFO; PAV; ITS; TSR; Cantabro; <i>Hamburg Wheel Tracking; Overlay Test; SCB</i>	REOW melunakkan binder; SBS memulihkan elastisitas; kombinasi optimum REOW 3% + SBS 3%; TSR 83%; rut depth 3,9 mm; SCB 1382 J/m <sup>2</sup> ; Cantabro 10,8%	Skala laboratorium; satu sumber RAP; RAP tetap 30%; belum validasi lapangan; belum variasi sumber RAP; belum polimer lain

No.	Peneliti / Tahun	Tujuan Penelitian	Material / Campuran	Metode / Pengujian	Hasil Utama	Keterbatasan / Celah Penelitian
3	Shams dkk. (2025)	Evaluasi RAP; <i>crumb rubber</i> ; kinerja perkerasan; rehabilitasi jalan; <i>rutting</i> ; ITS; modulus resilien.	ACWC; aspal 60/70; RAP 0% dan 15%; <i>crumb rubber</i> 0% dan 7%; RAP 15% + CR 7%; <i>core</i> lapangan M-2 Pakistan.	<i>Hamburg Wheel Tracking</i> ; AASHTO T324; <i>Indirect Tensile Strength</i> ; ASTM D6931; <i>Resilient Modulus</i> ; ASTM D7369.	RAP + CR terbaik; rut depth turun 41,35%; ITS naik 17,93%; MR naik 38,23%; <i>rut depth</i> 1,22 mm; ITS 8,71 kN; MR 12.345 MPa.	Kadar RAP terbatas 15%; CR terbatas 7%; lokasi hanya M-2 Pakistan; <i>core</i> lapangan terbatas; belum variasi kadar RAP tinggi; belum uji <i>fatigue</i> dan <i>moisture damage</i> langsung.
4	Al-Mosawe dkk. (2023)	Pengaruh RAP; karakteristik WMA; <i>Marshall</i> ; kuat tarik tidak langsung.	WMA; RAP 0%, 10%, 20%, 30%, 40%; aspal penetrasi 40–50; <i>filler</i> semen <i>Portland</i> ; <i>Aspha-min</i> 0,3%	<i>Marshall Mix Design</i> ; <i>Indirect Tensile Strength</i> ; ASTM 6931; suhu 25°C.	Stabilitas <i>Marshall</i> naik sampai RAP 30%; 13,14 kN; menurun pada RAP 40%; ITS naik dari 229 kPa ke 338 kPa pada RAP 30%; 365 kPa pada RAP 40%.	RAP 40%; flow 4,75 mm; melebihi spesifikasi; peningkatan kekuatan; campuran lebih kaku; perlu pengendalian.

No.	Peneliti / Tahun	Tujuan Penelitian	Material / Campuran	Metode / Pengujian	Hasil Utama	Keterbatasan / Celah Penelitian
5	Wang dkk. (2023)	Evaluasi subdivisi gradasi RAP; pengaruh <i>rejuvenator</i> ; kinerja RAM; RAP tinggi.	RAP 15%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 60%; RAM-PR; RAM-SR; SK-90 asphalt; <i>rejuvenator</i> HRA-2 7%; agregat limestone.	RAP <i>Gradation Subdivision Method</i> ; Marshall design; wheel tracking; bending test; STOA; LTOA; immersion Marshall; freeze-thaw ITS; EDX; UOB.	RAM-SR lebih stabil; variasi stabilitas turun 11,9%; flow turun 68,1%; dynamic stability turun 88,3%; rut depth turun 20,7%; <i>rejuvenator</i> meningkatkan low-temperature performance dan water stability; RAP maksimum 40%; kondisi tertentu 60%	<i>Rejuvenator</i> menurunkan high-temperature performance; RAP tinggi menurunkan blending degree; RAP 60% hanya untuk daerah tuntutan suhu rendah rendah; belum memakai polimer; fokus <i>rejuvenator</i> dan gradasi RAP
6	Singh dkk. (2018)	Mengevaluasi pengaruh RAP dan Warm Mix Additive (WMA) terhadap sifat retak dan sensitivitas kelembapan campuran aspal.	HMA dengan RAP 0%, 10%, 20%, 30%, 40%; Sasobit 2%; Evotherm 0,5%.	<i>Semi-Circular Bending</i> (SCB), <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS), <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR).	RAP meningkatkan ketahanan retak, namun WMA menurunkan ITS dan ketahanan terhadap kelembapan.	Belum mengkaji Marshall, rutting, fatigue, dan penggunaan <i>rejuvenator</i> .

No.	Peneliti / Tahun	Tujuan Penelitian	Material / Campuran	Metode / Pengujian	Hasil Utama	Keterbatasan / Celah Penelitian
7	Paotong dkk. (2020)	Peningkatan sifat RAP; pemanfaatan NRL; pengurangan biaya; material daur ulang.	RAP; <i>Natural Rubber Latex</i> ; semen 3%, 5%, 7%; NRL 5%, 10%, 15%.	<i>Modified Proctor</i> ; UCS; CBR; AASHTO T180; ASTM D1883; <i>curing</i> 7, 14, 28 hari.	UCS naik dengan semen; CBR naik dengan semen; NRL optimum 5%; campuran terbaik RAP + semen 7% + NRL 5%; UCS 33,52 ksc; CBR 42%; layak <i>base course</i> dan <i>subbase course</i> .	NRL berlebih menurunkan UCS dan CBR; belum uji <i>Marshall</i> ; belum uji ITS; belum uji <i>rutting</i> ; belum uji <i>fatigue</i> ; durabilitas jangka panjang belum dikaji.
8	Nirwana dkk. (2025)	Pengaruh karet alam; kinerja campuran aspal; parameter <i>Marshall</i> .	Aspal penetrasi 60/70; karet alam 1%, 2%, 3%, 4%, 5%.	<i>Marshall</i> ; ASTM D1559; Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.	Stabilitas naik; <i>flow</i> ; VIM; density; VMA; VFB; <i>Marshall Quotient</i> ; optimum karet alam 4%; aspal 6%.	Belum menggunakan RAP; belum uji kuat tarik tidak langsung; hasil terbatas parameter <i>Marshall</i> .
9	Yeanyong dkk. (2024)	Evaluasi <i>Masterbatch Natural Rubber</i> ; kinerja mekanis; ketahanan retak; <i>rutting</i> ; kelelahan campuran aspal.	Aspal penetrasi 60/70; agregat batu kapur; MNR 0%, 3%, 5%, 7%, 8%, 9%, 11%, 13%, 15%.	<i>Marshall stability</i> ; ITS; <i>Indirect Tensile Resilient Modulus</i> ; <i>Indirect Tensile Fatigue Life</i> ; <i>Hamburg wheel tracking</i>	Kinerja terbaik MNR 3%; stabilitas <i>Marshall</i> 12,5 kN; ITS 437,1 kPa; IT Mr 3896 MPa; <i>rut depth</i> terendah 11,32 mm; <i>fatigue life</i> tertinggi.	MNR >3%; kinerja menurun; belum menggunakan RAP; belum menjawab pengaruh karet alam pada campuran RAP.

No.	Peneliti / Tahun	Tujuan Penelitian	Material / Campuran	Metode / Pengujian	Hasil Utama	Keterbatasan / Celah Penelitian
10	Suwanto dkk. (2025)	Evaluasi kinerja jangka panjang; aspek ekonomi; campuran aspal termodifikasi NRL; <i>Life Cycle Cost Analysis</i> .	<i>Stone Mastic Asphalt</i> ; SBS; NRL 5% dari berat <i>binder</i> .	Pemodelan mekanistik-empiris; AASHTOWare MEPDG; <i>Life Cycle Cost Analysis</i> .	NRL meningkatkan kinerja; <i>bottom-up cracking</i> turun 19,4%; <i>rutting virgin SMA</i> 2,5%; <i>rutting SMA-NRL</i> 1,9%; biaya lebih rendah dibanding campuran tanpa modifikasi.	Belum menggunakan RAP; belum evaluasi langsung AC-WC dengan RAP; fokus SMA; analisis jangka panjang berbasis pemodelan.
11	Lagaligo dkk. (2022)	Pengaruh temperatur pemadatan; AC-WC; karet alam; ketahanan deformasi; ITS.	AC-WC; aspal Pen. 60/70; KAO 6%; karet alam 0%, 3%, 5%, 7%, 9%; temperatur 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C.	<i>Marshall</i> ; <i>Indirect Tensile Strength</i> ; <i>Wheel Tracking</i> ; Spesifikasi Bina Marga 2018; SNI aspal dan agregat	Karet alam meningkatkan stabilitas; ITS; ketahanan deformasi; kadar optimum 7%; stabilitas tertinggi 1183,7 kg pada 140°C; ITS tertinggi 47.024,89 kPa pada 150°C; DS tertinggi 3316 lintasan/mm pada 150°C.	Belum menggunakan RAP; kadar optimum bukan 3% atau 5%; fokus AC-WC normal; belum uji durabilitas rendaman; belum uji <i>fatigue</i> ; belum evaluasi jangka panjang.
12	Suwanto, dkk. (2023)	Menganalisis kinerja dan dampak lingkungan campuran aspal termodifikasi NRL.	SMA, Aspal Pen 40/60, NRL 5%, SBS 5%.	ITS, ITSM, ITFT, RLAT, LCA.	NRL meningkatkan ITS sekitar 10% dan modulus kekakuan sekitar 20% dibanding campuran konvensional serta memiliki dampak lingkungan lebih rendah daripada SBS.	Belum mengkaji RAP, WMA, kinerja jangka panjang, dan analisis biaya siklus hidup.

Penggunaan RAP sebesar 30% dalam penelitian ini dipilih karena kadar tersebut masih berada pada batas pemanfaatan material daur ulang yang aman dan mampu memberikan kinerja campuran yang baik. RAP memiliki potensi untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan deformasi karena mengandung aspal tua yang lebih kaku. Namun, penggunaan RAP dengan kadar terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku, rentan terhadap retak, menurunkan ketahanan *fatigue*, serta mengurangi kemampuan campuran dalam menerima beban dan perubahan temperatur. Song dkk. (2026) menunjukkan bahwa penggunaan RAP tanpa bahan peremaja masih dapat diterapkan sampai kadar 30%, sedangkan penggunaan RAP di atas kadar tersebut membutuhkan bahan tambahan seperti regenerasi untuk menjaga kinerja campuran. Oleh karena itu, RAP 30% dipandang sebagai kadar yang seimbang karena masih memberikan manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan, tetapi risiko penurunan performa campuran masih dapat dikendalikan.

Pemilihan RAP 30% didukung oleh hasil penelitian terdahulu yang membuktikan adanya peningkatan performa campuran pada kadar tersebut. Al-Mosawe (2023) menunjukkan bahwa penggunaan RAP sampai kadar 30% mampu meningkatkan stabilitas *Marshall* hingga 13,14 kN dan kuat tarik tidak langsung dari 229 kPa menjadi 338 kPa. Akan tetapi, pada kadar RAP 40% nilai flow mencapai 4,75 mm dan melebihi spesifikasi, sehingga mengindikasikan bahwa kadar RAP yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran tidak lagi berada pada kondisi yang ideal. Dengan demikian, RAP 30% dapat dianggap sebagai kadar yang cukup optimal karena mampu meningkatkan kekuatan dan stabilitas campuran tanpa menimbulkan penyimpangan parameter *Marshall* yang berlebihan.

Peningkatan kadar RAP perlu dikendalikan karena dapat memengaruhi proses pencampuran antara aspal lama dan aspal baru. Wang dkk. (2023) menunjukkan bahwa pada kadar RAP yang semakin tinggi, derajat pencampuran antara aspal lama dan aspal baru dapat menurun, sehingga distribusi ikatan dalam campuran menjadi kurang optimal. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa penggunaan bahan peremaja memang dapat memperbaiki kinerja suhu rendah dan stabilitas terhadap air, tetapi apabila tidak tepat dapat menurunkan kinerja campuran pada

aspek lainnya, terutama kinerja suhu tinggi. Oleh karena itu, RAP 30% dipilih karena berada pada kadar menengah yang masih memungkinkan campuran memperoleh manfaat dari RAP tanpa menghadapi risiko besar seperti pada penggunaan RAP 40%, 50%, atau 60%. Pemilihan kadar ini juga memungkinkan penelitian lebih terarah pada upaya peningkatan kinerja campuran melalui penambahan NRL.

Penggunaan NRL dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk memperbaiki karakteristik campuran aspal yang mengandung RAP. Campuran dengan RAP cenderung memiliki sifat yang lebih kaku akibat keberadaan aspal tua yang telah mengalami penuaan. Kekakuan tersebut memang dapat meningkatkan stabilitas, tetapi apabila terlalu dominan dapat menurunkan fleksibilitas campuran. Oleh karena itu, diperlukan bahan modifikasi yang mampu meningkatkan elastisitas, daya ikat, serta ketahanan campuran terhadap retak dan deformasi. Paotong dkk. (2020) menunjukkan bahwa penambahan NRL pada material RAP dapat meningkatkan nilai UCS dan CBR, dengan kadar optimum NRL sebesar 5%. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada aplikasi base course dan subbase course, serta belum mengkaji kinerja campuran aspal melalui parameter *Marshall*, ITS, rutting, fatigue, dan durabilitas. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan NRL pada campuran aspal panas yang mengandung RAP masih perlu dikaji lebih lanjut.

Variasi NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan NRL terhadap campuran RAP 30%. Kadar NRL 0% digunakan sebagai campuran kontrol untuk mengetahui kinerja campuran tanpa penambahan NRL. Kadar NRL 3% dipilih karena Yeanyong dkk. (2024) menunjukkan bahwa material berbasis karet alam pada kadar 3% memberikan kinerja terbaik terhadap stabilitas *Marshall*, ITS, modulus resilien, ketahanan rutting, dan fatigue life. Sementara itu, kadar NRL 5% dipilih karena Paotong dkk. (2020) menemukan bahwa NRL optimum berada pada kadar 5% untuk material RAP yang distabilisasi. Fardzanela Suwanto dkk. (2025) juga menunjukkan bahwa penggunaan NRL 5% pada campuran Stone Mastic Asphalt mampu menurunkan bottom-up cracking sebesar 19,4% dan menurunkan rutting dibandingkan campuran tanpa modifikasi.

Dengan demikian, variasi NRL 0%, 3%, dan 5% digunakan untuk melihat perubahan kinerja campuran secara bertahap dari kondisi tanpa NRL hingga campuran dengan kadar NRL yang lebih tinggi.

Pemilihan NRL sebagai bahan modifikasi diperkuat oleh penelitian lain yang membuktikan bahwa karet alam mampu meningkatkan parameter teknis campuran aspal. Nirwana dkk. (2025) menunjukkan bahwa penambahan karet alam pada aspal penetrasi 60/70 dapat meningkatkan stabilitas dan beberapa parameter *Marshall*, dengan kadar optimum karet alam sebesar 4%. Sementara itu, Lagaligo dkk. (2022) menunjukkan bahwa penambahan karet alam pada campuran AC-WC dapat meningkatkan stabilitas, kuat tarik tidak langsung, dan ketahanan deformasi. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa bahan berbasis karet alam memiliki potensi untuk meningkatkan performa campuran aspal. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih dilakukan pada campuran aspal tanpa RAP, sehingga belum dapat menjelaskan secara langsung kemampuan NRL dalam mengimbangi kekakuan akibat aspal tua pada campuran yang mengandung RAP. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting karena menggabungkan pemanfaatan RAP dan NRL, dua aspek yang sebelumnya lebih banyak dikaji secara terpisah.

Penelitian terdahulu mengenai RAP umumnya masih berfokus pada pengaruh kadar RAP terhadap stabilitas, rutting, workability, aspek lingkungan, serta kebutuhan bahan peremaja. Sementara itu, penelitian mengenai NRL atau karet alam lebih banyak membahas pengaruhnya terhadap campuran aspal konvensional tanpa RAP atau pada material lapis fondasi dan lapis fondasi bawah. Paotong dkk. (2020) memang telah menggunakan RAP dan NRL, tetapi pengujiannya belum dilakukan pada campuran aspal panas dan belum mencakup parameter penting seperti *Marshall*, ITS, rutting, fatigue, serta durabilitas. Di sisi lain, Nirwana dkk. (2025), Yeanyong dkk. (2024), Fardzanela Suwanto dkk. (2025), dan Lagaligo dkk. (2022) menunjukkan bahwa karet alam atau NRL berpotensi meningkatkan kinerja aspal, tetapi belum menjawab pengaruhnya pada campuran dengan RAP 30%. Dengan demikian, masih terdapat celah penelitian mengenai kombinasi RAP 30% dengan variasi NRL 0%, 3%, dan 5% pada campuran aspal.

Penelitian mengenai campuran aspal dengan RAP 30% dan variasi NRL 0%, 3%, dan 5% memiliki dasar ilmiah yang kuat serta relevan untuk dikembangkan. RAP 30% dipilih karena masih berada pada kadar yang aman dan berpotensi meningkatkan stabilitas campuran, sebagaimana ditunjukkan oleh Song dkk. (2026), Al-Mosawe dan Al-Mosawe (2023), serta Wang dkk. (2023). Sementara itu, NRL dipilih karena memiliki sifat elastis yang dapat memperbaiki kelemahan campuran RAP, terutama dalam meningkatkan fleksibilitas, ketahanan tarik, dan ketahanan terhadap deformasi, sebagaimana didukung oleh Paotong dkk. (2020), Yeanyong dkk. (2024), Fardzanela Suwanto dkk. (2025), Nirwana dkk. (2025), dan Lagaligo dkk. (2022). Variasi NRL digunakan untuk mengetahui pengaruh bertahap penambahan NRL terhadap campuran RAP serta menentukan kadar yang paling efektif. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi gap penelitian terdahulu dan mendukung pengembangan campuran aspal yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, serta tetap memenuhi persyaratan teknis perkerasan jalan.