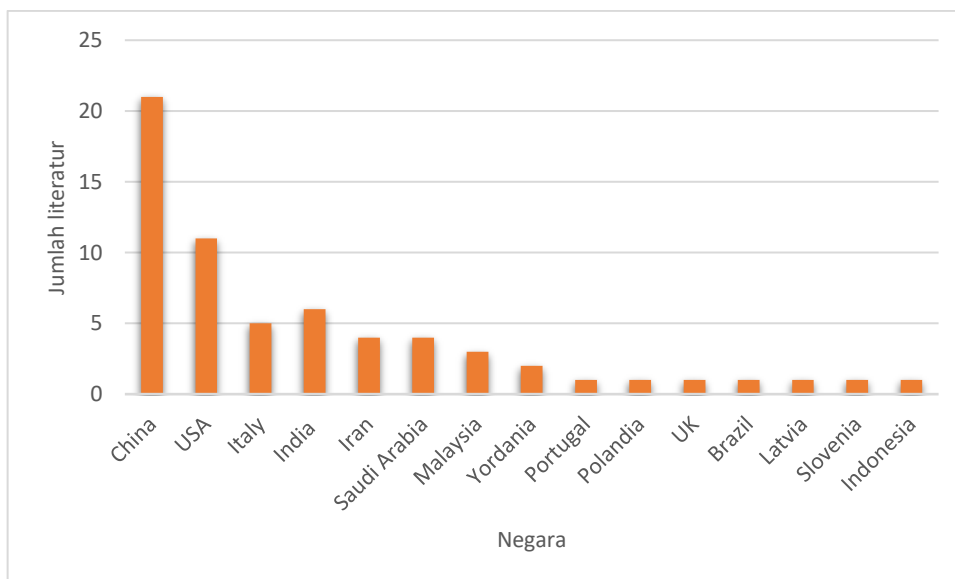


4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Sebaran Literatur

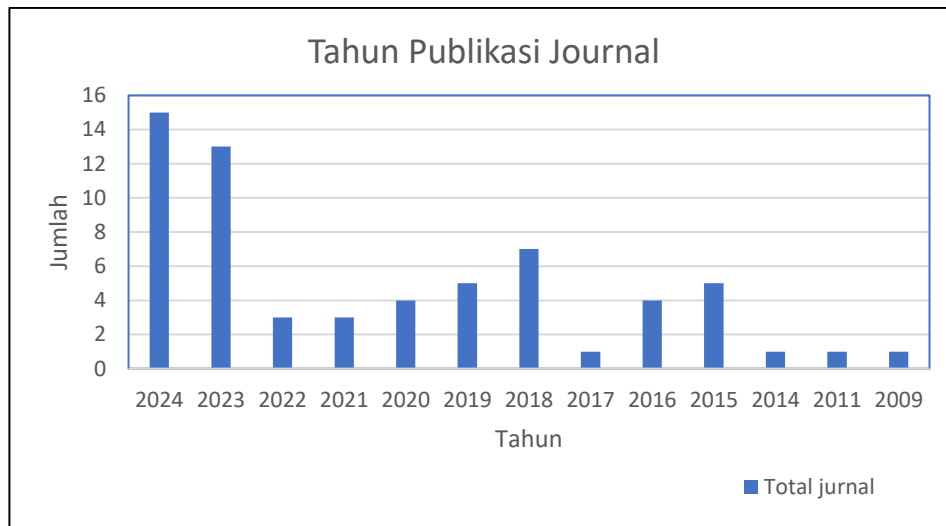
Merujuk pada Gambar 4.2, tren penelitian terkait Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) memperlihatkan bahwa China berada di posisi teratas dengan 21 studi, diikuti oleh Amerika Serikat dengan 11 studi, dan India dengan 6 studi. Data ini menunjukkan adanya kemajuan dalam penelitian terhadap RAP di negara-negara tersebut. Penelitian terkait RAP di Indonesia menunjukkan fokus riset yang masih rendah dibandingkan negara lain. Penggunaan RAP sangat relevan di Indonesia karena beberapa alasan. Adanya pertumbuhan infrastruktur yang pesat membutuhkan teknologi hemat biaya dan berkelanjutan, di mana RAP dapat membantu mendaur ulang material aspal dan mengurangi ketergantungan terhadap material murni. Dari aspek lingkungan dan ekonomi sirkular, penggunaan RAP berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon dan mendukung kebijakan infrastruktur hijau, sejalan dengan target Net Zero Emission (NZE) yang dicanangkan Indonesia untuk dicapai pada tahun 2060 .



Gambar 4. 1 Sebaran Geografis Literatur

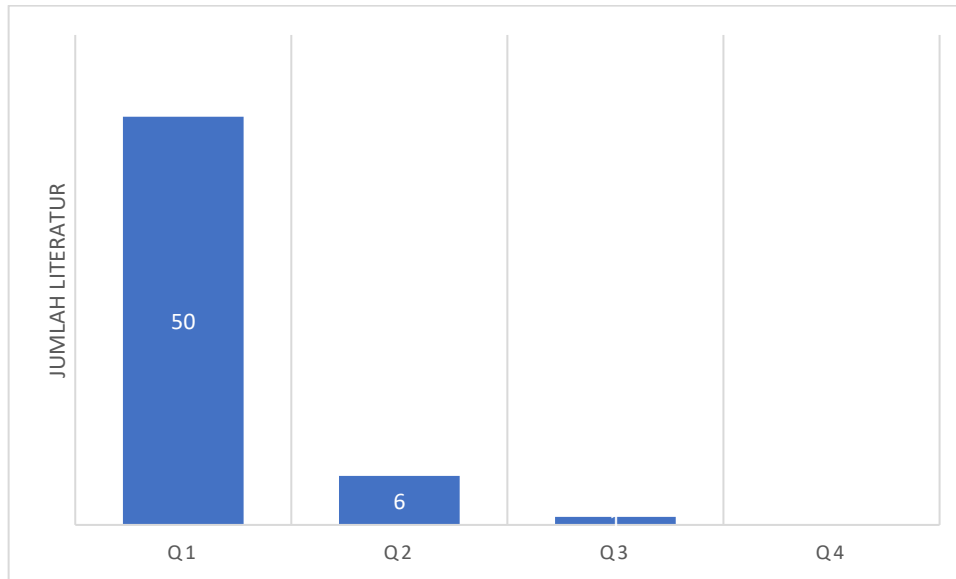
Penelitian terkait Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dengan rejuvunator maupun tanpa rejuvenator menunjukkan adanya peningkatan tren pada Gambar 4.3 yang signifikan dari tahun 2018 hingga 2024, dengan lonjakan terbesar dalam dua tahun terakhir yaitu pada 2024 dan 2023. Hasil ini memberitahukan bahwa adanya peningkatan perhatian global terhadap topik sekitar

RAP dan dalam industri konstruksi jalan, terutama pada saat ini ada perubahan iklim dan krisis sumber daya alam (Emma Charlton, 2024). Penggunaan RAP juga memberikan solusi ramah lingkungan dan berbiaya efisien semakin menguat, ditambahkan oleh perkembangan teknologi dari rejuvenator yang berfokus pada peningkatan kinerja material RAP.



Gambar 4. 2 Grafik publikasi jurnal berdasarkan tahun

Berdasarkan analisis pada data Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, penelitian terkait Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah mengalami perkembangan dalam beberapa tahun terakhir. Sebelum tahun 2015, studi masih bersifat dasar dan berfokus pada eksplorasi penggunaan RAP sebagai material alternatif dalam campuran aspal. Pada periode 2015–2020, penelitian mulai berkembang dengan menekankan pada metode pengolahan RAP, seperti penggunaan rejuvenator untuk memulihkan sifat material aspal lama agar tetap layak digunakan. Jumlah penelitian mulai meningkat, terutama pada tahun 2018, yang menunjukkan peningkatan fokus pada optimalisasi performa material daur ulang. Memasuki periode 2020–2024, penelitian mengalami lonjakan tajam dengan jumlah publikasi tertinggi tercatat pada tahun 2023 dan 2024, masing-masing mencapai 13 dan 14 studi. Tren ini menunjukkan bahwa topik RAP terus berkembang, dengan perhatian yang semakin luas terhadap metode dan teknik pengolahan untuk meningkatkan kualitas dan efektivitas penggunaan material ini dalam infrastruktur jalan.



Gambar 4. 3 Sebaran Kuartil Literatur berupa Jurnal Internasional yang terindeks fokus

Sebaran literatur dalam penelitian ini didominasi oleh jurnal kuartil Q1, sementara Q2 hanya ada 6 literatur,, hampir tidak ada dari kuartil Q3, dan Q4 tidak ada. Dominasi ini menunjukkan bahwa penelitian ini telah didasarkan pada referensi berkualitas tinggi dengan dampak ilmiah yang signifikan. Jurnal Q1 umumnya memiliki reputasi yang sangat baik dalam komunitas akademik global, dengan metodologi yang kuat, hasil yang dapat dipercaya, dan relevansi yang luas. Literasi dari Q2, meskipun lebih sedikit, memberikan perspektif tambahan yang lebih spesifik atau kontekstual yang dapat memperkaya pembahasan. Di sisi lain, tidak adanya literatur dari Q3 dan Q4 mencerminkan upaya untuk menjaga kredibilitas dan kualitas referensi.

Namun, dominasi literatur dari kuartil atas, khususnya Q1, dapat membawa tantangan tersendiri. Salah satunya adalah kurangnya representasi dari perspektif lokal atau penelitian berbasis kasus yang mungkin lebih relevan dengan kondisi di Indonesia. Penelitian yang terlalu bergantung pada literatur global berpotensi mengabaikan permasalahan atau konteks unik yang ada di dalam negeri. Oleh karena itu, penting untuk menyeimbangkan referensi berkualitas tinggi dengan literatur yang lebih aplikatif atau relevan secara lokal, yang sering kali terdapat di jurnal kuartil lebih rendah atau publikasi regional.

Implikasi dari sebaran literatur ini terhadap penelitian skripsi adalah adanya dasar yang kuat untuk mengembangkan argumenx yang kuat. Namun, untuk memastikan bahwa penelitian ini juga relevan secara praktis, perlu dilakukan eksplorasi lebih lanjut terhadap literatur yang

dapat menjembatani antara teori global dan aplikasi lokal. Hal ini akan membantu menghasilkan analisis yang tidak hanya akademis tetapi juga aplikatif, mendukung relevansi penelitian dengan kebutuhan atau tantangan yang dihadapi di lapangan. Dengan pendekatan yang lebih kritis terhadap sumber literatur, penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang lebih signifikan dan relevan baik secara teoretis maupun praktis.

4.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) bisa dilihat pada *Gambar 4.1* merupakan langkah yang sangat menguntungkan karena ramah lingkungan dan juga dapat mengurangi biaya konstruksi. Dengan memanfaatkan RAP, kita dapat mengurangi limbah jalan yang dihasilkan selama proses perbaikan atau penggantian jalan, sekaligus mengurangi kebutuhan akan material alami yang semakin terbatas (Gong et al., 2018). RAP adalah hasil dari material jalan yang telah didaur ulang, yang kita bisa manfaatkan untuk menggunakan limbah, sehingga mengurangi pemborosan sumber daya. Daur ulang RAP tidak hanya menghemat sumber daya alam, tetapi juga mengurangi biaya konstruksi serta dampak lingkungan yang terkait dengan konstruksi dibandingkan dengan perkerasan yang tradisional (Sun et al., 2019). Dengan menggunakan RAP, biaya produksi aspal dapat dikurang, dan konsumsi energi serta emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama produksi juga dapat diminimalkan.

Bagian negatif dari perkerasan dengan RAP cenderung mengalami penurunan kualitas aspal karena proses penuaan yang mengakibatkan aspal memiliki ketahanan yang kurang terhadap *fatigue* dan keretakan (Subhy et al., 2018). Penggunaan RAP di perkerasan jalan dengan Campuran melebihi 50% akan mengurangi ketahanan terhadap *fatigue* (Xiao et al., 2015). Penggunaan RAP dengan persentase yang tinggi merupakan hal baik namun kita harus memperhatikan dampak buruk bagi kekuatan struktural jalan juga. Oleh karena itu, merupakan langkah yang penting untuk mengetahui bagaimana batas optimum kinerja RAP tanpa adanya rejuvenator dalam campuran perkerasan jalan.

Tabel 4.1 ini merangkum semua penelitian terkait kinerja dan hasil yang diperoleh dari penggunaan RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Dengan merangkum berbagai penelitian ini, kita dapat melihat garis besar dan trend penggunaan RAP pada berbagai persentase dalam campuran perkerasan jalan, serta mengetahui bagaimana dengan penambahan berbagai persentase RAP akan berpengaruh terhadap stabilitas dan flow dari campuran perkerasan jalan. Selain itu, Tabel ini juga memberikan wawasan tentang pengaruh penggunaan RAP terhadap daya tahan, kekuatan, dan ketahanan terhadap beban lalu lintas dan juga pengaruh cuaca, yang

merupakan hal penting dalam perancangan perkerasan jalan yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Tabel 4. 1 Hasil dari RAP tanpa penggunaan Rejuvenator.

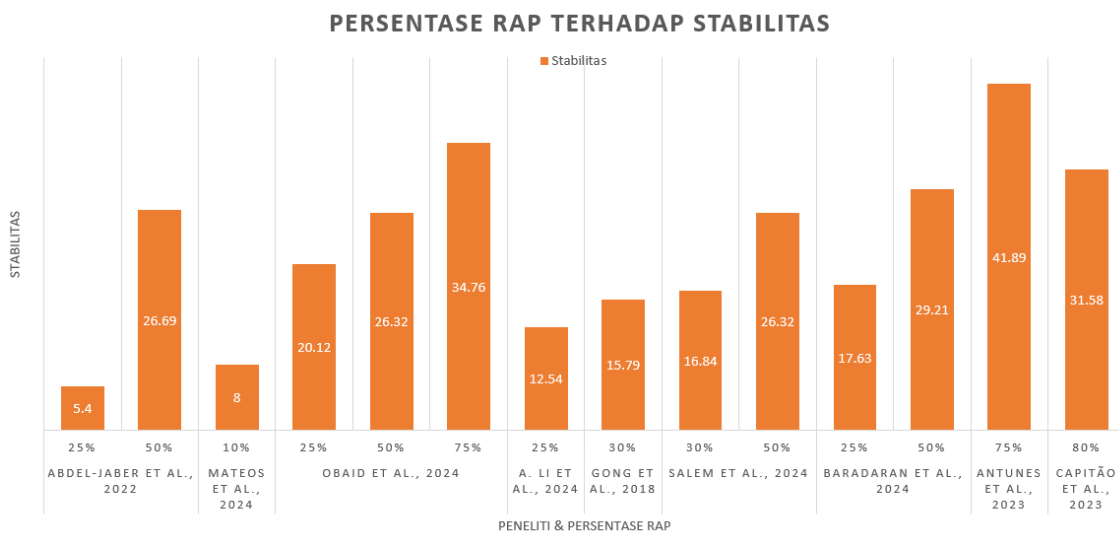
Tipe Lapisan	Peneliti	Persentase RAP	Hasil
AC-WC (Wearing-Course)	Abdel-Jaber et al., 2022	25%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran Bitumen dengan 25% RAP memberikan hasil yang hampir sama dengan Penggunaan Material murni. Stabilitas + 5.40 % dan Flow -4.98%.
		50%	<ul style="list-style-type: none"> Pada 50% RAP, stabilitas meningkat signifikan dibandingkan 25% RAP, namun flow menurun, menunjukkan campuran cukup kaku. Stabilitas +26.69 % dan Flow -7.59%.
	(Mateos et al., 2024)	10%	<ul style="list-style-type: none"> Dengan Campuran dengan tambahan RAP tidak memiliki banya perbedaan dalam hal kekuatan dan fleksibilitas dari campuran perkerasana jalan Stabilitas +8.00% dan Flow -9.71%,
	(Obaid et al., 2024)	25%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan 25% RAP memiliki tingkat kekakuan sedikit diatas Control mix. Tingkat ketahan terhadap <i>fatigue</i> mengurang dari pada campuran tanpa RAP. Stabilitas + 20.12% dan Flow -1.71%.
		50%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran dengan 50% RAP memiliki tingkat kekakuan yang tinggi. Stabilitas +26.32% dan Flow -7.69%.
		75%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran ini memiliki tingkat kekakuan yang sangat tinggi dan akan memiliki tingkat ketahanan terhadap <i>fatigue</i> yang paling rendah dan ini diakibatkan dari tingkat rapuh yang semakin tinggi. Stabilitas +34.76% dan Flow -13.39%.
	(A. Li et al., 2024)	25%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA 25% RAP memiliki ketahanan terhadap suhu rendah yang sama dengan Campuran HMA tanpa RAP. Campuran ini memiliki tingkat flow sedikit diatas Campuran tanpa RAP -6%, dan Stabilitas 12.54%.

Tabel 4. 1 (lanjutan) Hasil dari RAP tanpa penggunaan Rejuvenator.

Tipe Lapisan	Peneliti	Persentase RAP	Hasil
AC-WC (Wearing-Course)	(Gong et al., 2018)	30%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran 30% RAP memiliki ketahanan terhadap keretakan sedikit dibawah penggunaan agregat murni. Penelitian ini menunjukkan performa campuran RAP 30% untuk deformasi sama dengan penggunaan agregat murni. Stabilitas +15.79% dan Flow -5.98%.
AC-BC	(Salem et al., 2024)	30%	<ul style="list-style-type: none"> RAP 30% memiliki ketahanan terhadap penuaan asfalt sama dengan campuran tanpa RAP. Stabilitas +16.84% dan Flow -3.13%.
		50%	<ul style="list-style-type: none"> Performa penuaan dari Campuran dengan 50% RAP ini memiliki performa yang lebih baik dari 30% RAP dalam hal menahan panas dalam temperatur yang tinggi. Stabilitas +26.32% dan Flow -8.83%.
	(Baradaran et al., 2024)	25%	<ul style="list-style-type: none"> Hasil dari campuran yang memiliki 25% Campuran RAP tanpa rejuvenator adalah tidak memiliki perbedaan dalam ketahanan di suhu yang rendah dengan campuran tanpa RAP. Stabilitas +17.63% dan Flow -2.44%.
		50%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran ini yang mengandung 50% mengurangi ketahanan terhadap retak oleh perkerasan yang dihasilkan dibanding dengan tanpa RAP. Stabilitas +29.21% dan Flow -4.92%
	(Mazzoni et al., 2018)	50%	<ul style="list-style-type: none"> Hasil dari Campuran RAP 50% memiliki hasil tingkat kekakuan yang tinggi, tambahan rejuvenator menghilangkan kekurangan ini. Campuran ini memiliki ketahanan terhadap keretakan yang rendah dibandingkan dengan penggunaan Campuran dengan tambah rejuvenator.
AC-Base	(Antunes et al., 2023)	75%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan 75% RAP memberikan hasil dengan peningkatan kekakuan campuran mencapai 39% dan juga menunjukkan ketahan lebih terhadap deformasi permanen dibanding campuran biasa. Stabilitas +41.89% dan fLow -6.67%

Tabel 4. 1 (lanjutan) Hasil dari RAP tanpa penggunaan Rejuvenator.

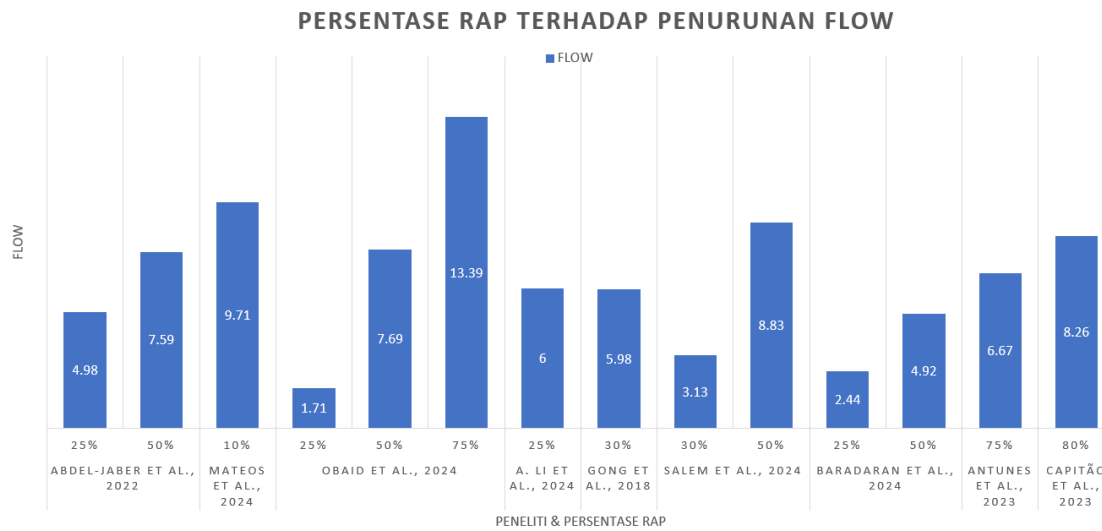
Tipe Lapisan	Peneliti	Persentase RAP	Hasil
AC-Base	(Capitão et al., 2023)	80%	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA 80% RAP memiliki penurunan besar kekuatan struktural terhadap beban besar dibanding dengan campuran agregat murni. Tingkat kekakuan dari Campuran HMA ini masuk di tingkat sulit dikerjakan. Stabilitas +31.58% dan flow -8.26%



Gambar 4. 4 Grafik Persentase RAP terhadap Stabilitas

Data yang ada pada Gambar 4.4 menunjukkan hubungan yang jelas antara persentase RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), stabilitas (%), dan flow (%). Secara umum, semakin tinggi persentase RAP, stabilitas campuran aspal cenderung meningkat secara signifikan. Pada RAP rendah, pada 10% hingga 25%, peningkatan stabilitas masih relatif kecil, yaitu sebesar 8% hingga 20.12%, tergantung penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa pada persentase kecil, material RAP dalam campuran belum memberikan kontribusi besar terhadap kekakuan campuran. Sebaliknya, pada RAP menengah hingga tinggi, seperti 50%-75%, peningkatan stabilitas menjadi lebih signifikan, dengan angka mencapai 26.69%-41.89%. Stabilitas tertinggi tercapai pada RAP 75%, yang menunjukkan kontribusi optimal dari material RAP terhadap kekakuan campuran. Namun, pada RAP sangat tinggi seperti 80%, peningkatan stabilitas mulai melambat menjadi

31.58%, mengindikasikan adanya batas optimal di mana stabilitas mencapai puncaknya sebelum menurun.



Gambar 4. 5 Grafik Persentase RAP terhadap Penurunan Flow

Di sisi lain, flow menunjukkan tren yang berlawanan dengan stabilitas. Semakin tinggi persentase RAP, flow cenderung menurun, yang menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku dan kurang fleksibel. Penurunan flow pada RAP rendah seperti 10%-25% masih relatif kecil, berkisar antara -1.71% hingga -9.71%, tergantung penelitian. Namun, pada RAP menengah hingga tinggi seperti 50%-75%, penurunan flow menjadi lebih signifikan, mencapai -7.59% hingga -13.39%. Pada RAP sangat tinggi seperti 80%, meskipun stabilitas tetap tinggi, flow menunjukkan sedikit perbaikan dibandingkan RAP 75% dengan penurunan sebesar -8.26%. Penurunan flow yang signifikan pada RAP tinggi menunjukkan bahwa campuran menjadi terlalu kaku, yang berpotensi meningkatkan risiko retak dini, terutama di bawah kondisi beban suhu rendah.

Hubungan antara stabilitas dan flow ini menunjukkan ada yang perlu diperhatikan. Peningkatan stabilitas yang signifikan pada RAP tinggi memberikan keuntungan berupa ketahanan terhadap deformasi permanen, seperti rutting, sehingga sangat cocok untuk jalan dengan beban lalu lintas berat. Namun, penurunan flow yang signifikan pada RAP tinggi mengindikasikan bahwa campuran kehilangan fleksibilitasnya, yang dapat meningkatkan risiko keretakan. Oleh karena itu, meskipun RAP tinggi memberikan stabilitas yang baik, penting untuk

memastikan bahwa fleksibilitas campuran tetap dijaga, terutama dalam kondisi iklim tropis seperti di Indonesia yang memiliki suhu tinggi dan curah hujan lebat .

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan hubungan langsung antara peningkatan persentase RAP dan perubahan karakteristik mekanis campuran aspal, yaitu stabilitas yang meningkat secara signifikan namun disertai dengan penurunan flow. Peningkatan stabilitas pada RAP tinggi mencerminkan efek dari aspal tua yang terdapat dalam RAP, yang memiliki viskositas lebih tinggi akibat proses penuaan. Aspal tua ini membuat campuran lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi permanen seperti rutting, sehingga memberikan stabilitas yang sangat baik. Namun, tanpa penggunaan rejuvenator, viskositas tinggi aspal RAP juga menyebabkan kekakuan berlebihan pada campuran, yang tercermin dari penurunan flow pada RAP tinggi.

Penurunan flow ini menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih sulit untuk beradaptasi terhadap deformasi elastis, yang sangat penting untuk menahan variasi beban dan suhu. Pada RAP rendah hingga menengah, seperti 25%-50%, penurunan flow masih relatif kecil, memungkinkan campuran tetap memiliki fleksibilitas yang cukup untuk mencegah keretakan dini. Namun, pada RAP tinggi, seperti 75%-80%, penurunan flow yang signifikan menandakan bahwa campuran kehilangan kemampuan untuk menyerap energi deformasi, sehingga meningkatkan risiko retak dini, terutama pada daerah dengan beban lalu lintas berat atau suhu ekstrem.

Dengan demikian, penggunaan RAP tanpa rejuvenator menunjukkan keterbatasan yang signifikan, terutama pada persentase RAP yang sangat tinggi. Meskipun stabilitas meningkat, kehilangan fleksibilitas menjadi tantangan utama yang memengaruhi durabilitas campuran dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan persentase RAP yang optimal dalam aplikasi praktis, sehingga stabilitas yang tinggi dapat dicapai tanpa mengorbankan ketahanan campuran terhadap keretakan.

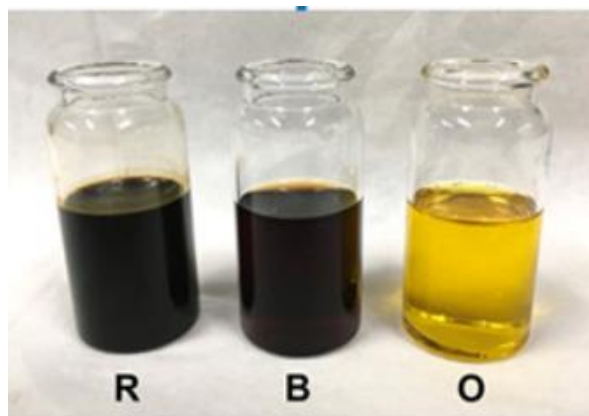


Gambar 4. 6 Reclaimed Asphalt Pavement (sumber : TheConstructor, 2020)

4.3 Rejuvenator

4.3.1 Bio-Rejuvenator dan Non Bio-Rejuvenator

Penggunaan rejuvenator pada perkerasan jalan yang menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement akan membantu dalam meningkatkan kualitas dari RAP yang dihasilkan. Rejuvenator merupakan bahan additif yang ditambahkan ke dalam campuran RAP, dan biasanya memiliki batasan optimum dosis rejuvenatornya. Rejuvenator ini membantu dalam mengurangi tingkat kekakuan dari RAP yang di akibatkan oleh penuaan aspal (Tran et al., 2017). Hal ini membuat RAP yang memiliki tingkat kekakuan tinggi yang akan mempengaruhi kekuatan struktural jalan jika melebihi batas optimum dari tingkat RAP .



Gambar 4. 7 NonBio rejuvenator (Xu et al., 2021)



Gambar 4. 8 Bio-Rejuvenator (Davide, 2020)

Rejuvenator bisa berupa Non Bio-Rejuvenator atau Bio-Rejuvenator seperti pada *Gambar 4.2* dan *Gambar 4.3* yang dibedakan berdasarkan asal dari rejuvenator tersebut. Bahan additif ini memiliki banyak jenis dan untuk Bio-Rejuvenator bisa seperti Waste Vegetable Oil,

Municipal Waste, Soy Agent, Oleic Acid yang dihasilkan dari sisa minyak goreng, dan masih banyak lagi. Rejuvenator yang bersifat bio ini akan sangat menguntungkan untuk mengurangi limbah lingkungan seperti sampah, minyak goreng bekas dan limbah lainnya.

Setiap jenis rejuvenator memiliki karakteristik dan juga menghasilkan efek yang berbeda pada RAP yang dikerjakan (Zaumanis & Mallick, 2015). Dengan banyak rejuvenator yang digunakan ini maka kita perlu mengetahui apa saja efek dari beberapa rejuvenator yang umum digunakan pada RAP. Rangkuman dari analisa hasil dari tiap jenis rejuvenator disajikan di *tabel 4.2*. Tabel ini akan memberikan kita garis besar efek dan fungsi kegunaan dari tiap rejuvenator. Hal ini membantu dalam memilih penggunaan rejuvenator yang cocok untuk tiap kondisi daerah pembangunan jalan menggunakan RAP.

Pada *Tabel 4.2* menunjukkan penggunaan bio-rejuvenator seperti Waste Cooking Oil (WCO) yang merupakan limbah minyak goreng menunjukkan potensi besar dalam memperbaiki kinerja campuran RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) di Indonesia. Rejuvenator ini terbukti efektif dalam mengembalikan fleksibilitas campuran aspal tua, menjadikannya lebih tahan terhadap retak, terutama dalam kondisi panas yang ekstrem. Kemampuan rejuvenator ini dalam menahan retak dan deformasi dalam suhu yang tinggi ini sangat relevan untuk kondisi iklim tropis Indonesia, di mana suhu tinggi dan beban lalu lintas berat sering kali menjadi tantangan utama pada konstruksi jalan.

Selain itu, ketersediaan bahan baku seperti minyak goreng bekas di Indonesia sangat melimpah (Dannur Lambang, 2024). Limbah ini dapat dengan mudah diolah menjadi bio-rejuvenator yang ramah lingkungan dan ekonomis. Dengan pemanfaatan material lokal seperti minyak goreng bekas dari rumah tangga, restoran, atau industri makanan, penerapan bio-rejuvenator dapat mendukung kebijakan keberlanjutan sekaligus mengurangi ketergantungan pada material baru dan impor dari luar negeri.

Dari segi teknis, bio-rejuvenator ini memiliki kecocokan yang sangat baik dengan kebutuhan konstruksi jalan di Indonesia. Campuran aspal dengan rejuvenator menunjukkan ketahanan yang luar biasa terhadap deformasi permanen pada suhu tinggi seperti rutting, yang penting untuk jalan nasional dengan beban lalu lintas berat. Dosis optimal yang telah ditentukan, seperti 3%-10%, dapat dengan mudah diimplementasikan menggunakan teknologi pencampuran modern yang sudah tersedia di wilayah Indonesia, seperti drum mix plant. Dengan kemampuan ini, bio-rejuvenator tidak hanya meningkatkan kinerja campuran RAP tetapi juga memperpanjang umur perkerasan jalan.

Tabel 4. 2 Hasil dari Rejuvenator Waste Cooking Oil (sisa minyak goreng)

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(B. Li et al., 2023)	WASTE VEGETABLE OIL (WVO) [1.Dibutylphthalate (DBP) berfungsi sebagai bahan Plasticizer. 2.PS toughening agent. 3.C5–6# Meningkatkan viskositas dan resistan terhadap panas.]	Standar test China, JTGE20-2011	1.WVO 6 % adalah dosis yang optimal; dan dengan menanmbah dosis lebih dari 6% hanya akan membuat aspal lebih lembut. 2.Proporsi Campuran Terbaik untuk WVO adalah ; DBP 30%, 4% PS Toughening Agent, dan 9% Petroleum Resin	1. WVO rejuvenator mampu membuat RAP dengan ketahanan terhadap Panas yang lebih tinggi dari penggunaan aspal biasa. 2. Hasil RAP dapat mencapai hingga 50% penggunaan RAP.lentur. 3.Menurunkan Viskositas campuran - 44.07%
(Sadeghi et al., 2024b)	Oleic Acid (OA) Waste Cooking OIL [Terbuat Dari Sisa-sisa penggunaan Minyak Goreng dimana 45% dari minyak goreng mengandung Oleic Acid].	Sampel bitumen sesuai standard ASTM-D1559	OA dengan dosis 15% memiliki Hasil yang maximal dalam menahan penuaan dan dalam menahan Deformasi	1. Hasil Pengujian menunjukan OA rej. memiliki performa penuaan 10% lebih baik dibanding dengan Aspal Murni. 2. Penggunaan RAP mencapai 50% maximal dengan memakai rejuvenator OA. 3. Viskositas -39.23%
(Capitão et al., 2023)	Waste Cooking Oil (WVO) Diolah dari limbah minyak goreng.	HMA (Hot-Mix Asphalt)	1. Dosis optimum berada pada 10%	1. RAP yang bisa dikerjakan bisa mencapai 80% komposisi RAP dengan adanya kenaikan tingkat kekakuan dari campuran dihasilkan. 2. Komposisi RAP menjadi 60% Kekuatan terhadap deformasi sama dengan penggunaan agregat murni.

Tabel 4.2 (lanjutan) Tabel Hasil dari Rejuvenator Waste Cooking Oil (sisa minyak goreng)

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Zargar et al., 2012)	Waste Cooking Oil Diolah dari sisa minyak penggorengan	HMA (<i>Hot Mix Asphalt</i>)	Dosis WCO ini berada di 3-4%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu memberikan hasil yang lebih baik dalam hal penuaan dari pada penggunaan aspal murni. 2. Mampu mencapai maximum RAP 40-50% tanpa ada masalah pengurangan kekuatan yang signifikan dibanding campuran aspal murni. 3. Menurunkan Viskositas campuran - 38.29%

Penerapan bio-rejuvenator dengan olahan sisa minyak goreng di Indonesia tidak hanya menawarkan solusi teknis untuk meningkatkan kinerja jalan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Pemanfaatan limbah minyak goreng untuk bio-rejuvenator membantu mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus menekan biaya material baru. Dengan kombinasi potensi keberlanjutan, ketersediaan bahan baku yang melimpah, dan kecocokan teknis, bio-rejuvenator Waste Cooking Oil dapat menjadi solusi untuk mendukung pembangunan jalan yang efisien dan ramah lingkungan di Indonesia.

Penggunaan rejuvenator berbasis Municipal Waste pada *Tabel 4.3*, yang terdiri dari 30% waste plastic dan 70% bio-waste. Rejuvenator ini memiliki potensi signifikan dalam memanfaatkan limbah kota untuk meningkatkan kinerja campuran RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) karena berdasarkan penelitian oleh (Hu et al., 2024), bahan ini dihasilkan dari limbah organik yang bisa didapatkan dari berbagai kota disetiap negara. Hal ini menunjukkan bahwa bahan yang digunakan relevan dengan limbah yang terdapat di Indonesia.

Tabel 4. 3 Hasil rejuvenator Municipal Waste

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Hu et al., 2024)	<p>Municipal Waste Rejuvenator (30% Waste Plastic dan 70% Bio Waste) : Rej-A, Rej-B .</p> <p>[1. Rej-A : Campuran dari crude polymer dan bio-waste pyrolysis dense fractions 2. Rej-B : Campuran dari filtered polymer dan bio-waste pyrolysis wax..]</p>	Standar test China, JTGE20-2011	14% adalah Dosis yang optimal bagi Rej-A dan Rej-B dan menambah dosis Rejuvanator ini mengurangi kualitas RAP.	<p>1. Rej-A : a. Mengembalikan Sifat Aspal tua untuk bisa menahan Deformasi seperti aspal murni. b. Mampu menahan <i>Fatigue</i> sedikit lebih baik dari Aspal Murni baru. c. Kurang dalam Menahan Panas dibandingkan dengan aspal baru d. Kurang stabil dalam Performa di panas.</p> <p>2. Rej-B : a. Mampu mengembalikan sifat aspal yang tua ke keadaan baru dan memiliki performa yang stabil dalam suhu yang rendah dan tinggi. b. RAP yang dihasilkan adalah Bitumen yang digunakan sebagai binder untuk perkerasan jalan lentur. 3. Menurunkan viskositas campuran -32.11 %</p>

Rej-A, yang merupakan campuran dari crude polymer dan bio-waste pyrolysis dense fractions, menunjukkan kemampuan untuk mengembalikan sifat aspal tua sehingga mampu menahan deformasi seperti rutting. Namun, kinerja Rej-A memiliki beberapa keterbatasan. Meskipun dapat mempertahankan sifat fatigue sedikit lebih baik dibandingkan aspal murni, Rej-A kurang stabil dalam kondisi panas, sehingga performanya dalam kondisi suhu tinggi lebih rendah dibandingkan rejuvenator lainnya. Selain itu, peningkatan dosis Rej-A dapat mengurangi kualitas RAP, sehingga diperlukan dosis optimal sebesar 14% untuk menjaga kinerja campuran yang stabil. Dalam penerapan di Indonesia, Rej-A cocok digunakan pada jalan dengan beban lalu lintas sedang dan kondisi lingkungan yang memiliki suhu tinggi.

Rej-B, yang terdiri dari filtered polymer dan bio-waste pyrolysis wax, menunjukkan hasil yang lebih stabil dibandingkan Rej-A. Rej-B mampu mengembalikan sifat aspal tua dengan tingkat viskositas yang lebih rendah, sekaligus mempertahankan kinerja campuran dalam kondisi suhu rendah dan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Rej-B dapat menurunkan viskositas

campuran RAP sebesar 32.11%, yang menunjukkan efektivitasnya dalam melembutkan aspal tua dan meningkatkan fleksibilitas campuran. Selain itu, Rej-B menghasilkan campuran RAP yang hampir setara dengan aspal murni dalam hal deformasi permanen dan stabilitas. Dalam konteks penerapan di Indonesia, Rej-B memiliki potensi besar untuk digunakan pada jalan arteri dan jalan nasional yang memiliki beban lalu lintas tinggi, terutama di wilayah dengan kondisi suhu ekstrem.

Keunggulan utama dari rejuvenator berbasis municipal waste ini adalah kemampuannya untuk memanfaatkan limbah kota, yang melimpah di Indonesia, sebagai bahan baku yang ramah lingkungan dan ekonomis. Limbah plastik dan bio-waste dapat diperoleh dengan mudah dari daerah perkotaan, sehingga penerapan Rej-A dan Rej-B tidak hanya memberikan solusi teknis tetapi juga mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Selain itu, dengan dosis optimal sebesar 14%, rejuvenator ini dapat diaplikasikan menggunakan teknologi pencampuran yang sudah tersedia di Indonesia, seperti drum mix plant, tanpa memerlukan modifikasi besar pada infrastruktur pencampuran.

Namun, penting untuk mempertimbangkan kondisi lingkungan tropis di Indonesia. Sifat Rej-A yang kurang stabil dalam suhu tinggi dapat menjadi tantangan di wilayah dengan suhu lingkungan ekstrem, sehingga pemilihan rejuvenator harus disesuaikan dengan lokasi proyek. Di sisi lain, Rej-B memberikan performa yang lebih baik dalam kondisi suhu tinggi, menjadikannya pilihan yang lebih unggul untuk jalan dengan lalu lintas berat di daerah perkotaan. Secara keseluruhan, rejuvenator berbasis municipal waste memberikan solusi inovatif untuk mengurangi limbah kota sekaligus meningkatkan kinerja campuran RAP di Indonesia. Dengan potensi penggunaan Rej-A dan Rej-B, Indonesia dapat meningkatkan efisiensi material jalan sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan.

Pada Tabel 4.4, rejuvenator ini menunjukkan beberapa tantangan teknis dalam penerapannya di Indonesia. Meskipun efektif pada suhu rendah, dosis di atas 15% dapat mengurangi kemampuan campuran RAP dalam menahan suhu tinggi, yang menjadi tantangan di wilayah tropis Indonesia dengan suhu lingkungan yang ekstrem. Kelebihan yang bisa didapatkan dari penggunaan rejuvenator ini adalah Indonesia yang memiliki ketersediaan bahan baku melimpah, seperti minyak kedelai dan glycerol, yang dapat dimanfaatkan untuk memproduksi Soy Agent secara lokal. Hal ini mendukung efisiensi ekonomi dengan menekan biaya produksi sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan.

Tabel 4. 4 Hasil dari Rejuvantor Soy Agent

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Al-Tarawneh, 2024)	Soy Agent Rejuvenator Terbuat dari campuran Soybean Oil dan Glycerol dengan Bantuan catalyst	.Warm mix Asphalt (WMA)	1. 10% merupakan dosis yang optimal untuk soy agent Rejuvenator. 2. Menambah lebih dari 15% Soy Agent hanya akan mengurangi efektivitas dari Performa RAP dalam menahan Suhu	1. Dengan Dosis Optimal 10% maka RAP yang dihasilkan memiliki performa yang baik dalam Suhu Rendah. 2. dosis 10% akan memenuhi kebutuhan properti viskositas mengembikan seperti aspal baru dari RAP yang dihasilkan. 3, RAP yang dihasil mencapai maximum pada 40% dengan penggunaan Rejuvenator Soy-Agent dan digunakan sebagai Lapisan permukaan jalan. 4. Menurunkan Viskositas Campuran -60%

Penggunaan Tall Oil pada *Tabel 4.5* sebagai rejuvenator pada campuran RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) memiliki potensi besar untuk diterapkan di Indonesia. Tall Oil, yang dihasilkan dari proses pembuatan di pabrik kertas, mampu mengembalikan kinerja campuran aspal tua, memungkinkan penggunaan RAP hingga 50% tanpa menurunkan kekuatan struktural jalan. Efektivitas Tall Oil dalam mengurangi tingkat penuaan aspal tua, meningkatkan fleksibilitas campuran, serta menahan deformasi dan retakan menjadikannya solusi yang cocok untuk kondisi tropis Indonesia. Suhu tinggi dan curah hujan yang tinggi, yang dapat mempercepat penuaan campuran aspal, dapat diatasi dengan penerapan rejuvenator ini. Namun, penerapan Tall Oil di Indonesia juga menghadapi beberapa tantangan. Produksi Tall Oil sebagai produk sampingan dari industri pulp dan kertas mungkin masih terbatas di Indonesia, sehingga diperlukan upaya untuk mengembangkan teknologi ekstraksi atau mengimpor bahan ini dari negara produsen utama.

Tabel 4. 5 Hasil dari Rejuvenator Tall Oil

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Mazzoni et al., 2018)	Tall oil Dihasilkan dari proses pembuatan di pabrik kertas.	<i>Hot Mix Asphalt</i> (HMA)	1. 3% adalah dosis yang optimum dan penambahan dosis yang berlebihan hanya membuat campuran mengalami penurunan ketahanan terhadap deformasi dan retakan.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tambahan rejuvenator membuat aspal dengan campuran 50% memiliki tingkat penuaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa memakai rejuvenator. 2. Lebih tahan di suhu yang rendah dibandingkan dengan campuran tanpa tambahan rejuvenator. 3. Hasil mampu mencapai penggunaan RAP hingga 50% tanpa adanya tanda pengurang kekuatan struktural jalan. 4. Menurunkan Viskositas campuran -21.94%

Ketiga jenis bio-rejuvenator pada Tabel 4.6 menawarkan solusi ramah lingkungan yang efektif untuk meningkatkan kinerja campuran RAP di Indonesia. Dengan kemampuan untuk menurunkan viskositas campuran, meningkatkan fleksibilitas, dan memanfaatkan bahan baku lokal, bio-rejuvenator ini mendukung prinsip keberlanjutan dalam pembangunan jalan. Namun, penerapannya perlu disesuaikan dengan kebutuhan spesifik setiap proyek jalan. Sunflower Oil merupakan pilihan yang cocok untuk wilayah dengan suhu tinggi karena kemampuannya menjaga fleksibilitas campuran, meskipun memerlukan sumber daya bahan baku yang lebih luas. Paraffinic Oil unggul untuk jalan dengan beban lalu lintas berat, menawarkan ketahanan yang lebih baik terhadap penuaan campuran, tetapi memerlukan biaya produksi yang lebih tinggi. Sementara itu, Cottonseed Oil lebih cocok untuk proyek skala kecil dengan beban lalu lintas ringan hingga sedang, sekaligus mendukung pengelolaan limbah industri kapas di Indonesia.

Tabel 4. 6 Hasil dari Rejuvenator Sunflower, Paraffinic, dan Cottonseed oil

BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Król et al., 2016)	Sunflower Oil Ini adalah minyak yang diekstrak dari biji bunga matahari. Mengandung trigliserida, dengan kandungan asam linoleat yang tinggi	WMA (Warm Mix Asphalt)	Dosis optimum berada di 3.75%-5%	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu mengembailikan sifat asli aspal yang sudah tua dan memiliki performa yang baik terhadap retakan dalam suhu yang tinggi. 2. Menurunkan Viskositas Campuran -34.88%
(Mogawer et al., 2015)	Paraffinic oil	HMA (<i>Hot Mix Asphalt</i>)	Dosis penggunaan Optimum pada 10% memberikan hasil maximal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Campuran RAP mencapai maximum 50% dan memiliki ketahan penuaan terhadap <i>fatigue</i> yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan Agregat murni 2. Hasil terhadap kekuatan keseluruhan campuran masih sedikit dibawah penggunaan agregat murni 3. Menurunkan Viskositas Campuran -29.52%.
(da Costa et al., 2024)	Cottonseed Oil	WMA (Warm Mix Asphalt)	10 % CO dapat membantu dalam memulihkan karakteristik RAP secara maximal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Penggunaan rejuvenator CO ini dapat membuat penggunaan RAP 33% maximal. 2. Melebihi RAP 33% hanya akan mengurangi kekuatan campuran. Dan tingkat kakukan juga meningkat. 3. Menurunkan Viskositas - 37.42%

Tabel 4. 7 Hasil dari Rejuvenator Tipe PG

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Sun et al., 2019)	PG 58-22	WMA (Warm Mix Asphalt)	3% adalah dosis optimum dan melebihi ini hanya akan mengurangi kekuatan dari RAP.	1. Campuran Perkerasan jalan dengan rejuvenator ini mampu mencapai penggunaan RAP hingga 70% dan melebihi ini hanya akan ada pengurangan ketahanan terhadap keretakan di suhu tinggi 2. Penurunan Viskositas -58.8 %
(Y. Zhang et al., 2023)	PG58-28	HMA (<i>Hot Mix Asphalt</i>)	3% merupakan dosis penggunaan optimum	1. Persentase maximum RAP yang dicapai yaitu 30 % dengan adanya penambahan 3% rejuvenator 2. Ketahanan Terhadap retak dalam Suhu yang tinggi 10% lebih baik dari penggunaan Agregat murni 3. Penurunan Viskositas -47.51%

Berdasarkan data pada *Tabel 4.7*, penerapan rejuvenator non-bio PG64-22, PG58-22, dan PG58-28 memiliki potensi besar untuk diimplementasikan di Indonesia, terutama dalam mendukung pemanfaatan material daur ulang (RAP) pada perkerasan jalan. Penggunaan rejuvenator ini memungkinkan peningkatan proporsi RAP dalam campuran aspal hingga 60-70%, yang sejalan dengan kebutuhan pembangunan berkelanjutan di Indonesia, di mana material jalan bekas dapat diolah kembali untuk mengurangi penggunaan bahan baku baru. Selain itu, rejuvenator ini juga terbukti mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap retak pada suhu tinggi dan rendah, yang sangat relevan dengan kondisi iklim tropis di Indonesia.

Tabel 4.7 (lanjutan) Hasil dari Rejuvenator Tipe PG

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Bazoobandi et al., 2023)	PG64-22 dan PG58-22	ASTM-D1559 standard	Dosis optimum untuk PG64-22 dan PG58-22 adalah 4.0% dan 4.6%	<p>1. Penggunaan kedua rejuvenator ini bisa mencapai maximum 60% RAP, namun untuk penggunaan dengan RAP 60% PG58-22 memiliki tingkat ketahanan lebih tinggi dari PG64-22 yaitu 13% dan 6% lebih tinggi dari campuran tanpa rejuvenator.</p> <p>2. Kedua rejuvenator tidak memiliki masalah dalam menahan keretakan dalam suhu tinggi maupun rendah.</p> <p>3. Penurunan Viskositas untuk PG-64-22 dan PG58-22 adalah 23.5% dan 44.49%</p>

Namun, terdapat beberapa tantangan dalam penerapannya. Salah satunya adalah ketersediaan bahan rejuvenator seperti PG64-22, PG58-22, dan PG58-28 yang masih bergantung pada impor, sehingga dapat meningkatkan biaya proyek dan memakan waktu. Oleh karena itu, pengembangan bahan rejuvenator lokal yang lebih ekonomis menjadi sangat penting. Tantangan lainnya adalah penyesuaian standar, seperti ASTM-D1559, dengan spesifikasi teknis yang berlaku di Indonesia. Selain itu, kapasitas teknologi lokal, termasuk pelatihan tenaga kerja dalam pencampuran rejuvenator dan penyesuaian dosis yang optimal, juga perlu ditingkatkan. Infrastruktur pencampuran dan pengolahan material RAP di beberapa daerah mungkin juga belum memadai, sehingga memerlukan investasi tambahan.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, beberapa rekomendasi dapat diajukan. Pertama, diperlukan penelitian tambahan di Indonesia untuk mengevaluasi kinerja rejuvenator dengan material RAP lokal dalam berbagai kondisi iklim dan beban lalu lintas. Kedua, pengembangan

bahan rejuvenator berbasis lokal, seperti dari limbah industri atau bahan alami, perlu didorong untuk mengurangi biaya dan ketergantungan impor. Ketiga, perlu adanya sosialisasi dan pelatihan bagi pemerintah daerah dan kontraktor terkait teknologi rejuvenator, termasuk metode pencampuran dan penggunaan dosis yang optimal. Terakhir, peningkatan infrastruktur pencampuran dan peralatan di daerah-daerah terpencil perlu diprioritaskan untuk mendukung penerapan rejuvenator secara merata.

Secara keseluruhan, penerapan rejuvenator non-bio di Indonesia sangat relevan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pembangunan jalan, tetapi memerlukan strategi khusus untuk mengatasi tantangan yang ada. Analisis ini dapat menjadi dasar untuk menyusun langkah-langkah implementasi lebih lanjut dalam mendukung infrastruktur jalan yang ramah lingkungan di Indonesia.

Tabel 4. 8 Hasil dari Rejuvenator Vacuum Bottom

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Sadeghi et al., 2024b)	Vacuum Bottom (VB) Buangan Sisa Dari Crude Oil yang di dapat dari perusahaan minyak dan di campurkan dengan tambahan Polymer	ASTM-D1559 standard	20% dosis yang Optimal untuk mengembalikan Sifat asli dari aspal tua.	1. rejuvenator ini bisa membuat RAP yang dihasilkan Memiliki Performa yang baik dalam Menahan terjadinya Cracking pada Suhu yang tinggi. 2. Penurunan Viskositas - 54.23%

Vacuum Bottom (VB) sebagai rejuvenator non-bio pada Tabel 4.8 memiliki potensi besar untuk diterapkan di Indonesia, mengingat kemampuannya mengembalikan sifat asli aspal tua dan menahan terjadinya retakan pada suhu tinggi. VB, yang merupakan buangan sisa dari crude oil yang dicampur dengan polimer, sangat relevan untuk digunakan di Indonesia karena dapat memanfaatkan limbah industri minyak yang melimpah terutama di wilayah seperti Balikpapan. Selain itu, kebutuhan perbaikan jalan di Indonesia sangat tinggi akibat kerusakan yang disebabkan oleh iklim tropis dengan suhu ekstrem dan intensitas hujan tinggi, sehingga

penggunaan VB dapat memperpanjang umur jalan sekaligus mengurangi biaya perawatan jangka panjang. Dosis optimal sebesar 20% juga memungkinkan VB untuk diintegrasikan dengan mudah ke dalam teknologi pencampuran aspal yang sudah umum digunakan di Indonesia, seperti *Hot Mix Asphalt* (HMA). Namun perlu dilihat, terdapat beberapa tantangan dalam penerapannya. Ketersediaan dan distribusi VB mungkin menjadi kendala, terutama di wilayah terpencil yang jauh dari kilang minyak.

Untuk mendukung penerapannya, penelitian tambahan di Indonesia perlu dilakukan untuk mengukur kinerja VB pada RAP lokal dalam berbagai kondisi iklim dan lalu lintas. Kerja sama dengan industri minyak juga penting untuk memastikan pasokan VB sebagai produk limbah yang dimanfaatkan secara produktif. Pemerintah dan institusi seperti Kementerian PUPR dapat mendorong penggunaannya melalui regulasi dan sosialisasi, sementara investasi pada infrastruktur dan teknologi pencampuran dapat mempercepat adopsi VB. Dengan strategi yang tepat, VB dapat menjadi solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk mendukung infrastruktur jalan di Indonesia.

Tabel 4. 9 Hasil dari Rejuvenator Waste Greas

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Devulapalli et al., 2020)	Waste Grease produk yang dihasilkan dari industri pengolahan makanan.	SMA (Stone Matric Asphalt)	6% dan juga dengan kandungan RAP 30% adalah campuran SMA yang paling optimal dari Campuran ini.	1. WG meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dalam campuran, terutama pada kandungan RAP yang lebih rendah dan optimalnya adalah 30%, membantu mengurangi masalah seperti pengelupasan. 2. Pada dosis WG yang tinggi (9%), WG dapat menyebabkan terjadinya pengurangan efektifitas ketahanan RAP. Hasil yang paling optimal adalah dosis 6%. 3. Penurunan Viskositas -33.8%

Waste Grease (WG) pada Tabel 4.9 sebagai rejuvenator non-bio memiliki potensi besar untuk diterapkan di Indonesia, terutama karena bahan ini berasal dari limbah industri

pengolahan makanan, yang sangat relevan dengan kondisi Indonesia sebagai negara dengan industri makanan dan restoran yang berkembang pesat. WG tidak hanya mendukung pengelolaan limbah organik secara berkelanjutan, tetapi juga dapat meningkatkan kinerja campuran aspal dengan mengurangi viskositas hingga 33.8%, memungkinkan proses pencampuran dan pemadatan pada suhu yang lebih rendah sehingga menghemat energi dan biaya. Dengan dosis optimal 6% dan kandungan RAP hingga 30%, WG mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap kelembapan dan mengurangi risiko pengelupasan, yang sering terjadi di wilayah tropis dengan kondisi cuaca ekstrem seperti di Indonesia. Penggunaan WG dalam campuran *Stone Mastic Asphalt* (SMA), yang umum digunakan untuk jalan dengan lalu lintas berat, juga menjadikannya solusi yang relevan untuk kebutuhan infrastruktur jalan di Indonesia.

Namun, terdapat tantangan yang perlu diatasi dalam penerapannya. Ketersediaan dan kualitas limbah WG mungkin tidak konsisten di seluruh wilayah, dan proses pengolahan limbah diperlukan untuk memastikan stabilitas serta kompatibilitasnya dengan campuran aspal. Selain itu, regulasi teknis di Indonesia perlu disesuaikan untuk mendukung penggunaan WG sebagai rejuvenator, termasuk uji lapangan untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar lokal. Kesadaran tentang manfaat dan metode penggunaan WG juga perlu ditingkatkan melalui sosialisasi dan pelatihan bagi kontraktor dan pemerintah daerah.

Tabel 4. 10 Hasil dari Rejuvenator Waste Engine Oil (sisa minyak mesin)

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Devulapalli et al., 2020)	Waste Engine Oil (WEO) Diambil dari sisa minyak mobil, alat besar, dan mesin.	SMA (<i>Stone Mastic Asphalt</i>)	Dosis Optimal adalah 6% WEO dan 40% untuk RAP.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dengan dosis yang optimal WEO ini dapat membuat campuran yang lebih fleksibel dan mudah dikerjakan seperti bitumen baru. 2. Dosis yang melebihi 10% akan mengurangi fungsi binding dari RAP yang di hasilkan. 3. Penggunaan Rejuvenator ini memiliki tingkat kehanan kelembaban sedikit lebih tinggi dari Waste Grease (WG) 4. Pengurang Viskositas -37.8%

Waste Engine Oil (WEO) seperti pada *Tabel 4.10* memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai rejuvenator non-bio di Indonesia, mengingat ketersediaannya yang melimpah dari limbah kendaraan, alat berat, dan mesin. Dengan dosis optimal 6% dan kandungan RAP hingga 40%, WEO mampu menghasilkan campuran aspal yang fleksibel dan mudah dikerjakan, menyerupai bitumen baru. Keunggulan lain dari WEO adalah tingkat ketahanannya terhadap kelembapan yang sedikit lebih baik dibandingkan Waste Grease (WG), yang relevan untuk kondisi cuaca tropis di Indonesia. Namun, penggunaan WEO juga menghadapi tantangan besar, seperti kandungan senyawa beracun, termasuk logam berat, yang dapat mencemari lingkungan jika tidak melalui proses pemurnian yang memadai. Selain itu, pada dosis lebih dari 10%, WEO dapat mengurangi fungsi binding RAP, sehingga kontrol dosis menjadi faktor kritis dalam penerapannya. Sistem pengumpulan limbah minyak bekas di Indonesia juga masih belum optimal, sehingga memastikan pasokan WEO yang berkualitas menjadi tantangan tersendiri. Regulasi teknis dan standar penggunaan WEO juga perlu disusun untuk menjamin keamanan dan efektivitasnya sebagai rejuvenator. Oleh karena itu, penerapan WEO membutuhkan investasi dalam teknologi pemurnian limbah, penguatan sistem pengumpulan, dan penelitian tambahan untuk mengevaluasi kinerjanya di berbagai kondisi lokal.

Ethyltetralin dan Rubber Oil pada *Tabel 4.11* sebagai rejuvenator non-bio memiliki potensi besar untuk diterapkan di Indonesia, mengingat kemampuannya meningkatkan performa campuran aspal dengan material daur ulang (RAP). Ethyltetralin, yang berbasis aromatik dan dapat diperoleh dari industri kimia, memiliki ketahanan terhadap retak pada suhu tinggi, yang relevan untuk kondisi jalan di iklim tropis Indonesia. Namun, kekuatan struktural campuran dengan Ethyltetralin masih lebih rendah dibandingkan aspal murni, sehingga lebih cocok untuk jalan dengan beban lalu lintas sedang. Di sisi lain, Rubber Oil, yang berasal dari limbah ban bekas, memungkinkan penggunaan RAP hingga 50% dan menghasilkan campuran dengan sifat mendekati aspal murni. Hal ini menjadikannya pilihan yang baik untuk proyek jalan berat, seperti jalan tol, sekaligus mendukung pengelolaan limbah ban secara berkelanjutan.

Namun, penerapannya menghadapi tantangan, seperti ketersediaan Ethyltetralin yang masih bergantung pada impor dan kurangnya infrastruktur pengolahan limbah ban untuk memproduksi Rubber Oil secara lokal. Selain itu, regulasi teknis dan panduan penggunaannya belum tersedia di Indonesia, sehingga diperlukan penelitian tambahan untuk menentukan dosis optimal dan evaluasi kinerja di kondisi lokal.

Tabel 4. 11 Hasil dari Rejuvenator jenis Aromatik

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Liu et al., 2021)	Ethyltetralin (rejuvenator berbasis aromatik) Produk yang bisa didapat dari perusahaan kimia contohnya seperti perusahaan besar sigma-aldrich	Standar test China, JTGE20-2011	10 % dari rejuvenator ini memberikan hasil yang maksimal bagi campuran RAP.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hasil yang diperoleh dari rejuvenator ini adalah memiliki ketahanan retak yang tinggi di suhu yang rendah. 2. Kurang efisien dalam suhu yang tinggi dan efek penuaan terjadi lebih cepat dibanding dengan aspal yang murni. 3. Kekuatan Secara keseluruhan struktural tidak dipulihkan seperti aspal murni yaitu sampai 84.35% sehingga kekuatannya dibawah penggunaan aspal murni. 4. Penurunan Viskositas -37.5%
(J. Zhang et al., 2019)	Rubber Oil (tipe Aromatik) Merupakan hasil minyak ekstraksi dari limbah Ban kendaraan.	HMA (<i>Hot Mix Asphalt</i>)	10% adalah dosis optimum rubber oil	<ol style="list-style-type: none"> 1. Persentase RAP mampu mencapai 50% dengan tambahan 10% Rubber oil tetapi mengalami penurunan kualitas kekuatan secara keseluruhan. 2. Persentase RAP optimum dengan 10% rubber oil berada di 35% RAP dan dalam campuran ini rejuvenator dapat mengembalikan sifat aspal tua menjadi baru dan memiliki ketahanan terhadap <i>fatigue</i> sama dengan agregat murni. 3. Penurunan Viskositas -27.54%

RRD pada Tabel 4.12 memiliki potensi besar untuk diterapkan di Indonesia sebagai rejuvenator non-bio yang mampu mengembalikan sifat asli aspal daur ulang (RAP) hingga tingkat penggunaan 50%. Dengan dosis optimal 6%, RRD memungkinkan pencampuran RAP tanpa mengurangi kekuatan struktural campuran aspal, menjadikannya cocok untuk berbagai jenis jalan, termasuk jalan raya dengan lalu lintas berat. Teknologi ini juga mendukung keberlanjutan dengan memanfaatkan material daur ulang, mengurangi limbah konstruksi, dan menekan kebutuhan material baru yang lebih mahal. Selain itu, penggunaan standar ASTM-D1559 pada penelitian RRD memungkinkan teknologi ini untuk diadaptasi pada infrastruktur pencampuran

yang sudah ada di Indonesia, sehingga dapat diimplementasikan tanpa memerlukan investasi besar dalam alat baru.

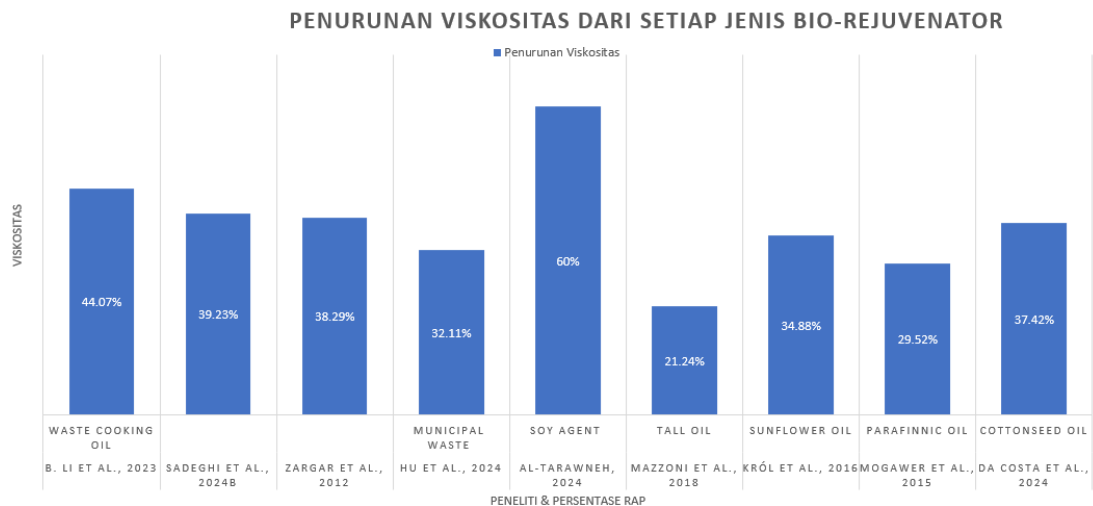
Namun, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti ketersediaan RRD yang mungkin masih bergantung pada impor, kesadaran dan pemahaman kontraktor terhadap teknologi ini, serta perlunya pengujian tambahan untuk memastikan kinerja RRD dalam kondisi iklim tropis dan beban lalu lintas di Indonesia. Untuk mendukung penerapan RRD, diperlukan penelitian lebih lanjut, pengembangan pasokan lokal, sosialisasi teknologi kepada pihak terkait, serta peningkatan infrastruktur pencampuran RAP.

Tabel 4. 12 Hasil dari Rejuvenator RRD

NON BIO-REJUVENATOR				
PENELITI	TIPE REJUVENATOR	JENIS CAMPURAN	DOSIS	HASIL
(Caputo et al., 2023)	RRD	ASTM-D1559 standard	Dosis yang digunakan pada penelitian ini adalah 6%	<p>1. Hasil yang dihasilkan bisa mencapai penggunaan RAP 50% dan dengan dosis 6% RRD sifat asli dari aspal RAP bisa dikembalikan.</p> <p>2. Hasil dari kekuatan struktural mencapai seperti penggunaan agregat murni dan tidak ada pengurangan kekuatan secara keseluruhan.</p> <p>3. Penurunan Viskositas - 18.86%</p>

4.4 Pengaruh Rejuvenator terhadap Viskositas Campuran Perkerasan Jalan

Grafik pada *Gambar 4.8* menunjukkan tren penurunan viskositas pada campuran RAP dengan berbagai bio-rejuvenator, dengan variasi penurunan mulai dari 21.24% hingga 60%. Secara keseluruhan, tren ini menunjukkan bahwa sebagian besar rejuvenator memberikan penurunan viskositas yang cukup signifikan, dengan nilai rata-rata penurunan berada di sekitar 35%-40%. Tren ini mengindikasikan bahwa rejuvenator secara umum efektif dalam melembutkan aspal tua, meskipun tingkat efektivitasnya berbeda tergantung pada komposisi kimia dan mekanisme kerja masing-masing.



Gambar 4. 9 Grafik dari Viskositas dari tiap Jenis Bio-Rejuvenator

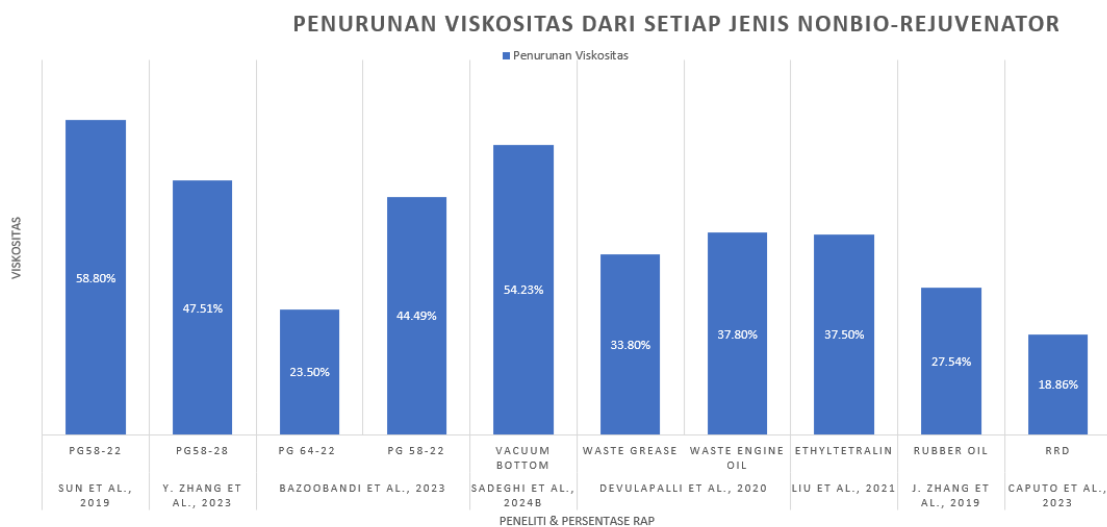
Selain itu, terdapat pola di mana penurunan viskositas yang lebih besar cenderung memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi pada campuran, yang dapat meningkatkan kemampuan campuran untuk menahan deformasi permanen dan retakan. Namun, campuran dengan penurunan viskositas yang terlalu rendah mungkin tidak cukup fleksibel, sehingga dapat meningkatkan risiko kerusakan dini, terutama dalam kondisi beban lalu lintas tinggi atau suhu lingkungan ekstrem. Sebaliknya, campuran dengan penurunan viskositas yang terlalu tinggi dapat menjadi terlalu lunak, yang dapat mengurangi kekuatan strukturalnya.

Tren keseluruhan ini relevan dengan penerapan di Indonesia, di mana kondisi iklim tropis dengan suhu tinggi dan curah hujan tinggi menuntut campuran aspal yang fleksibel tetapi tetap memiliki stabilitas struktural yang baik. Dengan penurunan viskositas rata-rata dalam rentang 35%-40%, campuran RAP di Indonesia dapat memanfaatkan rejuvenator untuk mencapai keseimbangan antara fleksibilitas dan kekakuan, yang sesuai dengan kondisi jalan dan beban lalu lintas di wilayah ini. Namun, perbedaan dalam tingkat penurunan viskositas juga menunjukkan bahwa tidak semua rejuvenator dapat diterapkan secara seragam, dan perlu dilakukan pemilihan jenis rejuvenator yang tepat untuk setiap proyek berdasarkan kebutuhan spesifik kondisi lingkungan dan teknis.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa penggunaan rejuvenator memberikan manfaat signifikan dalam memperbaiki kinerja campuran RAP dengan mengurangi viskositas, tetapi juga menekankan pentingnya memilih tingkat penurunan viskositas yang sesuai untuk menjaga keseimbangan performa campuran. Tren ini memberikan arahan penting bagi

penerapan teknologi rejuvenator dalam konteks pembangunan jalan yang berkelanjutan di Indonesia.

Dari data yang tersedia pada *Gambar 4.8* dan *Gambar 4.9*, terbukti bahwa penggunaan rejuvenator, baik non-bio maupun bio, secara signifikan mampu mengurangi kekakuan campuran aspal dengan menurunkan viskositas binder, sehingga memungkinkan penggunaan RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) dalam persentase besar, bahkan hingga 50% dan lebih. Pada kategori non-bio rejuvenator, PG 58-22 dan Vacuum Bottom menunjukkan penurunan viskositas tertinggi masing-masing sebesar 58.80% dan 54.23%, menjadikannya sangat efektif dalam memulihkan fleksibilitas binder yang teroksidasi. Sementara itu, rejuvenator berbasis limbah seperti Waste Grease (33.8%) dan Rubber Oil (27.54%) menunjukkan kinerja moderat yang cukup untuk aplikasi jalan dengan lalu lintas sedang hingga berat. Di sisi lain, bio-rejuvenator seperti Soy Agent mencatat penurunan viskositas tertinggi sebesar 60%, diikuti oleh Waste Cooking Oil (44.07%) dan Cottonseed Oil (37.42%), menunjukkan bahwa bio-rejuvenator berbasis minyak alami memiliki kemampuan serupa dengan non-bio rejuvenator dalam memulihkan sifat binder.



Gambar 4. 10 Grafik Penurunan Viskositas dari Penambahan NonBio-Rejuvenator

Secara rata-rata, non-bio rejuvenator mencatat penurunan viskositas sebesar 38.90%, sedangkan bio-rejuvenator memiliki rata-rata penurunan sebesar 37.42%. Perbedaan yang hanya sebesar 1.48% ini menunjukkan bahwa kedua jenis rejuvenator memiliki efektivitas yang hampir setara dalam mendukung penggunaan RAP. Namun, bio-rejuvenator memiliki keunggulan tambahan berupa keberlanjutan lingkungan karena berasal dari sumber daya

terbarukan seperti limbah minyak dan minyak nabati, sedangkan non-bio rejuvenator sering kali lebih unggul dalam hal ketersediaan bahan dan kestabilan kinerja. Dengan demikian, baik non-bio maupun bio-rejuvenator dapat memberikan solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pembangunan jalan di Indonesia, tergantung pada kebutuhan teknis dan prioritas lingkungan masing-masing proyek.

4.5 Dampak Lingkungan dari penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement

4.5.1 Analisa Dampak Lingkungan

Penggunaan RAP (Recycled Asphalt Pavement) merupakan langkah strategis yang dapat memberikan dampak positif yang signifikan bagi kelangsungan lingkungan (Milad et al., 2020b). Salah satu kontribusi utamanya adalah dalam hal pengurangan emisi gas rumah kaca, karena produksi aspal dari bahan baku baru membutuhkan energi yang lebih besar, yang pada gilirannya menghasilkan emisi karbon yang tinggi. Dengan memanfaatkan RAP, proses produksi aspal menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, penggunaan RAP dapat mengurangi ketergantungan pada material alam, seperti batuan agregat dan bitumen, yang keberadaannya semakin terbatas dan memerlukan proses ekstraksi yang akan merusak lingkungan.

Tabel 4.13 menunjukkan bahwa penggunaan RAP dapat memberikan manfaat yang besar bagi upaya untuk menjaga lingkungan, terutama dalam mengurangi konsumsi energi yang dibutuhkan dalam produksi aspal baru. Dengan menggunakan material daur ulang, energi yang digunakan dalam proses pengolahan aspal dapat dikurangi. Keberlanjutan penggunaan RAP dalam pembangunan infrastruktur jalan tidak hanya menguntungkan secara ekonomi, tetapi juga mendukung pengurangan emisi karbon di bagian konstruksi. Oleh karena itu, integrasi RAP dalam proyek-proyek infrastruktur dapat menjadi salah satu solusi utama untuk mewujudkan pembangunan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Penelitian ini menyaring banyak sumber mengenai beberapa aspek, yaitu seluruh siklus hidup (life-cycle) secara keseluruhan, transportasi, produksi, dan konstruksi. Pada setiap aspek, analisis dilakukan untuk melihat sejauh mana kontribusi penggunaan RAP dalam mengurangi dampak lingkungan. Pada aspek produksi, misalnya, penggunaan RAP dapat mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru seperti agregat, yang memerlukan energi dan proses ekstraksi yang tinggi. Dengan memanfaatkan RAP, proses produksi menjadi lebih hemat energi dan lebih sedikit menghasilkan emisi karbon. Begitu pula pada aspek transportasi, penggunaan RAP mengurangi volume material yang perlu diangkut, yang pada gilirannya mengurangi emisi yang

dihasilkan oleh kendaraan angkut, sehingga berdampak positif pada pengurangan jejak karbon dalam tahap ini.

Namun, meskipun penggunaan RAP menawarkan sejumlah manfaat lingkungan, ada beberapa dampak buruk yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah potensi penurunan kualitas material jika RAP tidak dikelola dengan baik, terutama jika rasio penggunaan RAP terlalu tinggi seperti yang dibahas pada *poin 4.1* tanpa memperhatikan kualitas dan komposisi material yang digunakan .

Tabel 4. 13 Hasil Dampak Lingkungan dari Penggunaan RAP

<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>			
<i>Peneliti</i>	<i>Aspek</i>	<i>Dampak</i>	<i>Metode</i>
(Ai et al., 2023)	Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> • Dengan penggunaan 20% RAP campuran SMA pengurangan terhadap Carbon menurun 11,59% . • Penggunaan 30%, dan 50% RAP campuran HMA adanya pengurangan Carbon sebesar 23,56% dan 26,67 %. 	Hybrid Life Cycle Assessment (LCA)
	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Dengan penggunaan 20% RAP campuran SMA pengurangan terhadap Carbon menurun 2,44% . • Penggunaan 30%, dan 50% RAP campuran HMA adanya pengurangan Carbon sebesar 8,13% dan 13,2 %. 	
	Konstruksi	<ul style="list-style-type: none"> • Dengan penggunaan 20% RAP campuran SMA pengurangan terhadap Carbon menurun 4,71%. • Penggunaan 30%, dan 50% RAP campuran HMA adanya pengurangan Carbon sebesar 10,38% dan 11,61 %. 	
(Oreto et al., 2021a)	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Pengurangan penggunaan material cement 75% dengan Campuran Coldmix dengan 70% pada layer base pada konstruksi jalan menggunakan CTB. 	Life Cycle Assement – Standard EN-14040
	Konstruksi	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan 70% RAP campuran Cold Mix dapat Mengurangi hingga 11,5% emisi gas dari penggunaan HMA biasa. 	
(yenni et al, 2011)	Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> • Ada perbedaan 98% pengurangan Carbon secara total dari penggunaan RAP dengan transportasi yang digunakan pada setiap km. 	Life Cycle Assement – SNI ISO-14040

Tabel 4.13 (lanjutan) Hasil Dampak Lingkungan dari Penggunaan RAP

<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>			
<i>Peneliti</i>	<i>Aspek</i>	<i>Dampak</i>	<i>Metode</i>
(Assaf & Abu Abdo, 2024)	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> Campuran Perkerasan dengan 40% RAP membantu mengurangi konsumsi air sebesar 31,9%. Campuran perkerasan 40% RAP memberikan kontribusi pengurangan emisi Carbon sebesar 7,3%. 	Life Cycle Assessment ISO-14040
	Konstruksi	<ul style="list-style-type: none"> Campuran dengan RAP 40% ini membantu mengurangi emisi Carbon 16.5% 	
(Aurangzeb et al., 2014)	Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan penggunaan 30%, 40%, dan 50% RAP memberikan pengurangn emisi Carbon sebesar 9,67%, 12,89%, dan 16,12%. 	Hybrid Life Cycle Assessment (LCA)
	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan penggunaan 30%, 40%, dan 50% RAP memberikan pengurangn emisi Carbon sebesar 7,97%, 10,63%, dan 13,29%. 	
(Turk et al., 2016)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan Cold Mix in place recycling memberikan pengurangan sebesar 15% pengurangan konsumsi bahan bakar dari minyak bumi dan emisi carbon 12% dibanding dengan campuran HMA in plant. 	Life Cycle Assessment (LCA) berbasis model CML 2001
(Pakes et al., 2018)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan RAP dengan CIR (Cold in Place recycling) memberikan pengurangan konsumsi energy, Emisis Carbon, dan Konsumsi air sebersar 23%, 23%, dan 20% dibandingkan dengan cara konvensional in plant. Adanya penghematan 37% agregat dengan menggunakan CIR sebagai penangan <i>resurfacing</i>. 	Life Cycle Assessment ISO-14040
(Yang et al., 2015)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan penggunaan mencapai 42% RAP memberikan pengurangan emisi carbon dan konsumsi energy sebesar 22% dan 20%. 	Life Cycle Assessment ISO 14040
(Huang et al., 2009)	Seluruh life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan Campuran HMA 25% RAP dan tambahan 10% fly ash memberikan pengurangan emisi Carbon sebesar 4% 	Lyfe Cycle Assessment ISO 14040
(Mukherjee, 2016)	Seluruh Life Cyle	<ul style="list-style-type: none"> Dengan Penggunaan Campuran Perkerasan dengan 15%, 20% RAP, 35% RAP, emisi Carbon bisa dikurangi sebesar 12,5%, 34,3%, 38,73% dibandingkan dengan campuran tanpa RAP. 	Life Cycle Assessment berbasis ISO 14040/44

Tabel 4.13 (lanjutan) Hasil Dampak Lingkungan dari Penggunaan RAP

<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>			
<i>Peneliti</i>	<i>Aspek</i>	<i>Dampak</i>	<i>Metode</i>
(Mateos et al., 2024)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Campuran HMA dengan tambahan 10% RAP memberikan dampak pengurangan terhadap emisi Carbon sampai 5% dan 6% konsumsi energi 	Lyfe Cycle Assessment ISO 14040
(Chen et al., 2024b)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Campuran SMA RAP dengan Persentase 40% memberikan 23% lebih ekonomis dari Campuran biasa. 	Life Cycle Assessment (LCA) dengan fokus pada aspek temporal dari emisi gas rumah kaca (GHG)
(Giani et al., 2015)	Seluruh Life-cycle	<ul style="list-style-type: none"> Perkerasan Jalan dengan 20% Binder Layer HMA Mengurangi carbon yang dihasilkan sebesar 6,8% dan konsumsi air 6.1% dibandingkan dengan penggunaan campuran asfalt biasa. Perkerasan Jalan dengan 20% Binder layer HMA ditambah dengan 30% layer WMA bisa mengurangi carbon dan konsumsi air sebesar 11,9% dan 18,33% 	Life Cycle Assessment (LCA) berbasis standar ISO 14040/44
(Santos et al., 2018)	Seluruh Life-cycle	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan campuran WMA RAP 50% memberikan kontribusi pengurangan emisi Carbon Sebesar 6% dibanding dengan tanpa RAP. 	Life Cycle Assessment ISO 14040
(Assaf & Abu Abdo, 2024)	Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> Campuran perkerasan dengan 40% RAP memberikan hasil penambahan konsumsi air sebesar 3,7%, dan pengurangan emisi carbon sebesar 3,7%. 	Hybrid Life Cycle Assessment (LCA)
(Xiao et al., 2019)	Seluruh life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Campuran WMA dengan tambahan 30% RAP dibandingkan dengan 15% RAP lebih mengurangi kontribusi emisi Carbon 68%. 	Life Cycle Assessment ISO 14040
(Chen & Wang, 2018)	Seluruh life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> Dengan penggunaan RAP Campuran HMA 50% bisa membantu mengurangi dampak buruk kepada lingkungan sebesar 10%. 	Life Cycle Assessment ISO 14040

Analisis data menunjukkan bahwa penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) secara global terus meningkat sebagai solusi keberlanjutan dalam industri perkerasan jalan. Tren utama yang terlihat adalah fokus pada pengurangan emisi karbon dan konsumsi energi di semua tahapan siklus hidup perkerasan, mulai dari transportasi, produksi, hingga konstruksi. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa penambahan RAP hingga 50% pada campuran HMA atau SMA secara konsisten memberikan pengurangan emisi karbon yang signifikan, dengan rata-rata penurunan berkisar antara 15% hingga 68%, tergantung pada proporsi RAP yang digunakan dan efisiensi teknologi pencampuran. Metode seperti Cold In-Place Recycling (CIR) juga semakin populer karena efisiensinya dalam mengurangi dampak lingkungan, terutama dalam konsumsi energi dan pengurangan penggunaan bahan mentah baru. Selain itu, penggunaan RAP dengan teknologi Warm Mix Asphalt (WMA) menunjukkan peningkatan dalam efisiensi energi hingga 35%, yang mencerminkan tren global menuju pendekatan yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan.

Metode Life Cycle Assessment (LCA) yang digunakan dalam banyak penelitian sangat relevan untuk diterapkan di Indonesia karena standar yang digunakan, seperti ISO 14040/44, sudah diakui secara internasional dan sesuai dengan regulasi lingkungan yang dipakai di Indonesia. Pendekatan berbasis LCA memberikan analisis menyeluruh terkait emisi karbon, konsumsi energi, dan efisiensi material, yang sangat mendukung kebutuhan pembangunan jalan yang berkelanjutan di Indonesia. Selain itu, teknologi seperti Warm Mix Asphalt (WMA) dan Cold In-Place Recycling (CIR) yang didukung oleh LCA dapat diterapkan dengan baik di Indonesia mengingat kesesuaiannya dengan kondisi iklim tropis dan kebutuhan penghematan energi. Dengan standar yang sudah sesuai, penerapan teknologi berbasis RAP menjadi lebih praktis, efisien, dan relevan untuk mendukung pembangunan jalan yang ramah lingkungan di Indonesia. Namun, penguatan kapasitas teknis dan adopsi regulasi berbasis LCA tetap diperlukan untuk mengoptimalkan implementasi teknologi ini.

4.6 Dampak Biaya dari penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Penerapan penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement tidak hanya memberikan dampak positif pada lingkungan, tetapi juga memiliki dampak positif bagi ekonomi. Penggunaan RAP menunjukkan penghematan 31%-32% biaya secara total dibandingkan penggunaan campuran yang biasanya (Gu et al., 2019; Timm et al., 2021). Pada penelitian ini, tujuannya adalah untuk mengumpulkan seluruh jurnal/referensi yang meneliti tentang dampak ekonomi dari penggunaan RAP. Oleh karena itu pada tabel 4.6 akan dirangkum semua hasil dari jurnal dari

berbagai sumber, untuk kita bisa melihat tren dari dampak pengurangan dan penambahan biaya dari penggunaan RAP.

Tabel 4.14 Dampak Ekonomi Penggunaan RAP

<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>		
<i>Peneliti</i>	<i>Aspek</i>	<i>Dampak</i>
(Oreto et al., 2021b).	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Penggantian campuran aspal virgin dengan RAP mengurangi biaya produksi dengan persentase yang besar. Campuran dengan menggunakan RAP ini dapat menurunkan biaya produksi sebesar 74%, dibandingkan dengan penggunaan material baru.
(Jahanbakhsh et al., 2020).	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan RAP juga mengurangi biaya material sebesar 82%. Ini terutama disebabkan oleh penggunaan RAP yang jauh lebih murah dibandingkan dengan bahan-bahan baru seperti agregat dan binder.
(Gu et al., 2019)	Seluruh Life-cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan Campuran Cold Recycled Asphalt mix ini membantu penghematan 4% dalam biaya transportasi dan pengurang 32% keseluruhan life-cycle dari RAP.
(Asadi Azadgoleh et al., 2024)	Seluruh Life Cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan Campuran Cold Recycled asphalt mix mampu memberikan pengurangan 22-31% biaya dibandingkan dengan penggunaan campuran biasa yang kebanyakan disebabkan dari material dan transportasi.
(Moins et al., 2023)	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Pengurangan Sebesar 20-25% biaya dengan penggunaan Campuran HMA RAP 56% dibanding dengan campuran yang memakai material murni baru.
(Yousefi et al., 2024)	Seluruh Life Cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan RAP 40% dengan Campuran WMA ini membantu dalam pengurangan biaya sebesar 38% dalam segi material.
(Coleri et al., 2018)	Produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Biaya material untuk penggunaan RAP dengan persentase 20-50% bisa mencapai 15-40% penghematan biaya.
(Qiao et al., 2019)	Konstruksi	<ul style="list-style-type: none"> • Penghematan biaya sebesar 14-34% dengan RAP 30-50% digunakan dengan Campuran SMA.
(Xiao et al., 2019)	Seluruh life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Mix dengan 15% dan 30% RAP bisa menghemat biaya sebesar 5,52-5,81 \$ dan 14,19-15,55 \$ untuk setiap 1 ton RAP.
(Riekstins et al., 2024)	Seluruh Life Cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan Campuran HMA dengan 50% RAP mampu mengurangi kebutuhan akan penggunaan agregat murni sebesar 44.5%. • Secara keseluruhan pengurangan biaya yang bisa dicapai dengan Campuran HMA 50% RAP ini bisa mencapai 17.6%

Tabel 4.14 (lanjutan) Dampak Ekonomi Penggunaan RAP

<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>		
<i>Peneliti</i>	<i>Aspek</i>	<i>Dampak</i>
(Moins et al., 2023)	Transportasi	<ul style="list-style-type: none"> • Adanya penghematan biaya sebesar 6% dengan penggunaan RAP 56% campuran HMA dibanding campuran biasnyan
	Konstruksi	<ul style="list-style-type: none"> • Dengan Campuran RAP 56% HMA biaya konstruksi bisa dikurangkan sebesar 8-10%
(H. Li et al., 2023)	Seluruh Life-Cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan Cold in Place recycling sebagai pemeliharaan jalan mampu memberikan pengurangan biaya sebesar 66.45%.

Pada Tabel 4.14 ini memberikan wawasan bahwa penggunaan RAP dengan berbagai macam campuran mampu mengurangi biaya. Biaya transportasi mampu dikurangi hingga 6% dengan penggunaan 56% RAP. Biaya produksi bisa dikurangi berkisar 25% sampai 40% dengan penggunaan persentase RAP 50% ke 56%. Untuk biaya konstruksi mampu memberikan pengurangan biaya yang lebih besar tergantung dengan jenis campurannya, untuk HMA pengurangan biaya bisa mencapai 10% dengan penggunaan 56% RAP dan untuk campuran SMA bisa lebih tinggi lagi hingga 34% dengan penggunaan 50% RAP. Secara keseluruhan penggunaan RAP bisa menghemat banyak biaya dibandingkan dengan penggunaan material murni.

Penghematan biaya ini bisa berbeda tergantung dengan bagaimana cara kita memproses campuran perkerasan jalan. Metode campuran yang langsung dikerjakan ditempat seperti CIR (Cold in place recycled) bisa menghemat biaya transportasi kendaraan, dan untuk campuran lain seperti penggunaan HMA, SMA, dan WMA untuk biaya konstruksinya akan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran CIR. Hal ini terjadi karena perbedaan metode pengcampuran untuk tiap campuran dan juga yang disesuaikan dengan kondisi di perkerasan jalan.