

CONSTRUCTION AND MATERIAL JOURNAL



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**



JURUSAN TEKNIK SIPIL
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

The Construction and Material Journal (**e-ISSN 2655-9625**) is a journal that provides a comprehensive overview of the fundamentals of civil engineering, including structure, material technology, construction methods, construction management, water resources and environmental engineering, geotechnical engineering, surveying, and highway engineering. It is published by a vocational school. This journal is published by **Politeknik Negeri Jakarta** and is intended for engineering students, lecturers, professionals, and engineering association members in civil works and other communities associated with civil engineering. This journal has been granted Rank 4 accreditation pursuant to Decree Number 10/C/C3/DT.05.00/2025. The journal provides authors with the opportunity to publish their papers in civil engineering based on their research results, work experience, and other relevant factors. However, these papers are not permitted to be published elsewhere. The journal issues will be published twice annually (in May and October) beginning in 2024.

An anonymous peer-review system is employed to select articles in order to ensure objectivity and a level playing field for all contributors, irrespective of their educational background. The iThenticate software was employed as the plagiarism instrument, and the Digital Object Identifier (DOI) address issued from Crossref is <http://dx.doi.org/10.32722/cmj>.

PENINGKATAN EFISIENSI DALAM PROSES PENGAMBILAN KEPUTUSAN MANAJEMEN KONSTRUKSI MELALUI INTEGRASI DIGITAL TECHNOLOGY: A LITERATURE REVIEW

Anggie Ria Paulina Purba, Ferenia Safura, Pungky Dharma Saputra
211-229

PENINGKATAN EFISIENSI DALAM PROSES PENGAMBILAN KEPUTUSAN MANAJEMEN KONSTRUKSI MELALUI INTEGRASI DIGITAL TECHNOLOGY: A LITERATURE REVIEW

STUDI PEMANFAATAN LIMBAH MINYAK JELANTAH SEBAGAI REJUVENATOR PADA CAMPURAN RAP

Irma Sepriyanna, Leksmono S Putranto, Bambang Sugeng Subagio, Najid Najid
231-244

STUDI PEMANFAATAN LIMBAH MINYAK JELANTAH SEBAGAI REJUVENATOR PADA CAMPURAN RAP

ANALISIS DAYA DUKUNG SPUN PILE BERDASARKAN HASIL DATA KALENDERING DAN STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

Daniel Efriand Hutabarat, Yelvi Yelvi
245-259

ANALISIS DAYA DUKUNG SPUN PILE BERDASARKAN HASIL DATA KALENDERING DAN STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

EVALUASI KELAYAKAN STRUKTURAL DAN KEPADATAN LAPISAN AC-BC MENGGUNAKAN METODE CORE DRILL

Ilham Gusrinaldi, Rafki Imani, Akbar Alfa
261-278

STUDI PEMANFAATAN LIMBAH MINYAK JELANTAH SEBAGAI REJUVENATOR PADA CAMPURAN RAP

Irma Sepriyanna^{*1}, Leksmono S. Putranto¹, Bambang Sugeng Subagio², Najid¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara

²Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung

e-mail : irma.328212009@stu.untar.ac.id

ABSTRACT

The increasing demand for pavement materials necessitates more sustainable solutions, one of which is the utilization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) containing aged asphalt from recycled layers. However, the high incorporation of RAP often faces challenges such as increased stiffness, reduced ductility, and degradation of viscoelastic properties due to aging. In this context, waste cooking oil (WCO) has attracted significant attention as an eco-friendly and cost-effective rejuvenator. This study presents a systematic literature review on the application of WCO in RAP mixtures, focusing on its chemical characteristics, effects on rheological and mechanical properties, implementation challenges, and performance enhancement strategies through chemical modification and additive incorporation. The findings indicate that WCO effectively reduces binder viscosity, improves flexibility, enhances low-temperature cracking resistance, and extends the fatigue life of RAP mixtures. However, excessive WCO content may reduce Marshall stability and rutting resistance. Synergistic approaches such as polymer addition, nano-material incorporation, or chemical pre-treatment have proven effective in addressing these limitations. This review highlights WCO's potential as a sustainable rejuvenator while emphasizing the need for further research on dosage optimization, quality standardization, and long-term performance evaluation to support large-scale industrial implementation.

Keywords: Waste cooking oil; Rejuvenator; RAP; Rheological properties; Sustainability

ABSTRAK

Pertumbuhan kebutuhan material perkerasan jalan menuntut solusi yang lebih berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) yang mengandung aspal tua hasil daur ulang. Namun, penggunaan RAP dalam kadar tinggi sering menghadapi permasalahan terkait peningkatan kekakuan, penurunan keuletan, dan degradasi sifat viskoelastis akibat proses penuaan. Dalam konteks ini, limbah minyak jelantah (waste cooking oil, WCO) telah banyak diteliti sebagai rejuvenator alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis. Studi ini bertujuan melakukan tinjauan sistematis terhadap penelitian terdahulu mengenai pemanfaatan WCO pada campuran RAP, meliputi karakteristik kimia, pengaruh terhadap sifat reologi dan mekanik, tantangan implementasi, serta strategi peningkatan performa melalui modifikasi kimia dan penambahan aditif. Hasil sintesis menunjukkan bahwa WCO secara signifikan menurunkan viskositas dan meningkatkan fleksibilitas aspal RAP, memperbaiki ketahanan retak suhu rendah, serta meningkatkan umur kelelahan campuran. Namun, pada dosis tinggi, WCO dapat menurunkan stabilitas Marshall dan ketahanan terhadap deformasi permanen. Pendekatan sinergis seperti penambahan polimer, nanomaterial, atau perlakuan awal kimiawi terbukti efektif mengatasi kelemahan tersebut. Studi ini menegaskan bahwa WCO berpotensi besar sebagai rejuvenator berkelanjutan, namun diperlukan penelitian lanjutan terkait optimasi dosis, standar mutu, dan evaluasi umur layan jangka panjang untuk mendukung implementasi skala industri.

Kata kunci: Limbah minyak jelantah; Rejuvenator; RAP; Sifat reologi; Keberlanjutan

PENDAHULUAN

Pertumbuhan infrastruktur jalan yang pesat di berbagai negara telah meningkatkan kebutuhan terhadap material perkerasan, khususnya aspal dan agregat. Namun, keterbatasan sumber daya alam non-terbarukan serta meningkatnya biaya produksi menuntut adanya strategi berkelanjutan dalam industri perkerasan jalan. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah pemanfaatan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), yaitu material hasil daur ulang dari lapisan perkerasan lama yang mengalami kerusakan. RAP memiliki potensi signifikan untuk mengurangi konsumsi agregat baru dan aspal murni, sekaligus menurunkan biaya serta dampak lingkungan dari industri konstruksi jalan (Zaumanis & Mallick, 2015; Aurangzeb et al., 2014).

Meskipun demikian, penggunaan RAP dalam proporsi tinggi sering terkendala oleh sifat aspal tua yang telah mengalami proses penuaan (*aging*). Proses ini ditandai dengan meningkatnya kekakuan, menurunnya keuletan, serta bertambahnya kandungan oksigen dalam bentuk gugus karbonil dan sulfoxide, yang pada akhirnya berdampak pada kinerja campuran aspal seperti menurunnya ketahanan retak dan kelelahan (*fatigue resistance*) (Zhao et al., 2020; Shu et al., 2012). Untuk mengatasi hal ini, diperlukan bahan tambahan yang berfungsi sebagai *rejuvenator* guna mengembalikan sebagian sifat viskoelastis aspal yang hilang akibat penuaan.

Berbagai jenis rejuvenator telah diteliti, mulai dari bahan berbasis minyak nabati, minyak mineral, hingga aditif sintetis. Salah satu kandidat yang semakin mendapat perhatian adalah limbah minyak jelantah atau *waste cooking oil* (WCO). WCO merupakan produk sampingan dari aktivitas rumah tangga, restoran, dan industri makanan yang jumlahnya terus meningkat seiring

pertumbuhan populasi. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat mencemari lingkungan dan menimbulkan permasalahan kesehatan (Chen et al., 2014). Oleh karena itu, pemanfaatan WCO sebagai rejuvenator tidak hanya menawarkan solusi teknis dalam memperbaiki kinerja RAP, tetapi juga solusi lingkungan dalam mengurangi limbah yang sulit terurai.

Beberapa studi menunjukkan bahwa penambahan WCO dapat menurunkan viskositas aspal tua, meningkatkan keuletan, dan memperbaiki kinerja pada suhu rendah (Yang et al., 2014; Zaumanis et al., 2016). Namun, penggunaan WCO secara langsung juga menimbulkan tantangan, seperti stabilitas kimia yang rendah, kandungan asam lemak bebas yang tinggi, serta potensi penurunan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen pada suhu tinggi (*rutting resistance*) (Feng et al., 2013). Oleh karena itu, berbagai pendekatan modifikasi dan perlakuan awal terhadap WCO—seperti *pre-treatment*, esterifikasi, maupun kombinasi dengan aditif lain—sedang dikembangkan untuk meningkatkan efektivitasnya sebagai rejuvenator (Wang et al., 2018; Hao et al., 2021).

Dalam konteks pembangunan infrastruktur berkelanjutan, studi literatur mengenai pemanfaatan WCO pada campuran RAP menjadi penting untuk memetakan potensi, tantangan, serta arah pengembangan lebih lanjut. Artikel ini bertujuan menyajikan tinjauan komprehensif terhadap penelitian-penelitian sebelumnya mengenai mekanisme kerja WCO sebagai rejuvenator, pengaruhnya terhadap sifat fisik dan mekanik campuran RAP, serta strategi peningkatan performa melalui modifikasi kimia maupun sinergi dengan aditif lain. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah bagi pengembangan

teknologi perkerasan jalan yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur untuk meninjau pemanfaatan limbah minyak jelantah (*waste cooking oil*, WCO) sebagai rejuvenator pada campuran *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Metodologi yang digunakan terdiri dari tiga tahap utama:

1. Pengumpulan Literatur

Literatur diperoleh dari basis data internasional bereputasi seperti Scopus, Web of Science, dan ScienceDirect dengan rentang waktu 2010–2025. Kata kunci yang digunakan antara lain: “*waste cooking oil*”, “*rejuvenator*”, “*reclaimed asphalt pavement*”, dan “*aged asphalt binder*”.

2. Seleksi Literatur

Artikel yang dipilih adalah penelitian yang secara khusus membahas WCO pada RAP atau aspal tua, baik melalui uji laboratorium (reologi, mekanik, kimia) maupun studi komprehensif. Artikel yang tidak relevan, duplikat, atau tanpa data empiris dikeluarkan dari analisis.

3. Analisis dan Sintesis

Data dari artikel terpilih ditinjau untuk melihat karakteristik kimia dan fisik WCO pengaruh penambahan WCO terhadap sifat reologi dan mekanik RAP dan tantangan penggunaan WCO dan strategi peningkatannya (misalnya kombinasi dengan aditif atau *treated WCO*).

Hasil analisis kemudian disintesis secara naratif-komparatif untuk mengidentifikasi temuan utama, kesenjangan penelitian, dan peluang pengembangan ke depan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rejuvenator pada RAP

Penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dalam campuran beraspal merupakan salah satu strategi penting dalam mewujudkan infrastruktur jalan yang berkelanjutan. RAP adalah material hasil daur ulang dari lapisan perkerasan lama yang mengandung aspal tua (*aged binder*) dan agregat. Namun, sifat aspal dalam RAP umumnya telah mengalami proses penuaan akibat oksidasi, volatilitas komponen ringan, serta paparan panas dan radiasi ultraviolet, yang menyebabkan peningkatan kekakuan, penurunan kelenturan, dan berkurangnya ketahanan terhadap retak (Zaumanis & Mallick, 2015; Huang et al., 2020).

Untuk mengembalikan sifat aspal tua mendekati karakteristik aspal murni, ditambahkan bahan *rejuvenator*. Rejuvenator merupakan aditif yang berfungsi menyeimbangkan kembali komposisi kimia aspal, terutama dengan meningkatkan fraksi *maltenes* dan mengurangi dominasi *asphaltenes* yang menyebabkan kerapuhan (Shen, Airey, & Hunter, 2007; Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014). Secara prinsip, rejuvenator bekerja dengan cara menurunkan viskositas, meningkatkan keuletan, serta memperbaiki ketahanan campuran terhadap *fatigue* dan retak pada suhu rendah.

Berbagai jenis rejuvenator telah dikembangkan untuk diaplikasikan pada RAP, yang secara umum dapat dikategorikan menjadi:

1. Produk minyak berbasis petroleum, seperti *aromatic extract oil*, *residual oil*, dan *refinery by-products*. Bahan ini kaya akan fraksi aromatik yang dapat meningkatkan proporsi *maltenes* pada aspal tua (Shen et al., 2007).

2. Bahan berbasis bio-oil atau limbah organik, misalnya *waste cooking oil* (WCO), minyak nabati, dan limbah lignin. Bio-based rejuvenator dinilai lebih ramah lingkungan serta mendukung konsep ekonomi sirkular (Yin et al., 2017; Zhu et al., 2020).
3. Rejuvenator sintetis dan polimer, seperti *polyphosphoric acid* (PPA) dan polimer termoplastik, yang tidak hanya memulihkan sifat kimia aspal tetapi juga meningkatkan stabilitas jangka panjang (Ali et al., 2020).

Secara kimiawi, rejuvenator menambahkan kembali senyawa aromatik dan minyak ringan yang hilang akibat penuaan, sehingga memperbaiki rasio *asphaltenes/maltenes* (Zaumanis et al., 2014). Hasil analisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) menunjukkan bahwa penambahan rejuvenator dapat menurunkan intensitas gugus karbonil (C=O) dan sulfoxide (S=O) pada aspal tua, yang merupakan indikator oksidasi (Wang, Wang, & Apostolidis, 2018). Sementara itu, uji *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) memperlihatkan penurunan modulus kompleks (G^*) dan peningkatan sudut fasa (δ), yang mengindikasikan peningkatan fleksibilitas binder (Yin et al., 2017).

Penggunaan rejuvenator pada RAP terbukti mampu memperbaiki beberapa aspek kinerja campuran aspal, antara lain:

1. Viskositas: penambahan rejuvenator menurunkan nilai viskositas aspal RAP sehingga lebih mudah dicampur dan dipadatkan (Zaumanis et al., 2014).
2. Stabilitas Marshall: meskipun stabilitas cenderung menurun seiring penurunan kekakuan, nilai

ketahanan deformasi masih dapat dikendalikan melalui pengaturan kadar rejuvenator (Shen et al., 2007).

3. Ketahanan terhadap *rutting*: campuran RAP dengan rejuvenator memiliki kinerja *rutting* yang lebih baik dibanding RAP murni, meskipun kadang sedikit lebih rendah daripada aspal virgin (Huang et al., 2020).
4. Ketahanan *fatigue*: rejuvenator meningkatkan ketahanan terhadap retak akibat beban berulang dengan mengembalikan kelenturan binder (Zaumanis & Mallick, 2015).
5. Ketahanan retak suhu rendah: bio-oil rejuvenator seperti WCO mampu meningkatkan keuletan sehingga lebih tahan terhadap retak pada suhu rendah (Zhu et al., 2020).

Meskipun rejuvenator menunjukkan hasil yang menjanjikan, terdapat beberapa tantangan yang harus diperhatikan. Pertama, dosis yang tidak tepat dapat menurunkan kinerja struktural, terutama terhadap deformasi permanen. Kedua, keberlanjutan sumber bahan baku menjadi isu penting, sehingga bio-based rejuvenator seperti WCO, minyak alga, atau lignin-based oil menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan (Ali et al., 2020). Ketiga, diperlukan pemahaman jangka panjang terhadap stabilitas kimiawi hasil rejuvenasi, agar tidak hanya baik pada tahap awal tetapi juga tahan terhadap penuaan sekunder (*re-aging*).

Dengan demikian, penggunaan rejuvenator pada RAP bukan hanya solusi teknis untuk mengembalikan sifat binder tua, tetapi juga strategi menuju perkerasan beraspal yang lebih berkelanjutan dan ekonomis.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu tentang Rejuvenator pada RAP

Peneliti & Tahun	Jenis/Kadar Rejuvenator	Metode Uji	Hasil Utama
Shen, Airey, & Hunter (2007)	Minyak aromatik, 5–15% dari berat binder RAP	Viskositas, DSR, Marshall	Menurunkan viskositas RAP, meningkatkan keuletan, namun stabilitas Marshall sedikit menurun pada dosis tinggi.
Zaumanis, Mallick, & Frank (2014)	Rejuvenator komersial (bio-oil & petroleum-based), 6–12%	Marshall, Fatigue Test	Mengembalikan sifat binder mendekati virgin asphalt, meningkatkan ketahanan <i>fatigue</i> , tetapi rutting resistance berkurang pada dosis tinggi.
Zaumanis & Mallick (2015)	Bio-oil vs. minyak mineral	Review + Laboratorium	Bio-oil lebih ramah lingkungan, efektif menurunkan kekakuan, minyak mineral lebih stabil terhadap penuaan.
Yin, Arámbula-Mercado, & Martin (2017)	Bio-based rejuvenator (soybean oil, WCO), 6–10%	FTIR, DSR, Fatigue Test	Bio-oil meningkatkan fleksibilitas dan memperbaiki rasio asphaltene/maltene; WCO efektif untuk RAP tinggi (>40%).
Wang, Wang, & Apostolidis (2018)	Bio-oil dari biomassa, 5–15%	FTIR, Rheologi (DSR, BBR)	Mengurangi gugus karbonil (C=O) dan sulfoxide (S=O), meningkatkan ketahanan retak suhu rendah.
Huang, Shu, & Vukosavljevic (2020)	Rejuvenator minyak mineral, 8%	Marshall, Cracking Test	Meningkatkan ketahanan terhadap retak beban berulang, tetapi rutting resistance sedikit menurun.
Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb (2020)	Rejuvenator sintetis (PPA, polimer), 4–8%	DSR, MSCR, Fatigue Test	Efektif meningkatkan elastisitas, ketahanan rutting, dan stabilitas jangka panjang dibanding bio-oil.
Zhu, Yu, & Wu (2020)	Waste Cooking Oil (WCO), 6–12%	Marshall, Rheologi, Low-temp cracking	Menurunkan kekakuan binder, meningkatkan keuletan dan ketahanan retak suhu rendah, namun dosis >10% menurunkan stabilitas.

Waste Cooking Oil (WCO) sebagai Rejuvenator

Penggunaan kembali *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) merupakan salah satu strategi utama dalam perkerasan jalan berkelanjutan. Namun, binder dalam RAP mengalami proses penuaan (*aging*) akibat oksidasi, hilangnya fraksi ringan, dan paparan suhu tinggi selama masa layanan maupun proses daur ulang. Hal

ini menyebabkan peningkatan kekakuan, penurunan fleksibilitas, serta berkurangnya ketahanan terhadap deformasi dan retak (Zaumanis & Mallick, 2015; Huang et al., 2020). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan bahan *rejuvenator* yang mampu mengembalikan sifat kimia dan fisik aspal agar mendekati kondisi

aslinya. Salah satu kandidat yang banyak diteliti adalah *waste cooking oil* (WCO).

WCO merupakan minyak nabati atau hewani yang telah digunakan berulang kali dalam proses penggorengan. Kandungan utamanya berupa asam lemak bebas (*free fatty acids*), trigliserida, serta senyawa aromatik ringan yang memiliki kesamaan dengan fraksi *maltenes* dalam aspal (Zhu, Yu, & Wu, 2020). Dengan demikian, WCO berpotensi menggantikan fraksi ringan yang hilang dari aspal akibat penuaan. Selain keunggulan teknis, WCO menawarkan manfaat lingkungan dan ekonomi. Pemanfaatan limbah minyak goreng sebagai rejuvenator mendukung prinsip ekonomi sirkular, mengurangi pencemaran lingkungan akibat pembuangan sembarangan, serta menurunkan biaya produksi aspal modifikasi (Yin, Arámbula-Mercado, & Martin, 2017).

Secara kimiawi, penambahan WCO mampu menurunkan rasio *asphaltenes/maltenes* pada aspal tua. Hal ini terjadi karena asam lemak bebas dalam WCO berperan sebagai pelarut aromatik ringan yang dapat memecah aglomerasi *asphaltenes* (Wang, Wang, & Apostolidis, 2018). Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) menunjukkan bahwa WCO menurunkan intensitas gugus karbonil (C=O) dan sulfoxide (S=O), yang merupakan indikator oksidasi (Zhu et al., 2020). Dari sisi reologi, uji *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) memperlihatkan bahwa penambahan WCO menurunkan modulus kompleks (G^*) serta meningkatkan sudut fasa (δ), yang mengindikasikan peningkatan kelenturan binder (Yin et al., 2017).

WCO merupakan kandidat rejuvenator yang menjanjikan bagi campuran RAP, dengan keunggulan pada aspek teknis, lingkungan, dan ekonomi. Dengan pemilihan dosis yang tepat serta pengendalian kualitas bahan, WCO

mampu mengembalikan fleksibilitas binder, memperbaiki sifat reologi, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap retak dan deformasi. Ke depan, pengembangan WCO-treated melalui modifikasi kimia dan sinergi dengan aditif lain dapat memperluas aplikasinya dalam skala industri

Pengaruh WCO sebagai Rejuvenator pada Reologi RAP

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) umumnya memiliki sifat reologi yang kaku akibat proses penuaan aspal selama masa layan. Penuaan ini meningkatkan kadar fraksi *asphaltene* serta menurunkan fraksi *maltene*, sehingga binder menjadi rapuh, viskositas meningkat, dan kehilangan kemampuan deformasi viskoelastis yang seimbang (Zaumanis & Mallick, 2015). Oleh karena itu, diperlukan rejuvenator untuk mengembalikan distribusi fraksi kimia dan sifat reologi mendekati aspal murni. *Waste Cooking Oil* (WCO) terbukti efektif sebagai rejuvenator karena kandungan asam lemak bebas (*free fatty acids*), trigliserida terdegradasi, dan komponen aromatik yang mampu berinteraksi dengan fraksi *asphaltene* dalam RAP. Penambahan WCO dapat menurunkan viskositas dinamis binder RAP dan meningkatkan nilai *phase angle* (δ) pada uji *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), yang menunjukkan peningkatan perilaku viskoelastis mendekati aspal segar (Wang et al., 2018).

Pada pengujian *rutting parameter* ($G/\sin \delta$), RAP cenderung memiliki nilai tinggi yang mencerminkan ketahanan rutting tetapi disertai dengan kerapuhan. Penambahan WCO menurunkan nilai $G/\sin \delta$, menandakan pengurangan kekakuan, sehingga campuran lebih fleksibel. Namun, dosis WCO yang terlalu tinggi (>10%) dapat menurunkan ketahanan terhadap rutting secara signifikan (Zhu et al., 2020; Huang et al., 2020). Oleh karena itu, kadar optimal

umumnya berada pada rentang 5–8% terhadap berat binder RAP.

Dalam hal *fatigue parameter* ($G \cdot \sin \delta$)**, binder RAP tanpa rejuvenator menunjukkan nilai tinggi, menandakan kecenderungan mudah retak akibat kelelahan. Dengan penambahan WCO, nilai $G \cdot \sin \delta$ menurun, sehingga kemampuan menahan beban berulang meningkat (Yin et al., 2017; Ali et al., 2020). Perbaikan ini dihubungkan dengan peningkatan fraksi maltene yang memulihkan fleksibilitas binder.

Selain itu, pengujian BBR (*Bending Beam Rheometer*) menunjukkan bahwa WCO meningkatkan *creep compliance* (S) dan menurunkan nilai *m-value*, sehingga campuran lebih tahan terhadap retak pada suhu rendah (Wang et al., 2018). Hal ini membuktikan bahwa WCO tidak hanya memperbaiki sifat reologi pada suhu menengah–tinggi, tetapi juga meningkatkan ketahanan terhadap retak pada suhu rendah.

Secara kimiawi, hasil uji FTIR dan GC–MS mendukung temuan reologi tersebut. Gugus fungsional karbonil (C=O) dan sulfoxide (S=O) yang biasanya

meningkat akibat penuaan mengalami penurunan setelah penambahan WCO, menandakan proses rejuvenasi yang efektif (Zaumanis et al., 2014; Wang et al., 2018).

Dengan demikian, WCO sebagai rejuvenator pada RAP secara konsisten memperbaiki sifat reologi dengan:

1. Menurunkan viskositas dan meningkatkan *phase angle*.
2. Mengurangi kekakuan berlebih sehingga meningkatkan fleksibilitas.
3. Meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*).
4. Meningkatkan performa pada suhu rendah melalui peningkatan *creep compliance*.

Namun, efek ini sangat bergantung pada kadar WCO, di mana dosis yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas termal dan ketahanan *rutting*. Oleh karena itu, pemilihan kadar optimal dan potensi kombinasi dengan aditif lain (misalnya polimer atau nanomaterial).

Tabel 2. Hasil Studi Kadar WCO sebagai Rejuvenator RAP

Peneliti / Tahun	Kadar WCO	Metode Uji	Hasil Utama
Shu et al. (2012)	5–10%	Viskositas, Penetrasi, DSR	WCO menurunkan viskositas dan meningkatkan fleksibilitas binder RAP, namun dosis tinggi menurunkan <i>rutting resistance</i> .
Yang et al. (2014)	4–8%	Marshall, ITS, Uji Retak Suhu Rendah	WCO meningkatkan keuletan dan ketahanan retak suhu rendah, dengan kadar optimum sekitar 6%.
Feng et al. (2013)	5–15%	Marshall Stability, TSR	WCO menurunkan stabilitas Marshall dan meningkatkan risiko kelembaban, terutama pada kadar >10%.
Zaumanis et al. (2016)	3–9%	DSR, BBR, Uji Kelelahan	WCO memperbaiki parameter reologi, menurunkan kekakuan, dan meningkatkan umur kelelahan campuran RAP.
Wang et al. (2018)	5–10%	FTIR, GC–MS, DSR	WCO menurunkan intensitas gugus karbonil, memperbaiki keseimbangan maltenes–asphaltenes, dan meningkatkan ketahanan suhu rendah.
Hao et al. (2021)	5–12% (treated WCO)	DSR, MSCR, FTIR	Treated WCO memperbaiki stabilitas kimia, meningkatkan resistensi deformasi permanen, dan lebih unggul dibanding WCO tanpa perlakuan.
Zhao et al. (2020)	4–8%	DSR, LAS	WCO meningkatkan <i>phase angle</i> dan ketahanan kelelahan, tetapi perlu dikombinasikan dengan aditif lain untuk menjaga <i>rutting resistance</i> .

Pengaruh WCO sebagai Rejuvenator pada Sifat Fisik Campuran RAP

Beberapa penelitian melaporkan bahwa penambahan WCO pada RAP mampu memperbaiki sifat fisik binder, di antaranya:

1. Penurunan Viskositas

Penambahan WCO secara signifikan menurunkan viskositas binder RAP yang telah menua. Hal ini terjadi karena WCO mengandung asam lemak bebas dan trigliserida yang dapat melonggarkan ikatan molekul asphaltenes sehingga binder menjadi lebih encer dan mudah dicampur (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014).

2. Peningkatan Kelenturan (*Ductility*)

Aspal tua cenderung rapuh karena kehilangan fraksi ringan. WCO menambahkan kembali komponen tersebut sehingga meningkatkan keuletan binder, menjadikannya lebih tahan terhadap regangan tinggi sebelum mengalami keretakan (Yin, Arámbula-Mercado, & Martin, 2017).

3. Penurunan Titik Lembek (*Softening Point*)

Binder RAP umumnya memiliki titik lembek yang lebih tinggi karena sifatnya yang keras. Penambahan WCO menurunkan titik lembek sehingga binder menjadi lebih lunak dan fleksibel. Namun, jika dosis terlalu tinggi, penurunan titik lembek dapat menyebabkan masalah pada stabilitas struktural (Zhu et al., 2020).

4. Perubahan Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Penambahan WCO cenderung sedikit menurunkan berat jenis binder RAP. Hal ini sejalan dengan sifat kimia WCO yang lebih ringan dibandingkan komponen berat dalam aspal tua (Wang, Wang, & Apostolidis, 2018).

5. *Workability* Campuran

Dengan menurunnya viskositas, RAP yang diberi WCO menjadi lebih mudah dicampur dan dipadatkan. Hal ini berdampak pada peningkatan kepadatan lapangan dan berkurangnya kadar rongga udara (*air voids*), sehingga meningkatkan durabilitas campuran (Zaumanis & Mallick, 2015).

Meskipun efektif dalam memperbaiki sifat fisik RAP, penggunaan WCO juga menghadapi tantangan. Pertama, kualitas WCO sangat bervariasi tergantung pada jenis minyak awal, tingkat degradasi, serta kondisi pemakaian. Variabilitas ini dapat memengaruhi konsistensi hasil pencampuran (Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb, 2020). Kedua, dosis yang terlalu tinggi (>10–12% dari berat binder) dapat menyebabkan binder terlalu lunak, menurunkan stabilitas, serta meningkatkan risiko deformasi permanen. Oleh karena itu, penentuan dosis optimum sangat penting untuk menyeimbangkan antara fleksibilitas dan stabilitas.

Secara keseluruhan, WCO terbukti efektif sebagai rejuvenator dalam memperbaiki sifat fisik RAP. Penambahan WCO mampu menurunkan viskositas, meningkatkan kelenturan, menurunkan titik lembek, serta memperbaiki *workability* campuran. Namun, keberhasilan aplikasi WCO sangat dipengaruhi oleh kualitas bahan baku dan kadar yang digunakan. Optimalisasi dosis serta *treatment* tambahan terhadap WCO diperlukan untuk memastikan performa fisik RAP yang stabil dan berkelanjutan.

Tabel 3. Pengaruh WCO terhadap Sifat Fisik Aspal

Peneliti & Tahun	Kadar WCO	Parameter Fisik yang Diuji	Hasil Utama
Shen, Airey, & Hunter (2007)	5–15%	Penetrasi, Viskositas	WCO meningkatkan nilai penetrasi, menurunkan viskositas, binder menjadi lebih lunak.
Zaumanis, Mallick, & Frank (2014)	6–12%	Penetrasi, Softening Point, Viskositas	Penetrasi naik, softening point turun, viskositas menurun → binder lebih fleksibel.
Zaumanis & Mallick (2015)	Review (bio-oil & WCO)	Ring & Ball, Viskositas	WCO efektif melunakkan binder, namun dosis berlebih menurunkan stabilitas termal.
Yin, Arámbula-Mercado, & Martin (2017)	6–10%	Penetrasi, Softening Point	Penetrasi meningkat signifikan, softening point menurun, binder lebih workable.
Wang, Wang, & Apostolidis (2018)	5–15%	Viskositas, FTIR	Viskositas binder menurun, gugus karbonil (C=O) berkurang → rejuvenasi efektif.
Huang, Shu, & Vukosavljevic (2020)	8%	Softening Point, Penetrasi	Softening point turun, penetrasi naik → binder lebih plastis.
Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb (2020)	4–8%	Viskositas, Penetrasi	Viskositas menurun signifikan, penetrasi meningkat → binder lebih lentur.
Zhu, Yu, & Wu (2020)	6–12%	Penetrasi, Softening Point, Viskositas	Penetrasi naik 20–40%, softening point turun, viskositas turun drastis.

Pengaruh WCO sebagai Rejuvenator pada Sifat Mekanik Campuran RAP

Penggunaan *Waste Cooking Oil* (WCO) sebagai rejuvenator dalam campuran *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) telah banyak diteliti karena kemampuannya dalam mengembalikan sebagian besar sifat mekanik campuran yang menurun akibat proses penuaan. Penambahan WCO ke dalam RAP memengaruhi berbagai parameter mekanik, antara lain stabilitas Marshall, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), ketahanan deformasi permanen (*rutting*), ketahanan terhadap retak lelah (*fatigue*), serta ketahanan retak suhu rendah.

Secara umum, penambahan WCO ke dalam RAP menyebabkan penurunan kekakuan campuran sehingga aspal menjadi lebih fleksibel. Hal ini terlihat pada nilai stabilitas Marshall yang sedikit menurun seiring peningkatan kadar WCO, akibat menurunnya viskositas dan meningkatnya kadar fraksi maltene pada binder (Zaumanis et al., 2014; Zhu et al., 2020). Namun

demikian, nilai *flow* cenderung meningkat, menunjukkan bahwa campuran lebih plastis dan memiliki deformabilitas yang lebih tinggi (Shen et al., 2007). Kombinasi ini berimplikasi pada penurunan nilai *Marshall Quotient* (MQ), yang menunjukkan kecenderungan berkurangnya kekakuan campuran, tetapi memberikan keuntungan pada fleksibilitas.

Dalam hal ketahanan *rutting*, beberapa penelitian melaporkan bahwa dosis WCO yang terlalu tinggi ($\geq 10\text{--}12\%$) dapat mengurangi resistensi terhadap deformasi permanen karena campuran menjadi terlalu lunak (Yin et al., 2017; Huang et al., 2020). Namun, pada dosis moderat ($5\text{--}8\%$), penurunan *rutting* masih dalam batas yang dapat diterima, terutama jika dikombinasikan dengan RAP berkadar tinggi. Sebaliknya, efek positif yang signifikan terlihat pada ketahanan *fatigue*. Penambahan WCO mampu meningkatkan siklus ketahanan terhadap pembebanan berulang, karena campuran menjadi lebih lentur dan

mampu menyebarkan tegangan dengan lebih baik (Wang et al., 2018; Ali et al., 2020).

Selain itu, WCO berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan retak pada suhu rendah, yang merupakan salah satu kelemahan utama campuran RAP murni.

Kandungan fraksi asam lemak bebas dalam WCO membantu memodifikasi distribusi fraksi kimia binder, sehingga meningkatkan kemampuan campuran untuk menahan deformasi pada suhu rendah tanpa mengalami retak (Zhu et al., 2020).

Tabel 4. Pengaruh WCO terhadap Sifat Mekanik RAP

Peneliti & Tahun	Kadar WCO	Parameter Mekanik yang Diuji		Hasil Utama
Shen, Airey, & Hunter (2007)	5–15%	Marshall Flow, MQ	Stability	Stabilitas Marshall sedikit menurun, flow meningkat, MQ menurun → campuran lebih fleksibel.
Zaumanis, Mallick, & Frank (2014)	6–12%	Marshall, Test	Fatigue	Stabilitas Marshall menurun pada dosis tinggi, ketahanan fatigue meningkat signifikan.
Yin, Arámbula-Mercado, & Martin (2017)	6–10%	Flexibility (FI), Fatigue Life	Index	Ketahanan fatigue meningkat, campuran lebih tahan terhadap retak lelah.
Wang, Wang, & Apostolidis (2018)	5–15%	Rutting, Resistance	Fatigue	Rutting resistance sedikit berkurang, namun ketahanan fatigue meningkat.
Huang, Shu, & Vukosavljevic (2020)	8%	Cracking Resistance, Rutting		Retak akibat pembebanan berulang berkurang, rutting resistance menurun moderat.
Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb (2020)	4–8%	Marshall, Load Test	Repeated	Flow meningkat, stabilitas sedikit menurun, namun ketahanan beban berulang meningkat.
Zhu, Yu, & Wu (2020)	6–12%	Marshall, Low-temp Cracking Resistance		Flow meningkat, MQ menurun, ketahanan retak suhu rendah meningkat signifikan.

Tabel 5. Penambahan Aditif pada WCO untuk Rejuvenator RAP

Jenis Aditif	Tujuan Penambahan	Efek Utama pada Kinerja Campuran RAP		Referensi
Polimer (SBS, EVA, PE)	Meningkatkan elastisitas dan ketahanan deformasi permanen	Meningkatkan <i>rutting resistance</i> dan stabilitas Marshall, mengurangi kelemahan WCO pada suhu tinggi		Zaumanis et al. (2016); Hao et al. (2021)
Nano-material (Nano-silika, Nano-clay)	Memperkuat ikatan molekuler dan meningkatkan stabilitas kimia	Meningkatkan modulus kekakuan, stabilitas jangka panjang, dan ketahanan terhadap kelembaban		Wang et al. (2018); Zhao et al. (2020)
Asphaltenes tambahan / Flux oil	Menyeimbangkan rasio maltenes–asphaltenes	Mengurangi penurunan viskositas berlebih, menjaga keseimbangan fleksibilitas dan kekakuan		Shu et al. (2012); Yang et al. (2014)
Anti-oksidan (BHT, amina)	Meningkatkan ketahanan oksidatif WCO	Menghambat degradasi akibat FFA tinggi, memperpanjang umur layan binder		Chen et al. (2014); Hao et al. (2021)
Bahan kimia hasil <i>pre-treatment</i> (esterifikasi, transesterifikasi)	Menurunkan kadar FFA dan meningkatkan kestabilan kimia	Menghasilkan <i>treated WCO</i> dengan stabilitas lebih baik, performa setara atau lebih unggul dibanding rejuvenator konvensional		Wang et al. (2018); Hao et al. (2021)

Secara keseluruhan, pemanfaatan WCO sebagai rejuvenator pada RAP menunjukkan potensi besar untuk memperbaiki sifat mekanik campuran,

khususnya pada aspek fleksibilitas, ketahanan *fatigue*, dan retak suhu rendah. Namun, perlu pengendalian kadar yang optimal, karena dosis

berlebih dapat menurunkan stabilitas Marshall dan ketahanan *rutting*. Oleh karena itu, penelitian terbaru banyak mengarah pada kombinasi WCO dengan aditif lain (seperti polimer atau nano-material) untuk menjaga keseimbangan antara fleksibilitas dan stabilitas campuran.

Tantangan dan Keterbatasan Penggunaan WCO pada Campuran RAP

Penggunaan *waste cooking oil* (WCO) sebagai rejuvenator pada *reclaimed*

asphalt pavement (RAP) semakin banyak diteliti karena sifatnya yang ramah lingkungan, ketersediaannya yang melimpah, serta kemampuannya dalam mengembalikan sebagian sifat asli aspal yang telah mengalami penuaan (*aging*) (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014; Zhu, Yu, & Wu, 2020). Namun demikian, pemanfaatan WCO pada campuran RAP masih menghadapi sejumlah tantangan dan keterbatasan baik dari aspek teknis, kimia, maupun implementasi praktis.

Tabel 6. Kelebihan dan Kekurangan Penambahan WCO pada Aspal

No	Peneliti	Kelebihan	Kekurangan
1	Shen, Airey, & Hunter (2007)	Menurunkan viskositas binder RAP; meningkatkan fleksibilitas dan keuletan	Dosis tinggi menyebabkan <i>over-softening</i> dan menurunkan stabilitas Marshall
2	Zaumanis, Mallick, & Frank (2014)	Mengembalikan rasio maltenes/asphaltenes; memperbaiki ketahanan fatigue	Rutting resistance menurun pada dosis >10%
3	Zaumanis & Mallick (2015)	Bio-oil seperti WCO lebih ramah lingkungan; efektif menurunkan kekakuan binder	Variabilitas kualitas WCO menyebabkan inkonsistensi hasil
4	Yang et al. (2014)	Meningkatkan keuletan dan ketahanan retak suhu rendah	Stabilitas struktural menurun bila kadar WCO berlebih
5	Feng et al. (2013)	Meningkatkan fleksibilitas campuran dan kemampuan deformasi	Menurunkan stabilitas Marshall dan ketahanan kelembaban
6	Yin, Arámbula-Mercado, & Martin (2017)	Meningkatkan <i>fatigue life</i> , fleksibilitas, dan <i>workability</i>	Rutting resistance berkurang pada suhu tinggi
7	Wang, Wang, & Apostolidis (2018)	Menurunkan gugus karbonil & sulfoxide (indikator oksidasi); memperbaiki ketahanan suhu rendah	Potensi <i>over-softening</i> jika tanpa pengaturan dosis
8	Zhu, Yu, & Wu (2020)	Meningkatkan keuletan, ketahanan retak suhu rendah, dan viskositas menurun	Kadar >10% menurunkan stabilitas Marshall dan rutting
9	Hao et al. (2021)	Treated WCO meningkatkan stabilitas kimia dan rutting resistance	Proses <i>treatment</i> menambah biaya produksi
10	Chen et al. (2020)	WCO berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dalam <i>life cycle assessment</i>	Diperlukan sistem pengumpulan dan penyaringan limbah yang efisien
11	Liu et al. (2022)	Kombinasi WCO + antioksidan memperpanjang umur binder	Kompleksitas formulasi tinggi untuk aplikasi industri
12	Rahman et al. (2021)	Kandungan FFA membantu rejuvenasi fraksi maltenes	FFA tinggi mempercepat oksidasi sekunder bila tanpa antioksidan
13	Xu et al. (2021)	WCO-treated menunjukkan kestabilan termal yang lebih baik dibanding WCO mentah	Standar kualitas industri belum tersedia
14	Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb (2020)	Meningkatkan elastisitas dan <i>fatigue resistance</i>	Daya tahan jangka panjang masih belum optimal

1. Variabilitas Komposisi WCO

Salah satu kendala utama adalah ketidakseragaman sifat kimia dan fisik WCO. Kandungan asam lemak bebas (*free fatty acids*), gliserida, serta produk degradasi termal dalam WCO sangat bervariasi tergantung jenis minyak awal, metode penggorengan, lama

penggunaan, dan kondisi oksidasi (Huang, Shu, & Vukosavljevic, 2020; Xu et al., 2021). Variasi ini berimplikasi pada performa aspal hasil rejuvenasi, sehingga menimbulkan inkonsistensi kualitas jika tidak ada proses *pretreatment* atau standarisasi.

2. Risiko Over-softening

Penambahan WCO dalam kadar berlebih dapat menyebabkan binder menjadi terlalu lunak (*over-softening*), sehingga meningkatkan *flow* dan mengurangi stabilitas Marshall pada campuran (Shen, Airey, & Hunter, 2007; Wang, Wang, & Apostolidis, 2018). Dampaknya, ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting resistance*) menurun, terutama pada kondisi lalu lintas berat dan iklim panas. Oleh karena itu, dosis WCO harus dioptimalkan dengan hati-hati.

3. Daya Tahan Jangka Panjang

Meskipun WCO terbukti dapat memperbaiki *fatigue resistance* dan fleksibilitas binder, daya tahan jangka panjang dari campuran RAP dengan WCO masih diragukan. Studi jangka panjang menunjukkan bahwa pengaruh WCO terhadap resistensi penuaan sekunder (*secondary aging*) belum sepenuhnya terkarakterisasi (Zaumanis & Mallick, 2015; Yin, Arámbula-Mercado, & Martin, 2017). Kecenderungan binder untuk kembali mengalami pengerasan lebih cepat akibat oksidasi perlu menjadi perhatian.

4. Stabilitas Kimia dan Ketahanan terhadap Oksidasi

WCO kaya akan asam lemak tak jenuh yang rentan terhadap oksidasi lanjutan. Ketidakstabilan kimia ini berpotensi mempercepat degradasi aspal dalam jangka panjang, terutama bila tidak dilakukan proses stabilisasi atau modifikasi kimia seperti esterifikasi atau penambahan aditif antioksidan (Ali, Al-Abdul Wahhab, & Al-Khateeb, 2020; Liu et al., 2022).

5. Kendala Lingkungan dan Prosesing

Meskipun WCO dipandang sebagai bahan ramah lingkungan, proses pengumpulan, penyaringan, dan pemurnian WCO masih menjadi tantangan tersendiri. Kontaminasi dari sisa makanan, air, dan kotoran dapat mengurangi efektivitasnya sebagai rejuvenator serta menimbulkan isu

lingkungan baru jika tidak dikelola dengan baik (Zhang et al., 2020).

6. Skalabilitas dan Standarisasi

Keterbatasan lain adalah belum adanya standar internasional yang mengatur kualitas WCO sebagai rejuvenator pada campuran RAP. Hal ini menyulitkan adopsi secara luas dalam praktik industri perkerasan jalan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk merumuskan pedoman teknis terkait kadar optimal, metode pemurnian, serta prosedur pencampuran yang konsisten (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014; Xu et al., 2021).

KESIMPULAN

Penggunaan *waste cooking oil* (WCO) sebagai rejuvenator pada campuran *reclaimed asphalt pavement* (RAP) memberikan prospek berkelanjutan dalam bidang perkerasan jalan karena mampu memperbaiki sifat fisik, mekanik, dan reologi aspal yang telah mengalami penuaan. Secara umum, penambahan WCO:

1. Sifat fisik – menurunkan penetrasi dan viskositas, meningkatkan kelenturan, serta memperbaiki sifat suhu rendah, meskipun berpotensi menyebabkan *over-softening* jika dosis berlebih.
2. Sifat mekanik – meningkatkan *flow* dan ketahanan terhadap retak lelah (*fatigue*), namun cenderung menurunkan stabilitas Marshall dan ketahanan rutting.
3. Sifat reologi – menurunkan modulus kompleks (G), meningkatkan *phase angle*, serta memperbaiki ketahanan retak suhu rendah, tetapi berisiko mengurangi stabilitas pada suhu tinggi.

Meskipun kinerjanya menjanjikan, tantangan dan keterbatasan utama WCO

meliputi variabilitas komposisi bahan, risiko *over-softening*, ketahanan jangka panjang yang belum teruji optimal, kerentanan terhadap oksidasi, serta keterbatasan standarisasi teknis.

Dengan demikian, penggunaan WCO pada RAP memerlukan optimasi kadar, pemurnian (*pretreatment*), serta potensi kombinasi dengan aditif lain seperti polimer atau antioksidan untuk meningkatkan stabilitas jangka panjang.

Penelitian lebih lanjut mengenai standar mutu dan evaluasi lapangan jangka panjang sangat diperlukan untuk memastikan implementasi WCO sebagai rejuvenator yang berkelanjutan, aman, dan konsisten di industri perkerasan jalan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali, N., Al-Abdul Wahhab, H., & Al-Khateeb, G. (2020). Performance evaluation of rejuvenated asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 261, 119930.
- [2] Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2020). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt containing RAP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(2), 04019354.
- [3] Wang, H., Wang, C., & Apostolidis, P. (2018). Understanding the rejuvenating effect of bio-oil on aged asphalt binders. *Fuel*, 220, 426–437.
- [4] Yin, F., Arámbula-Mercado, E., & Martin, A. E. (2017). Evaluation of bio-based rejuvenators for hot mix asphalt containing high RAP content. *Construction and Building Materials*, 153, 553–561.
- [5] Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2445, 65–71.
- [6] Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of rejuvenator selection for asphalt recycling. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 1–10.
- [7] Zhu, J., Yu, H., & Wu, S. (2020). Effects of waste cooking oil on the performance of asphalt and asphalt mixture. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122970.
- [8] Ali, N., Al-Abdul Wahhab, H., & Al-Khateeb, G. (2020). Performance evaluation of rejuvenated asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 261, 119930.
- [9] Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2020). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt containing RAP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(2), 04019354.
- [10] Shen, J., Airey, G., & Hunter, A. (2007). The effect of rejuvenators on aged asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(3), 157–165.
- [11] Wang, H., Wang, C., & Apostolidis, P. (2018). Understanding the rejuvenating effect of bio-oil on aged asphalt binders. *Fuel*, 220, 426–437.
- [12] Yin, F., Arámbula-Mercado, E., & Martin, A. E. (2017). Evaluation of bio-based rejuvenators for hot mix asphalt containing high RAP content. *Construction and Building Materials*, 153, 553–561.
- [13] Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2445, 65–71.

- Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2445, 65–71.
- [14] Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of rejuvenator selection for asphalt recycling. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 1–10.
 - [15] Zhu, J., Yu, H., & Wu, S. (2020). Effects of waste cooking oil on the performance of asphalt and asphalt mixture. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122970.
 - [16] Ali, A. H., & Hassan, K. A. (2011). Recycling of reclaimed asphalt pavement in road construction. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3910–3915.
 - [17] Asli, H., & Karim, M. R. (2011). Implementation of waste cooking oil as RAP rejuvenator. *Proceedings of EASTS*, 9, 1336–1350.
 - [18] Chen, J., Guo, H., & Liu, Q. (2020). Life cycle assessment of reclaimed asphalt pavement with waste cooking oil rejuvenator. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122–139.
 - [19] Chen, J., et al. (2022). Improving RAP performance with WCO and anti-stripping agents. *Journal of Cleaner Production*.
 - [20] Fini, R., Khodaii, S., & Hajikarimi, H. (2016). Rejuvenation of aged asphalt binder using waste bio-oils: SARA analysis. *Fuel Processing Technology*, 148, 87–93.
 - [21] Hassan, N. A., Karim, M. R., & Katman, M. A. (2012). The effects of various rejuvenators on reclaimed asphalt pavement binder. *Construction and Building Materials*, 26(1), 100–106.
 - [22] Lee, K. H., Kim, J. H., & Lee, D. (2015). Rheological properties of asphalt binder with waste vegetable oil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(5), 1330–1337.
 - [23] Liu, X., Apostolidis, P., & Erkens, S. (2017). Laboratory evaluation of rejuvenator effectiveness for asphalt recycling. *Materials and Structures*, 50(1), 1–14.
 - [24] Memon, N., et al. (2019). Performance of asphalt binders and mixtures with WCO. *Construction and Building Materials*.
 - [25] Mohajerani, S., et al. (2020). Fatigue and rutting performance of asphalt mixtures with bio-oil rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 256, 119–122.
 - [26] Rahman, M., et al. (2021). Effect of FFA on WCO rejuvenator performance. *Sustainability*.
 - [27] Tahami, S. M., Tarefder, R. A., & Khasawneh, M. K. (2016). Use of bio-oil as rejuvenator for RAP binder. *Construction and Building Materials*, 106, 236–245.