

CONSTRUCTION AND MATERIAL JOURNAL



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

CONSTRUCTION AND MATERIAL JOURNAL



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>.

Articles

ANALISA KEKUATAN KONSTRUSKI DOUBLE BOTTOM KAPAL AKIBAT PERUBAHAN UKURAN MANHOLE SEBAGAI UPAYA UNTUK MENINGKATKAN KESELAMATAN PELAYARAN DI ALKI II

Rodlian Jamal Ikhwani, Hariyono Hariyono, Abdul Mujib Syadzali, Alamsyah Alamsyah, Husein Syahab
163-171

ANALISA KEKUATAN KONSTRUSKI DOUBLE BOTTOM KAPAL AKIBAT PERUBAHAN UKURAN MANHOLE SEBAGAI UPAYA UNTUK MENINGKATKAN KESELAMATAN PELAYARAN DI ALKI II

STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN MORTAR K-50 DENGAN BAHAN TAMBAH FLY ASH AMP BAULA PT. SATRIA JASA SENTOSA

Armin Aryadi, Ana Kadarinawati, Isramyano Yatjong
173-188

STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN MORTAR K-50 DENGAN BAHAN TAMBAH FLY ASH AMP BAULA PT. SATRIA JASA SENTOSA

TINJAUAN PENGGUNAAN BERBAGAI BAHAN LIMBAH BERBASIS TUMBUHAN SEBAGAI PEREMAJA TERHADAP SIFAT REOLOGI BITUMEN HASIL EKSTRASI MATERIAL RAP

Indah Handayasari, Leksmono S Putranto, Bambang Sugeng Subagio, Najid Najid
189-199

TINJAUAN PENGGUNAAN BERBAGAI BAHAN LIMBAH BERBASIS TUMBUHAN SEBAGAI PEREMAJA TERHADAP SIFAT REOLOGI BITUMEN HASIL EKSTRASI MATERIAL RAP

KAJIAN KUAT TEKAN BETON RINGAN TIDAK TERKEKANG BERAGREGAT KASAR POLIPROPILENA DILAPISI PASIR

TINJAUAN PENGGUNAAN BERBAGAI BAHAN LIMBAH BERBASIS TUMBUHAN SEBAGAI PEREMAJA TERHADAP SIFAT REOLOGI BITUMEN HASIL EKSTRASI MATERIAL RAP

Indah Handayasari^{*1}, Leksmono S. Putranto¹, Bambang Sugeng Subagio², Najid¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara

²Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung

e-mail : indah.328212007@stu.untar.ac.id

ABSTRACT

Sustainable innovation in road construction encourages the use of recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement/RAP, as an alternative to reduce dependence on new materials and minimize negative environmental impacts. However, RAP materials generally undergo an aging process that causes a decrease in viscoelastic properties, an increase in stiffness, and a decrease in resistance to cracking and deformation. To address these issues, rejuvenators produced from biomass waste - such as rice husks, bagasse, palm oil waste, and other agricultural residues - are being developed as environmentally friendly solution in restoring the rheological properties of RAP asphalt and improving the performance of the asphalt mixture. The results show that plant-based rejuvenators containing lignin with a chemical structure consisting of carbon, hydrogen, oxygen elements, and have active groups such as aromatic ring structures, aliphatic and aromatic hydroxyl groups, and quinone groups very similar in structure to asphalt can rebalance the proportion of malten and asphaltene fractions in aged asphalt. The use of bio-rejuvenators provides performance that results in a decrease in the complex modulus (G^) value and an increase in the phase angle (δ), indicating improved flexibility and reduced stiffness of the asphalt, approaching the characteristics of new asphalt. Furthermore, the addition of biojuvenators also positively impacts resistance to rutting and fatigue, while enhancing the workability of the asphalt mixture, especially in low-temperature applications.*

Keywords: RAP; Rejuvenator; Biomass Waste

ABSTRAK

Inovasi berkelanjutan dalam bidang konstruksi jalan mendorong adanya pemanfaatan material daur ulang (Reclaimed Asphalt Pavement/RAP), sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap material baru dan menekan dampak negatif bagi lingkungan. Namun, material RAP umumnya telah mengalami proses penuaan yang menyebabkan penurunan sifat viskoelastis, peningkatan kekakuan serta menurunnya daya tahan terhadap retak dan deformasi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, bahan peremaja (rejuvenator) yang dihasilkan dari limbah biomassa seperti sekam padi, ampas tebu, limbah kelapa sawit dan limbah pertanian lainnya mulai dikembangkan sebagai solusi yang ramah lingkungan dalam mengembalikan sifat reologi aspal RAP serta meningkatkan performa campuran beraspalnya. Hasil kajian menunjukkan bahwa bahan peremaja berbasis tumbuhan yang mengandung lignin dengan struktur kimianya yang terdiri dari karbon, hidrogen, unsur oksigen, serta memiliki gugus aktif seperti struktur cincin aromatik, gugus hidroksil alifatik dan aromatik, dan kelompok kuinon sangat mirip strukturnya dengan aspal mampu menyeimbangkan kembali proporsi fraksi malten dan aspalten dalam aspal tua. Penggunaan bio-peremaja memberikan kinerja yang menghasilkan penurunan nilai modulus kompleks (G^) dan peningkatan sudut fase (δ). Dimana hal ini menandakan meningkatnya fleksibilitas dan menurunnya kekakuan aspal yang mendekati karakteristik aspal baru. Selain itu, penambahan bio-peremaja juga berdampak positif terhadap ketahanan terhadap rutting, fatigue serta meningkatkan workability campuran beraspal terutama untuk aplikasi suhu rendah.*

Kata kunci: RAP; Bahan Peremaja; Limbah biomassa

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir pendekatan berkelanjutan pada teknologi konstruksi jalan dengan penggunaan bahan alternatif yang ramah lingkungan serta hemat energi dan hemat biaya terus dikembangkan. Dari berbagai penelitian menunjukkan pemakaian pengikat daur ulang dari material perkerasan lama (*Reclaimed Asphalt Pavement/RAP*) untuk digunakan kembali sebagai material pada perkerasan baru memberikan hasil yang baik dan menjadi salah satu upaya dalam mengurangi ketergantungan terhadap material baru sehingga dapat dilakukan penghematan energi serta mengurangi eksploitasi sumber daya alam. Namun penggunaan RAP yang merupakan material daur ulang yang berasal dari limbah dan aspal yang sudah mengalami penuaan perlu diperbaiki sifatnya sebelum digunakan kembali dengan penambahan bahan peremaja (Zaumanis et al., 2014).

Rejuvenator atau bahan peremaja sendiri merupakan produk berbasis minyak yang dirancang untuk mengembalikan sifat asli aspal tua dengan mengembalikan rasio asli aspalten terhadap malten. Seiring dengan penuaan yang terjadi maka aspal akan kehilangan kualitas toleransi terhadap regangannya sehingga aspalten dalam pengikat menggumpal, rasio malten atau aspalten menurun serta pengikat menjadi lebih kaku dan getas (Zhang et al., 2019). Oleh karena itu, bahan peremaja ditambahkan untuk meningkatkan beberapa sifat campuran aspal yang mengandung bahan RAP yang telah mengalami penuaan. Beberapa penelitian terhadap sifat reologi pengikat RAP dengan penggunaan bahan peremaja berbasis nabati menunjukkan bahwa dengan persentase jumlah peremaja yang optimal dapat memenuhi spesifikasi persyaratan yang ditentukan dan

menghasilkan kinerja yang sama dengan campuran normal. Hal ini dikarenakan tanaman digunakan sebagai salah satu sumber lignin, dimana struktur kimia lignin yang terdiri dari karbon, hidrogen, unsur oksigen, serta memiliki gugus aktif seperti struktur cincin aromatik, gugus hidroksil alifatik dan aromatik, dan kelompok kuinon sangat mirip strukturnya dengan aspal (Yao et al., 2022, Yang et al., 2017, Wang et al., 2020). Selain itu pada penelitian yang lain menunjukkan bahwa dengan menambahkan bahan/produk alami yang mengandung lignin sebagai modifier aspal dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap penuaan aspal dan memiliki efek yang baik pada sifat reologi serta ketahanan lelah pada campuran beraspal (Xu et al., 2017, Luo et al., 2019, Gao et al., 2020, Norgbey et al., 2020, Yu et al., 2021). Penggunaan lignin dapat memperbaiki kualitas pada aspal keras/padat dan berpotensi sebagai antioksidan untuk aspal (Sundstrom et al., 1983. Bishara et al., 2005).

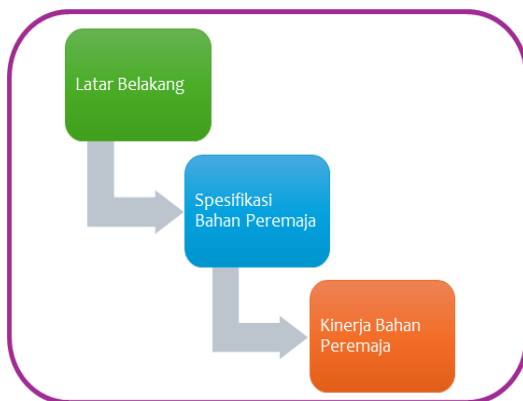
Berdasarkan uraian di atas, maka studi ini bertujuan untuk meninjau potensi dalam penggunaannya sebagai bahan peremaja berbasis nabati maupun limbah/biomassa yang berasal dari tanaman dalam campuran aspal yang mengandung RAP yang dapat mengurangi terjadinya oksidasi pada aspal serta dapat memperbaiki kualitas zat pengikat aspal.

METODE PENELITIAN

Pengumpulan data dilaksanakan melalui studi literatur yang akan digunakan untuk pengolahan serta analisis data. Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data pendukung dan hasil penelitian, jurnal, makalah konferensi yang dipublikasikan ataupun tidak serta diskusi untuk melengkapi data penelitian perkembangan riset

terkait dalam penggunaan bahan peremaja berbasis nabati/tumbuhan dan limbah/biomassa pada sifat campuran aspal yang mengandung bahan RAP dengan pendekatan metode deskriptif kualitatif. Tinjauan tersebut berfokus pada hal-hal sebagai berikut :

- Potensi bahan peremaja berbasis nabati/ tumbuhan /limbah biomassa yang digunakan dalam bidang perkerasan jalan khususnya pada campuran aspal yang mengandung RAP.
- Bahan peremaja dan aplikasinya dalam perkerasan aspal.
- Pengaruh penggunaan bahan peremaja pada sifat reologi dan mekanis pengikat dan campuran aspal yang mengandung RAP.



Gambar 1. Diagram Tinjauan Struktur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penuaan pada Aspal dan Penggunaan RAP

Pada umumnya terjadinya penuaan aspal meliputi dua fase, yaitu fase pertama yang merupakan penuaan jangka pendek, dimana penuaan terjadi selama produksi dan konstruksi perkerasan jalan. Fase yang kedua, penuaan jangka panjang yang terjadi selama masa layanan. Penuaan pada aspal merupakan suatu proses yang dipengaruhi oleh banyak faktor. Terjadinya oksidasi

menjadi salah satu faktor yang paling signifikan terhadap kerusakan yang terjadi pada perkerasan aspal. Pada proses ini terjadi oksidasi komponen kimia aspal yang mengakibatkan pengikat aspal menjadi lebih rapuh sehingga menyebabkan kekakuan dan keretakan. Oksidasi dan penguapan juga meningkatkan kadar gugus fungsi polar dalam aspal, mengurangi pergerakan bebas malten dan meningkatkan aglomerasi aspalten (Daryae et al., 2020). Selain itu, ditambah adanya radiasi ultraviolet dari sinar matahari yang dapat memutus ikatan kimia dalam pengikat aspal akan semakin mempercepat terjadinya proses penuaan, dimana hal ini dapat mengakibatkan berkurangnya fleksibilitas dan peningkatan kerentanan terhadap keretakan. Elastisitas yang berkurang dan kekakuan yang meningkat dapat menyebabkan retak termal (Huang et al., 2015, Han et al., 2022). Dengan meningkatnya kekakuan mengakibatkan hilangnya kemampuan aspal dalam menahan pembebanan berulang sehingga rentan terhadap keretakan akibat kelelahan (Apeagyei, 2011, Nabizadeh et al., 2017).

Penggunaan material RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) yang telah mengalami penuaan dalam campuran aspal baru dapat menghasilkan sifat-sifat yang tidak diinginkan, termasuk kekakuan dan penetrasi yang lebih rendah daripada aspal baru (Yan et al., 2020). Penelitian lainnya menyatakan bahwa penggunaan persentase RAP yang tinggi menghasilkan campuran yang rentan terhadap kegagalan pada suhu rendah karena kelelahan. Hasil pengujian menunjukkan penurunan pada regangan lentur maksimum campuran aspal dengan RAP serta penambahan lebih dari 40% RAP menghasilkan nilai yang lebih rendah dari yang dipersyaratkan dalam standar (Neto et al., 2022, Zhang et al., 2021). Selain itu

pada penelitian lain menunjukkan pemakaian material RAP dalam campuran bitumen baru telah mengakibatkan banyak perubahan perilaku fisik dan mekanis perkerasan, dimana diketahui bahwa kandungan RAP yang tinggi dapat meningkatkan kekakuan campuran perkerasan sebesar 25%–60% dibandingkan dengan campuran tanpa RAP (West et al., 2013, Bonicelli et al., 2017). Penelitian lebih lanjut yang dilakukan mengungkapkan bahwa penggunaan kandungan RAP 50% mengakibatkan campuran aspal menjadi lebih getas dan pada gilirannya rentan terhadap terjadinya retak sehingga perlu memperhatikan dan membatasi tingkat kandungan RAP pada perkerasan aspal (Xie et al., 2019).

Daur ulang material konstruksi jalan untuk digunakan kembali pada perkerasan jalan baru merupakan salah satu upaya dalam mewujudkan perkerasan jalan yang berkelanjutan dan mengurangi konsumsi aspal. Namun penggunaan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) atau aspal daur ulang memerlukan bahan peremaja (*rejuvenator*) agar dapat digunakan kembali karena sifat aspal bekas yang telah mengalami penuaan serta penurunan kualitas akibat paparan cuaca dan lalu lintas selama masa pakainya. Aspal dalam RAP sudah teroksidasi karena paparan sinar UV, panas, udara, dan air selama bertahun-tahun. Proses ini menyebabkan aspal menjadi lebih keras, rapuh dan kehilangan elastisitasnya. Bahan peremaja digunakan agar aspal tua yang keras dan rapuh dapat kembali ke kondisi yang mendekati aspal baru, sehingga bisa digunakan kembali secara efektif dan tahan lama dalam campuran beraspal. Peremaja bekerja dengan cara mengurangi kekakuan binder serta mengembalikan elastisitas dan struktur mikro mirip dengan aspal baru (Cavalli et al., 2018). Berikut pada Tabel 1. menunjukkan beberapa penelitian yang menyimpulkan bahwa RAP (*Reclaimed*

Asphalt Pavement) memerlukan bahan peremaja agar aspal daur ulang tersebut dapat digunakan kembali.

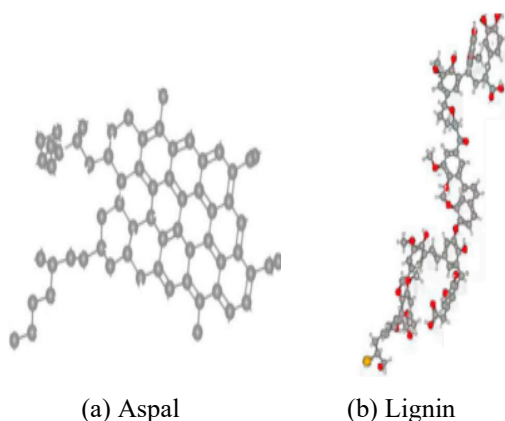
Tabel 1. Penelitian Penggunaan Bahan Peremaja Pada RAP (Hasil/Kesimpulan)

Peneliti	Hasil/kesimpulan Penelitian
Kang et al. (2007)	Membuktikan bahwa dengan peremaja, campuran RAP dapat memiliki kekuatan tarik tidak langsung (ITS) dan ketahanan deformasi yang lebih baik sehingga memungkinkan peningkatan konten RAP hingga 10 % lebih banyak dibandingkan tanpa peremaja.
Karki & Zhou (2016)	Mengungkapkan bahwa peremaja dapat menurunkan kekakuan dan oksidasi binder hasil campuran RAP, sehingga mengurangi potensi retak dan meningkatkan keawetan campuran.
Zaumanis et al. (2019)	Menjelaskan cara kerja peremaja (<i>rejuvenating agent</i>) dalam memulihkan viskositas dan struktur kimia aspal tua melalui tahap difusi ke lapisan luar hingga dalam RAP. Proses ini penting agar sifat mekanik dan kelembutan aspal dapat direstorasi.
Xu et al. (2020)	Studi ini membandingkan dua jenis peremaja dan menunjukkan bahwa <i>emulsified rejuvenator</i> (ER) mampu meningkatkan performa campuran RAP pada kondisi suhu rendah hingga tinggi
Al-Saffar et al. (2021)	Menjelaskan bahwa sifat aspal tua dan kinerja campuran RAP dapat dipulihkan dengan mencampurkan bahan peremaja pada suhu tinggi. Selain itu, <i>rejuvenator</i> harus dipilih sedemikian rupa sehingga dapat meningkatkan sifat aspal tua pada suhu rendah sekaligus mencapai sifat aspal baru pada suhu tinggi serta <i>rejuvenator</i> sendiri harus memiliki kemampuan regenerasi, anti-penuaan dan difusi yang memadai.
Wen et al. (2023)	Temuan menunjukkan bahwa penggunaan sekitar 3–4 % peremaja pada binder aspal tua dapat mengembalikan karakteristik fisik dan kekuatan adhesi seperti kondisi aspal baru, meskipun ada dampak terhadap daya tahan suhu tinggi

Bahan Peremaja (*Rejuvenator*) Berbasis Tumbuhan/Biomassa

Berbagai jenis bahan peremaja baik bebahan dasar alami maupun kimiawi banyak digunakan dalam penelitian untuk memperbaiki kinerja RAP diantaranya minyak sayur/goreng, minyak goreng bekas, oli bekas, produk rekayasa kimiawi, bio-oil dari tanaman serat dan produk turunannya. Namun menurut penelitian yang dilakukan Yang et al., (2017) dan Wang et al., (2020) memberikan hasil bahwa bio-oil yang

merupakan produk yang berasal dari pengolahan biomassa memiliki komposisi serupa dengan aspal minyak bumi, dimana terdapat zat jenuh, aromatik, senyawa polar dan aspalten untuk memperbaiki kinerja RAP. Pada penelitian lain juga memberikan hasil bahwa bio-aspal mengandung komponen yang serupa dengan yang ditemukan dalam pengikat aspal minyak bumi, termasuk zat jenuh, aromatik, resin dan aspalten sehingga dapat menjadi bahan pengikat alami/bio-binder dan memberikan kinerja perkerasan yang baik pada campuran beraspal yang mengandung RAP (Elsefie, 2011, Chen et al., 2018, Sihombing et al., 2019, Sugeng et al., 2019). Hal ini dikarenakan pada biomassa yang berasal dari tanaman, pepohonan, rumput, ubi dan limbah perkebunan, limbah pertanian maupun limbah hutan mengandung lignoselulose. Biomassa yang bersifat *renewable* dan mengandung lignin dapat dipirolisis menghasilkan produk cair (bio-oil) dan selanjutnya fraksionasi terhadap bio-oil tersebut menghasilkan bio-aspal. Berikut struktur kimia aspal dan lignin ditunjukkan pada Gambar 2 (Yao et al., 2022).



Gambar 2. Model Molekul Aspal dan Lignin
Sumber : Yao et al. (2022)

Lignoselulosa merupakan bagian biomassa tanaman yang berpotensi untuk diproses menjadi produk tertentu, seperti bio-etanol, bio-gas, bio-oil, bio-aspal maupun bio-arang. Dimana lignoselulose sendiri adalah senyawa polisakarida yang terdiri atas selulosa, hemiselulosa dan lignin. Lignin menyusun rantai dengan karbon terikat dan ikatan lainnya yang terdiri atas jaringan yang dihubungkan dengan polisakarida yang terdapat di dalam dinding sel dan memiliki potensi sebagai antioksidan. Kandungan lignin dalam tumbuhan berlignoselulosa melalui proses pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pengikat campuran beraspal (Brown, 2011). Pada Tabel 2 menunjukkan beberapa hasil pengujian terhadap bio-oil dan bio-aspal terkait produksi dan kinerjanya.

Tabel 2. Klasifikasi Bahan Berbasis Limbah Tumbuhan/Biomassa (Produksi dan Kinerja)

Klasifikasi Bahan	Peneliti	Hasil Penelitian
Bio-oil	Zeng et al., (2016); Elliott et al., (2017); Chen et al., (2018); Gao et al., (2018); Zhang, et al., (2018); Pérez et al., (2019); Deng et al., (202, sebelumnya free0)	- Bio-oil merupakan produk cair yang diperoleh melalui proses termokimia seperti pirolisis cepat (<i>fast pyrolysis</i>) bahan biomassa termasuk limbah kayu, limbah perkebunan, limbah pertanian, limbah hewan, limbah minyak goreng. - Meningkatkan komposisi kimia dan sifat kinerja pengikat aspal lama dan baru.
	Elsefi, et al. (2011); Sheng Zao, et al. (2012); Yang et al., (2017) Yami et al., (2017); Chen et al., (2018); Gao et al., (2018); Wang et al., (2020)	- Bio-aspal merupakan produk turunan dari bio-oil. - Bioaspal merupakan alternatif berkelanjutan untuk aspal yang terbuat dari sumber daya non-minyak bumi (non-fosil). - Memiliki proporsi nitrogen dan oksigen yang lebih besar. - Meningkatkan karakteristik reologi pengikat aspal.
Bio-aspal		

Dalam penelitian lainnya menunjukkan penggunaan bahan peremaja pada aspal yang telah mengalami penuaan (RAP) untuk digunakan kembali dapat menjadi solusi untuk memperpanjang umur perkerasan (Devulapalli et al., 2019). Namun, penggunaan bahan peremaja berbasis nabati perlu diperhatikan, dimana dapat meningkatkan kelelahan dan sifat retak termal akan tetapi dapat mengurangi ketahanan terhadap kerusakan dan kerentanan kelembaban (Zahoor et al., 2021).

Analisis Berbagai Bahan Limbah Biomassa Berbasis Bio-Oil dan Bio-Aspal Sebagai Peremaja

a. Sifat Reologi Material RAP

Penggunaan kembali material perkerasan lama atau Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) menjadi strategi berkelanjutan pada dunia konstruksi jalan. Namun, kandungan aspal tua (*aged binder*) dalam RAP mengalami peningkatan kekakuan dan penurunan elastisitas akibat proses oksidasi selama masa layanan, yang menyebabkan penurunan sifat reologi. Untuk mengatasi hal ini, berbagai bahan peremaja (*rejuvenator*) berbasis bio-oil dan bio-aspal dari limbah biomassa telah diteliti secara luas sebagai alternatif ramah lingkungan. Bio-oil dihasilkan melalui proses pirolisis limbah biomassa seperti ampas tebu, kulit kayu, sekam padi, limbah kelapa sawit, dan limbah pertanian lainnya. Sementara itu, bio-aspal umumnya diperoleh dari campuran bio-oil dengan aspal minyak bumi atau dari modifikasi kimiawi bio-oil itu sendiri.

Komponen senyawa dalam bio-oil, seperti asam lemak, fenolik, dan ester, mampu menyeimbangkan kembali proporsi fraksi malten dan asphalten dalam aspal tua, sehingga memperbaiki sifat reologi yaitu modulus kompleks (G^*) dan sudut fase (δ). Penambahan bio-peremaja ini cenderung menurunkan

nilai G^* dan meningkatkan nilai δ , yang menandakan peningkatan kemampuan deformasi dan pengurangan kekakuan, mendekati karakteristik aspal baru. Namun, efeknya sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku bio-oil, metode ekstraksi, serta dosis yang digunakan. Studi lain juga menunjukkan bahwa bio-oil dari limbah kelapa sawit memiliki potensi tinggi dalam menurunkan viskositas dan meningkatkan fleksibilitas campuran aspal-RAP. Berikut pada Tabel 3 beberapa hasil pengujian yang menunjukkan pengaruh penggunaan bahan peremaja berbasis tumbuhan sebagai peremaja pada aspal tua dan dapat memenuhi spesifikasi yang disyaratkan.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Pengujian Terhadap Penggunaan Bahan Peremaja Bersumber Tumbuhan

Sumber Tumbuhan	Kondisi Aspal Tua	Nilai Peetrasi	Titik Lembek	Viskositas
Bio-oil dari ampas tebu (<i>bagasse</i>)	+ 15% bio-oil	68	48	560
Bio-oil dari cangkang sawit	+ 10% bio-oil	62	50	640
Bio-oil dari serbuk gergaji kayu keras	+ 12% bio-oil	65	49	610
Bio-oil dari sekam padi	+ 15% bio-oil	70	47	520
Bio-oil dari kulit kayu pinus	+ 10% bio-oil	60	51	690
Bio-oil dari biji jarak (<i>Jatropha curcas</i>)	+ 8% bio-oil	66	50	600
Bio-oil dari ampas kopi	+ 15% bio-oil	69	48	580
Bio-aspal cangkang kelapa sawit	+ 23% bio-aspal	65	54	463

Pengujian reologi menggunakan *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) menunjukkan bahwa bio-peremaja ini mampu mengembalikan performa *rutting* dan *fatigue* ke level yang mendekati aspal *virgin*. Meskipun demikian, stabilitas termal, kadar air dan potensi degradasi kimia dari bio-oil

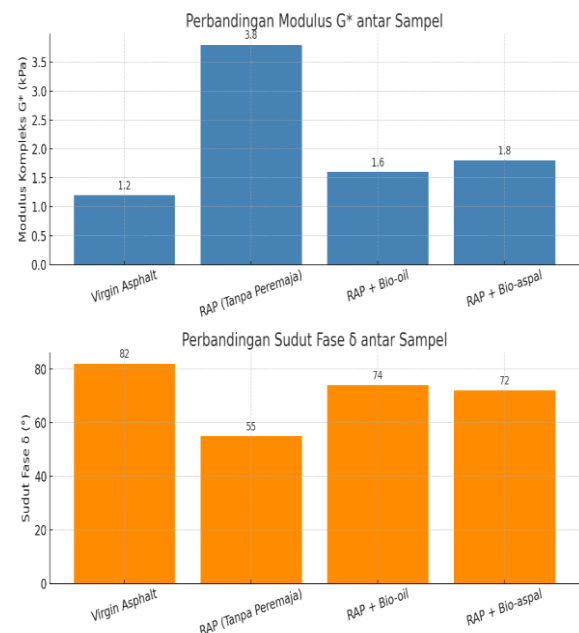
masih menjadi tantangan utama. Oleh karena itu, pemilihan jenis dan formulasi bio-oil harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan spesifikasi teknis campuran jalan. Bahan peremaja berbasis bio-oil dan bio-aspal dari limbah biomassa telah menjadi alternatif yang menjanjikan karena sifat ramah lingkungan dan ketersediaan bahan baku yang melimpah. Bio-oil dihasilkan melalui proses pirolisis limbah biomassa seperti sekam padi, limbah kelapa sawit, dan limbah pertanian lainnya, yang mengandung senyawa aktif seperti asam lemak, ester, dan fenolik (Yang et al., 2020). Senyawa ini membantu mengembalikan fraksi malten pada aspal tua dan menurunkan nilai G^* serta meningkatkan nilai δ , yang mencerminkan peningkatan fleksibilitas dan penurunan kekakuan (Zargar et al., 2012). Sementara itu, bio-aspal hasil modifikasi kimiawi juga menunjukkan performa yang kompetitif, meskipun prosesnya lebih kompleks. Pengujian dengan *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) menunjukkan bahwa nilai parameter rutting dan fatigue dari campuran RAP yang diberi bio-peremaja mengalami peningkatan signifikan (Zhao et al., 2014).

Namun demikian, tantangan utama penggunaan bio-oil adalah kestabilan kimia, kadar air tinggi dan degradasi termal. Kualitas dan efektivitas bio-oil sangat tergantung pada jenis biomassa, suhu pirolisis dan teknik pemurnian (Zhou et al., 2021). Oleh karena itu, optimalisasi formulasi bio-oil serta studi lanjutan mengenai durabilitas campuran sangat diperlukan. Secara keseluruhan, pemanfaatan bio-oil dan bio-aspal berbasis limbah biomassa sebagai peremaja RAP merupakan pendekatan inovatif yang mendukung penggunaan sumber energi berkelanjutan dalam konstruksi jalan. Berikut pada Tabel 4 dan Gambar 3 tinjauan pengaruh sifat reologi RAP terhadap penggunaan bio-

oil dan bio-aspal sebagai bahan peremaja berdasarkan nilai modulus kompleks (G^*) dan sudut fase (δ).

Tabel 4. Perbandingan Nilai G^* dan Sudut Fase

Jenis Sampel	Modulus Kompleks G^* (kPa)	Sudut Fase δ (°)
Virgin Asphalt	1.2	82
RAP (tanpa peremaja)	3.8	55
RAP + Bio-oil	1.6	74
RAP + Bio-aspal	1.8	72



Gambar 3. Grafik Perbandingan Sifat Reologi

b. Campuran Beraspal

Penggunaan bahan peremaja berbasis bio-oil dan bio-aspal dalam campuran *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) tidak hanya berdampak pada binder, tetapi juga secara signifikan memengaruhi kinerja campuran beraspalnya. Penelitian menunjukkan bahwa karakteristik campuran beraspal yang mengandung RAP + bio-peremaja sangat bergantung pada jenis dan dosis bio-oil serta desain campuran yang digunakan. Adapun beberapa hasil

penelitian menunjukkan kinerja campuran beraspal yang mengandung RAP dengan bahan peremaja berbasis limbah biomassa berupa bio-oil dan bio-aspal yaitu :

1. Stabilitas Marshall dan Ketahanan Deformasi
Penambahan bio-oil berfungsi melembutkan binder lama sehingga campuran menjadi lebih fleksibel. Namun, stabilitas Marshall cenderung menurun jika dosis peremaja terlalu tinggi karena penurunan kekakuan struktural (Zargar et al., 2012). Untuk lalu lintas berat, bio-oil perlu dikombinasikan dengan penguat tambahan atau modifikasi dengan aditif lain.
2. Ketahanan terhadap *Rutting*
Campuran RAP yang diremajakan dengan bio-oil menunjukkan kecenderungan lebih lunak sehingga berpotensi mengalami *rutting* pada suhu tinggi (Wang et al., 2018). Namun demikian, penggunaan bio-aspal menunjukkan stabilitas yang lebih baik karena kandungan aromatik yang lebih tinggi yang dapat meningkatkan kohesi binder.
3. Ketahanan terhadap *Fatigue* (Retak akibat Pembebanan Ulang)
Bio-oil meningkatkan fleksibilitas campuran sehingga ketahanan terhadap kelelahan meningkat secara signifikan. Selain itu penurunan pada modulus kekakuan menunjukkan bahwa bio-oil membantu memperlambat pembentukan retak (Yang et al., 2020).
4. Ketahanan terhadap Kelembaban (*Stripping*)
Sebagian bio-oil bersifat hidrofilik dan memiliki kadar air tinggi yang dapat menyebabkan *stripping* atau pelepasan agregat akibat kelembaban. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian seperti AASHTO T283 untuk menilai ketahanan terhadap kelembaban

serta disarankan menggunakan anti-stripping agent jika diperlukan (Zhao et al., 2014).

5. *Workability*

Bio-oil secara umum menurunkan viskositas campuran sehingga meningkatkan *workability* saat pencampuran dan pemadatan. Ini mendukung produksi campuran suhu rendah (*warm mix asphalt*) dan efisiensi konstruksi di lapangan (Zhou et al., 2021).

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa bio-oil dan bio-aspal dari limbah biomassa efektif sebagai peremaja RAP, karena mampu mengurangi kekakuan binder lama (G^*) dan meningkatkan elastisitas (δ), mendekati karakteristik aspal murni (*virgin asphalt*). Jenis biomassa memengaruhi efektivitas peremaja. Penambahan bio-peremaja meningkatkan kinerja reologi RAP, terutama dalam aspek ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*) dan deformasi permanen (*rutting*) selama dosis dan pencampuran dikontrol dengan tepat. Namun, kestabilan kimia dan kadar air dari bahan peremaja berbasis bio-oil dan bio-aspal masih menjadi tantangan yang dapat mempengaruhi ketahanan jangka panjang dan konsistensi hasil. Selain itu, penggunaan bio-oil maupun bio-aspal sebagai peremaja tidak hanya memperbaiki sifat reologi binder, tetapi juga meningkatkan kinerja campuran. Kinerja campuran beraspal dengan RAP meningkat setelah penambahan bio-oil dan bio-aspal terutama dari segi fleksibilitas dan ketahanan terhadap retak leleh (*fatigue*) serta meningkatkan ketahanan *rutting*. Pemilihan jenis bahan peremaja, dosis dan pengujian kinerja campuran secara menyeluruh sangat penting untuk menjamin performa jangka panjang. Penggunaan limbah biomassa sebagai

bahan dasar bio-oil memberikan nilai tambah dari aspek ekonomi sirkular dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta mengurangi limbah konstruksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penelitian ini penulis banyak dibantu dari berbagai pihak dan sumber dalam pelaksanaan pengolahan dan analisis data. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Apeagyei, A.K., 2011. Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders. *Construction and Building Materials* 25 (1), 47–53.
- [2] Bishara, S. W., Robertson, R. E., dan Mohoney, D. (2005). Lignin as an antioxidant: A Limited Study on Asphalts Frequency Used on Kansas Roads, The 42nd Peterson asphalt research conference, Cheyenne, WY.
- [3] Bonicelli, A., Calvi, P., Martinez-Arguelles, G., Fuentes, L., and Giustozzi, F. (2017). Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 155: 37–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.013.
- [4] Brown, R.C. (2011). Generation of Thermochemical Intermediates Suitable for Catalytic Upgrading. Ames, Iowa state University, 1-8.
- [5] Cavalli M.C., Zaumanis M., Mazza, Partl M.N., Poulikakos L.D. (2018). Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators. *Journal of Cleaner Production*. Volume 189 Pages 88-97
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.305>
- [6] Daryaei D., Ameri M., Mansourkhaki A. (2020). Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures. *Constr Build Mater* 235:117516.
- [7] Devulapalli, L., Kothandaraman, S., Sarang, G., (2019). A review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology* 12 (2), 185–196.
- [8] Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z., and Yu, M. 2020. High-Temperature Rheological Behavior and Fatigue.
- [9] Performance of Lignin Modified Asphalt Binder. *Construction Building Mater.* 230, 117063. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117063.
- [10] Han, Z., Cong, P., Qiu, J., 2022. Microscopic experimental and numerical research on rejuvenators: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9 (2), 180–207.
- [11] Huang, S.-C., Qin, Q., Grimes, R.W., et al., 2015. Influence of rejuvenators on the physical properties of RAP binders. *Journal of Testing and Evaluation* 43 (3), 594–603.
- [12] Pravat Karki and Fujie Zhou. (2016). Effect of Rejuvenators on Rheological, Chemical, and Aging Properties of Asphalt Binders Containing Recycled Binders. <https://doi.org/10.3141/2574-08>
- [13] Lu, D. X., Saleh, M. (2016). Laboratory Evaluation Of Warm

- Mix Asphalt In Coporating High RAP Proportion By Using Evothrm And Sylvaroad Additives. *Construction Building Materials*. 114, 580-587.
- [14] Nabizadeh, H., Haghshenas, H.F., Kim, Y.R., et al., 2017. Effects of rejuvenators on high RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Construction and Building Materials* 152, 65–73.
- [15] Neto OD, Silva IM, Lucena LC, Lucena LD, Mendonça AM, de Lima RK. (2022). Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Construct Build Mater* 349:128728.
- [16] Norgbey, E., Huang, J., Hirsch, V., Liu, W. J., Wang, M., Ripke, O., Li, Y., Annan, G.E.T., Ewusi-Mensah, D., Wang, X., Treib, G., Rink, A., Nwankwegu, A. S., Opoku, P.A., Nkrumah, P.N. 2020. Unravelling the Efficient Use of Waste Lignin as a Bitumen Modifier for Sustainable Roads. *Construction Building Mater*. 230, 116957.doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116957
- [17] Sundstrom, D. W., Klei, H.E., Daubenspeck, T. H., (1983). Use Of Byproducts Lignins As Extenders In Asphalt. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research And Development*, 22 (3), 496-500.
- [18] Subagio, B.S., Sihombing AVR. (2019). Pemanfaatan Bioasphalt sebagai Modifier pada Aged Asphalt. *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences*.
- [19] Sihombing AVR, B. S. Subagio, Hariyadi E.S., Yamin A. (2019). Bio-asphalt on Asphalt Mixture containing RAP. *Series: Materials Science and Engineering*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 673 012026. doi:10.1088/1757899X/673/1/012026
- [20] Wang, H., Ma, Z., Chen, X., et al., (2020). Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: a comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 7 (2), 137–151.
- [21] Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., & Scarpas, T. (2018). Evaluation of bio-based rejuvenator derived from sugarcane bagasse for asphalt recycling. *Journal of Cleaner Production*, 188, 37–49.
- [22] West, R.C., Willis, J.R., and Marasteanu, M.O. (2013). Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. Vol. 752. *Transportation Research Board*.
- [23] Xie, Z., Rizvi, H., Purdy, C., Ali, A., and Mehta, Y.(2019). Effect of rejuvenator types and mixing procedures on volumetric properties of asphalt mixtures with 50% RAP. *Construction and Building Materials*, 218: 457–464. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.093.
- [24] Xu, G., Wang, H., Zhu, H. (2017). Rheological Properties and Anti-aging Performance of Asphalt Binder Modified with wood Lignin. *Construction Building Mater*. 151, 801–808. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151.
- [25] Yan K, Peng Y, You L. (2020). Use of tung oil as a rejuvenating agent in aged asphalt: Laboratory evaluations. *Construction Building Mater*, 239:117783.
- [26] Yu, J., Vaidya, M., Su, G., Adhikari, S., Korolev, E.,

- Shekhovtsova, S. 2021. Experimental Study of Soda Lignin Powder as an Asphalt Modifier for a Sustainable Pavement Material. *Construction Building Mater.* 298, 123884. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123884.
- [27] Yao H., Wang Y., Liu J., Xu M., M P., Jie Jie, You Z. (2022). Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. doi:10.3389/fmats.2021.803524.
- [28] Yang, X., Mills-Beale, J., You, Z., 2017. Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt. *Journal of Cleaner Production* 142, 1837–1847.
- [29] Yang, X., Zhang, Y., You, Z., et al. (2020). Bio-oil derived from waste biomass as rejuvenator for aged asphalt: A review. *Construction and Building Materials*, 243, 118283.
- [30] Zaumanis, Martins, Rajib B. Mallick, and Robert Frank. (2015). Evaluation Of Different Recycling Agents For Restoring Aged Asphalt Binder And Performance Of 100% Recycled Asphalt. *Materials and Structures* 48.8 : 2475-2488.
- [31] Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., et al., 2021. Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* 278,123304.
- [32] Zhang, R., Yu, Z., Wang, H., Ye, M., Yap, Y. K., & Si, C. (2019). The Impact Of Bio-Oil As A Rejuvenator For Aged Asphalt Binder. *Constr Build Mater*, 196, 134–143
- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.10.168>
- [33] Zhang J, Guo C, Chen T, Zhang W, Yao K, Fan C, Liang M, Guo C, Yao Z. (2021). Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators. *Constr Build Mater* 269:121337.
- [34] Zaumanis M., Mallick R.B., and Frank R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2370(1): 17–25.
- [35] Zaid Hazim Al-Saffar, Haryati, Mohd Khairul Idham, Mohd Satar, Mhmood Khleel Saleem, Jau Choy Lai, and Ramadhansyah Putra Jaya. (2021). A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0635>
- [36] Zargar, M., Mahrez, A., Karim, M.R., et al. (2012). A Comprehensive Review Of The Rejuvenation Of Aged Asphalt Pavements Using Bio-Based Rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 49, 445–455.
- [37] Zhao, S., Chen, H., & Wu, S. (2014). Research on rheological properties of RAP binder rejuvenated by bio-oil. *Petroleum Science and Technology*, 32(23), 2772–2778.
- [38] Zhou, X., Fan, L., & Zhang, M. (2021). Influence of bio-oil properties on performance of asphalt rejuvenators. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(5), 04021075.