

MANAJEMEN WASTE KONSTRUKSI: PENGGUNAAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DALAM PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN

Elizar

^{1*2}Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jl. Kaharuddin Nasution No. 13, Pekanbaru
e-mail: elizar@eng.uir.ac.id

ABSTRAK

Manajemen waste konstruksi merupakan tantangan signifikan dalam upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Salah satu solusi yang muncul adalah penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), yang memungkinkan daur ulang material aspal dari proyek jalan yang telah lama. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan RAP dalam mengurangi waste konstruksi sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Metode penelitian yang digunakan melibatkan eksperimen laboratorium di mana RAP diuji dalam berbagai campuran aspal baru untuk menilai karakteristik mekaniknya. Campuran aspal dengan berbagai proporsi RAP diuji untuk menentukan kekuatan, daya tahan, dan stabilitas sesuai dengan standar nasional. Selain itu, penelitian ini juga melakukan analisis perbandingan antara kinerja campuran RAP dengan campuran aspal konvensional. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa campuran aspal dengan kandungan RAP hingga 30% memiliki kinerja yang setara, bahkan lebih baik dalam beberapa parameter dibandingkan dengan aspal konvensional. Penggunaan RAP terbukti mampu mengurangi kebutuhan material baru hingga 30%, sehingga mengurangi dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya alam. Penelitian ini menyimpulkan bahwa RAP merupakan solusi yang efektif untuk manajemen limbah konstruksi dan mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Karakteristik Marshall yaitu VIM, VMA, VFA, Stabilitas, flow dan Marshall Quotient (MQ) memenuhi semua kriteria spesifikasi. Rekomendasi kebijakan termasuk peningkatan penggunaan RAP dalam proyek infrastruktur dan pengembangan teknologi yang lebih canggih untuk meningkatkan kualitas campuran RAP di masa depan.

Kata kunci: Manajemen, Waste, Konstruksi, RAP, Marshall

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur yang sangat pesat, sejalan dengan target Indonesia Emas 2045, telah meningkatkan produksi waste konstruksi secara signifikan. Waste yang terdiri dari material seperti beton, kayu, dan aspal, sering kali berakhir di tempat pembuangan akhir atau dibiarkan mencemari lingkungan. Dampak negatif dari waste konstruksi ini tidak hanya merusak ekosistem, tetapi juga menambah beban pada tempat pembuangan yang sudah over kapasitas dan mempercepat habisnya sumber daya alam yang digunakan untuk produksi material baru (Vol et al., 2000).

Salah satu material limbah yang dominan dalam proyek infrastruktur adalah aspal dari jalan-jalan yang sudah lama. Setiap tahun, ribuan ton aspal digali dan digantikan dengan material baru, menciptakan jumlah limbah yang besar dan menimbulkan tantangan lingkungan yang serius. Teknologi daur ulang aspal atau asphalt recycling adalah salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi masalah lingkungan dalam bidang transportasi (Mosawe et al., 2023). Dalam konteks ini, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) muncul sebagai alternatif solusi yang memungkinkan daur ulang material aspal lama untuk digunakan kembali dalam proyek infrastruktur baru (Meilani & Kurnia, 2019). Aspal RAP telah mengalami penuaan secara signifikan pada saat diproduksi, pada saat memberikan pelayanan, dan akibat pengaruh lingkungan saat menjadi lapisan atau struktur perkerasan. Penggunaan material RAP merupakan suatu green technology dalam konstruksi jalan, dengan cara memanfaatkan limbah jalan. Selain itu, penggunaan RAP menghemat material aspal dan agregat yang digunakan dalam konstruksi jalan (Pasayu et al., 2023).

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) adalah material yang diperoleh dari aspal jalan raya yang telah lama dan kemudian didaur ulang untuk digunakan dalam pembuatan jalan baru. Penggunaan RAP bukan hanya mengurangi jumlah waste konstruksi, tetapi juga mengurangi kebutuhan akan material aspal baru, yang pada waktu tertentu mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan emisi karbon dari proses produksi aspal baru (Farooq et al., 2018). Dengan demikian, RAP menawarkan solusi ganda: pengurangan waste dan pengurangan dampak lingkungan dari proyek infrastruktur. Studi terbaru menyoroti keserbagunaan RAP, menunjukkan integrasi efektifnya dengan berbagai bahan, seperti minyak limbah dan aspal campuran hangat, untuk meningkatkan karakteristik kinerja seperti kekakuan dan ketahanan leleh (Kumar & Aggarwal, 2023). Temuan eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan RAP yang optimal dapat meningkatkan stabilitas suhu tinggi sambil berpotensi membahayakan kinerja suhu rendah dan stabilitas air, tergantung pada kandungan RAP dan kondisi pemanasan awal (Xiao et al., 2023). Selain itu, dimasukkannya RAP dalam campuran aspal hangat telah terbukti meningkatkan kekuatan ikatan dan stabilitas

keseluruhan, terutama pada rasio penggantian spesifik (Toth et al., 2023). Dengan demikian, penggunaan strategis RAP dalam campuran aspal baru mendukung praktik konstruksi berkelanjutan sambil mempertahankan standar kinerja jalan

Metode penelitian ini dengan cara eksperimen yaitu menguji berbagai proporsi RAP dalam campuran aspal baru untuk menilai karakteristik mekanisnya, seperti kekuatan, stabilitas, dan daya tahan. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan data empiris yang diperlukan untuk mendukung adopsi RAP dalam proyek-proyek infrastruktur di Indonesia.

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan di Indonesia, dengan menunjukkan bahwa penggunaan RAP tidak hanya merupakan solusi untuk manajemen waste konstruksi, tetapi juga langkah penting menuju pembangunan infrastruktur yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan adopsi RAP yang lebih luas, Indonesia dapat bergerak lebih dekat menuju visinya sebagai negara maju pada tahun 2045, dengan infrastruktur yang dibangun secara berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Daur ulang perkerasan yaitu pemakaian ulang dari scarified permukaan jalan atau lapisan jalan yang kasar dengan cara me-rotavating-nya sampai kedalaman 20 cm (8 inci) dan mencampurnya dengan bahan pengikat bitumen yang panas atau dingin, sering kali akan seperti semen (Meilani & Kurnia, 2019). Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) adalah sumber daya berharga dalam konstruksi jalan raya, yang berasal dari penggilingan atau penggalian permukaan aspal yang terdegradasi (Hariz Akrom et al., 2020). Daur ulang RAP tidak hanya mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan TPA tetapi juga menghemat sumber daya alam dan mengurangi biaya konstruksi (Rif'an & Sunarjono, 2016). Secara teknis, RAP terdiri dari agregat (seperti kerikil, pasir, dan filler) yang telah tercampur dengan aspal sebagai bahan pengikat. Material ini masih memiliki karakteristik yang cukup baik untuk digunakan kembali, asalkan diolah dengan benar. Ketika dicampur dengan aspal baru, RAP dapat meningkatkan kinerja campuran aspal melalui peningkatan kekuatan, stabilitas, dan daya tahan terhadap deformasi (Afdal et al., 2019).

Karakteristik Marshal

Marshall Test adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan kinerja campuran aspal dalam konstruksi perkerasan jalan (Hasriana et al., 2020). Pengujian ini dikembangkan pada tahun 1939 oleh Bruce Marshall dari Mississippi Highway Department dan kemudian diadopsi serta dimodifikasi oleh U.S. Army Corps of Engineers untuk digunakan dalam proyek-proyek perkerasan jalan (Twidi et al., 2018). Marshall Test menjadi salah satu metode paling umum yang digunakan untuk mengukur stabilitas dan aliran campuran aspal, yang keduanya merupakan indikator penting dari daya tahan dan performa perkerasan di bawah beban lalu lintas (Farooq et al., 2018). Campuran yang di gunakan pada pengujian Marshall harus memenuhi beberapa persyaratan dalam pengujiannya. Persyaratan campuran untuk laston dapat dilihat pada 1.

Tabel 1. Spesifikasi Campuran Laston (AC) (Bina Marga, 2018)

<i>Karakteristik</i>	<i>Spesifikasi</i>	<i>Satuan</i>
Void in Mix (VIM)	3,0 – 5,0	%
Void Material Aggregate (VMA)	Min 15	%
Void in Fill Aggregate (VFA)	Min 65	%
Stabilitas	Min 800	kg
Pelelehan (Flow)	Min 2	mm
Marshall Quotient (MQ)	250	kg/mm

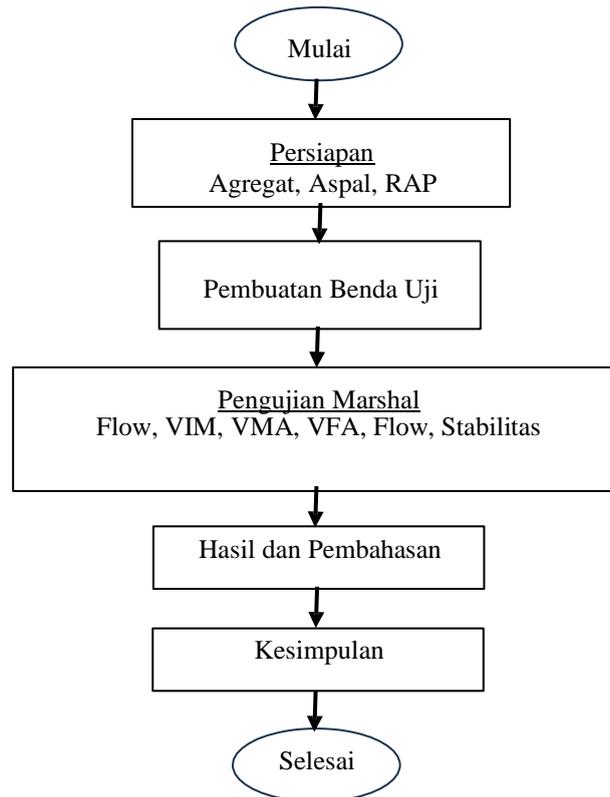
Hasil dari Marshall Test memberikan data penting yang digunakan untuk mengoptimalkan desain campuran aspal, memastikan bahwa perkerasan jalan yang dihasilkan dapat bertahan lama dan berkinerja baik di bawah berbagai kondisi lalu lintas dan lingkungan (Fakhri & Amoosoltani, 2017). Dengan memberikan data yang akurat tentang stabilitas, aliran, dan karakteristik fisik lainnya dari campuran aspal, Marshall Test membantu dalam memilih dan merancang campuran yang optimal untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan yang spesifik (Vol et al., 2000).

Marshall Test merupakan alat penting dalam desain dan pengendalian kualitas campuran aspal untuk perkerasan jalan. Dengan memberikan data yang akurat tentang stabilitas, aliran, dan karakteristik fisik lainnya dari campuran aspal, Marshall Test membantu insinyur dan pembuat keputusan dalam memilih dan merancang campuran yang optimal untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan yang spesifik. Penggunaan Marshall Test memastikan bahwa perkerasan jalan yang dihasilkan tidak hanya memenuhi standar teknis tetapi juga dapat bertahan lama dan memberikan kinerja yang andal selama masa pakainya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi kinerja teknis Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal baru. Eksperimen ini bertujuan untuk menilai karakteristik Marshall dari berbagai proporsi RAP, sehingga dapat ditentukan proporsi optimal yang dapat digunakan dalam proyek infrastruktur tanpa mengorbankan kualitas dan daya tahan aspal. Penggunaan metode eksperimen memungkinkan untuk mendapatkan data empiris yang dapat diandalkan dalam menilai potensi RAP sebagai solusi untuk manajemen waste konstruksi.

Penelitian ini dilaksanakan dengan melalui beberapa tahap, yaitu mulai dari literatur, persiapan bahan, pemeriksaan bahan/material yang berupa agregat, aspal dan RAP, pembuatan benda uji, pengujian dengan alat Marshall serta analisis hitungan nilai struktural. Bagan alir penelitian seperti Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Sampel RAP diperoleh dari proyek jalan raya yang telah selesai dilakukan penggantian aspal di beberapa lokasi di Indonesia. Setelah itu, sampel ini dibawa ke laboratorium untuk diuji dan diproses lebih lanjut. Proses awal melibatkan pemurnian dan pengolahan RAP untuk memastikan bahwa material yang digunakan dalam eksperimen bebas dari kontaminan yang dapat mempengaruhi hasil uji. RAP kemudian dicampur dengan material aspal baru 100% dan 70% untuk menghasilkan campuran aspal yang akan diuji.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) adalah material aspal yang diambil dari lapisan permukaan jalan raya yang sudah usang dan kemudian didaur ulang untuk digunakan kembali dalam proyek konstruksi baru. Pembongkaran aspal lama seperti Gambar 2.



(a) (b)

Gambar 2. Bongkaran Aspal Lama

Gambar 2 menunjukkan bongkaran aspal lama, proses ini selanjutnya dilakukan penggilingan atau penggalian lapisan aspal yang telah mengalami degradasi, kemudian material tersebut diolah kembali sehingga dapat dicampur dengan aspal baru untuk membuat lapisan jalan yang baru.

RAP menjadi semakin populer dalam industri konstruksi karena mampu mengurangi kebutuhan material baru dan menawarkan potensi penghematan biaya yang signifikan. Selain itu, penggunaan RAP juga sejalan dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan, karena membantu mengurangi limbah konstruksi dan emisi karbon dari proses produksi aspal baru.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah menjadi solusi yang semakin populer untuk mengatasi tantangan dalam manajemen limbah konstruksi. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur dan rehabilitasi jalan, volume aspal yang dihasilkan dari proyek perbaikan jalan semakin tinggi. RAP menawarkan pendekatan yang berkelanjutan dengan mendaur ulang material yang sudah ada, sehingga mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, penggunaan RAP membantu mengurangi dampak lingkungan dengan menurunkan konsumsi energi, emisi karbon, dan waste konstruksi.

RAP terdiri dari agregat dan aspal yang telah digunakan sebelumnya dalam konstruksi jalan. Kualitas dan karakteristik RAP dapat bervariasi tergantung pada umur jalan yang diperbaiki, metode penggilingan, dan jenis aspal yang digunakan. Karakteristik fisik seperti ukuran partikel, kelekatan aspal, dan stabilitas termal memainkan peran penting dalam menentukan kinerja RAP ketika digunakan kembali dalam campuran aspal baru. Analisis laboratorium terhadap sampel RAP sangat penting untuk memastikan bahwa material ini masih layak digunakan dan dapat memenuhi standar kualitas yang diperlukan.

Karakteristik Marshall, yang meliputi stabilitas, aliran (flow), kerapatan (density), dan rongga udara (air voids), merupakan indikator utama dalam menilai kualitas dan kinerja campuran aspal. Stabilitas Marshall mengukur kemampuan campuran untuk menahan beban maksimum sebelum mengalami deformasi, sementara aliran mengukur besarnya deformasi yang terjadi pada saat beban maksimum diterapkan. Kerapatan dan rongga udara memberikan gambaran tentang tingkat pemadatan campuran dan kemampuannya untuk menahan infiltrasi air serta perubahan suhu. Dalam konteks penggunaan RAP, karakteristik-karakteristik ini menjadi semakin penting karena RAP memiliki sifat-sifat yang berbeda dari material aspal baru.

Dari hasil pengujian laboratorium campuran AC – BC dengan campuran full fresh aggregate dan dengan campuran +30% RAP, didapatkan perhitungan dan analisa karakteristik marshall. Adapun nilai – nilai yang diperoleh dari hasil pengujian marshall adalah, Stabilitas (Stability), Pelelehan (Flow), Rongga dalam Agregat (VMA), Rongga dalam Campuran, Rongga Terisi Aspal (VFB), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil karakteristik Marshall seperti Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Marshall

<i>Karakteristik</i>	<i>RAP (0%)</i>	<i>RAP (30%)</i>	<i>Spesifikasi</i>	<i>Satuan</i>	<i>Keterangan</i>
Void in Mix (VIM)	4,10	4,30	3,0 – 5,0	%	memenuhi
Void Material Aggregate (VMA)	16,20	14,50	Min 14	%	memenuhi
Void in Fill Aggregate (VFA)	83	86	Min 65	%	memenuhi
Stabilitas	1800	2080	Min 800	kg	memenuhi
Pelelehan (Flow)	3,8	3,8	Min 2	mm	memenuhi
Marshall Quotient (MQ)	440	535	250	kg/mm	memenuhi

Tabel 2 menunjukkan semua variasi campuran pada penelitian ini memenuhi syarat yang ditentukan dalam Spesifikasi Teknis 2018 Revisi 2. Dapat dikatakan bahwa campuran dengan pemanfaatan 30% RAP dapat digunakan sebagai lapis antara (AC – BC). Penggunaan RAP dalam campuran aspal dapat meningkatkan stabilitas Marshall, terutama pada proporsi rendah hingga sedang. Ini terjadi karena RAP biasanya mengandung agregat yang sudah dipadatkan dan aspal yang telah mengalami proses penuaan, yang keduanya cenderung memiliki sifat yang lebih keras dan kaku. Akibatnya, campuran yang mengandung RAP cenderung lebih stabil dan mampu menahan beban lalu lintas lebih baik dibandingkan campuran aspal konvensional. Namun, pada proporsi RAP yang terlalu tinggi, stabilitas mungkin mulai menurun jika campuran tidak terikat dengan baik atau jika agregat dalam RAP tidak cukup homogen.

Kerapatan dan rongga udara dalam campuran aspal sangat dipengaruhi oleh penggunaan RAP. Karena RAP terdiri dari material yang telah dipadatkan sebelumnya, campuran aspal dengan RAP seringkali memiliki kerapatan yang lebih tinggi. Namun, jika proses pencampuran dan pemadatan tidak dilakukan dengan benar, campuran tersebut bisa saja memiliki rongga udara yang lebih besar, yang dapat mengurangi daya tahan dan ketahanan campuran terhadap infiltrasi air dan siklus pembekuan-pencairan. Pengendalian kualitas yang ketat diperlukan untuk memastikan bahwa campuran RAP memenuhi standar kerapatan dan rongga udara yang optimal.

Salah satu aspek kunci dalam penggunaan RAP adalah menentukan proporsi optimal dalam campuran aspal baru. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan stabilitas dan kekuatan campuran, namun ada batasan terhadap berapa banyak RAP yang dapat ditambahkan tanpa mengorbankan kualitas. Studi eksperimental biasanya menguji berbagai proporsi RAP, mulai dari 10% hingga 50%, untuk mengevaluasi bagaimana perubahan dalam komposisi mempengaruhi karakteristik stabilitas Marshall. Hasil penelitian terdahulu dengan penggunaan RAP yang optimum seperti pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Penelitian Terdahulu Penggunaan RAP Optimum

<i>Penelitian Terdahulu</i>	<i>RAP (%)</i>	<i>Spesifikasi</i>
Mosawe (2023)	30	Iraq
Toth, et al (2023)	20	Hungary
Masri, et al (2023)	20	Indonesia
Xiao, et al (2023)	30	China
Tarsi, et al (2020)	30	Bologna
Harsiana, et al (2020)	30	Indonesia
Meilani dan Kurnia (2019)	20	Indonesia
Bethary, et al (2018)	20 – 25	Indonesia
Farooq, et al (2018)	20	India
Fakhri and Amoosoltani (2017)	50	Iran

Tabel 2 dapat dilihat penelitian terdahulu dari berbagai negara telah melakukan penelitian dengan menggunakan RAP. Hasil menunjukkan bahwa pemakaian RAP rata-rata antara 20% hingga 50% yang mengidentifikasi campuran memberikan stabilitas yang sangat baik dan aliran yang memadai, serta potensi untuk penggunaan yang lebih luas dalam proyek perkerasan jalan. Penelitian terdahulu mengenai Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah memberikan landasan penting dalam memahami potensi penggunaan material daur ulang ini dalam konstruksi perkerasan jalan. Studi-studi sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek dari penggunaan RAP, termasuk stabilitas mekanis karakteristik Marshall. Banyak dari penelitian ini menekankan bahwa RAP, ketika digunakan dengan benar, dapat menggantikan sebagian bahan baku baru dalam campuran aspal tanpa mengorbankan kualitas atau kinerja. Penelitian-penelitian ini memberikan bukti awal yang mendukung adopsi RAP sebagai bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan.

Dari perspektif lingkungan, penelitian sebelumnya secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan RAP dapat mengurangi jejak karbon proyek konstruksi jalan. Penelitian oleh Xiao, et al (2023) mengindikasikan bahwa penggunaan RAP dapat mengurangi kebutuhan energi dan emisi yang terkait dengan produksi aspal baru dan ekstraksi agregat. Selain itu, dengan mengurangi jumlah limbah konstruksi yang dikirim ke tempat pembuangan akhir, RAP membantu mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan. Penelitian ini mendukung argumen bahwa RAP bukan hanya pilihan yang ekonomis, tetapi juga solusi yang lebih ramah lingkungan.

Hubungan antara karakteristik Marshall dan penggunaan RAP memiliki implikasi penting bagi desain dan konstruksi jalan. Dengan memahami bagaimana RAP mempengaruhi stabilitas, aliran, kerapatan, dan rongga udara, dapat membuat keputusan yang lebih informasi tentang bagaimana dan kapan menggunakan RAP dalam proyek-proyek perkerasan. Hal ini tidak hanya meningkatkan kualitas dan daya tahan jalan, tetapi juga berkontribusi pada upaya keberlanjutan dengan mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru dan meminimalkan waste konstruksi. Dalam jangka panjang, penggunaan RAP yang dioptimalkan berdasarkan hasil pengujian Marshall dapat membantu mencapai tujuan pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Meskipun banyak penelitian terdahulu menunjukkan potensi besar RAP, ada juga keterbatasan yang perlu diatasi. Salah satu tantangan utama yang diidentifikasi adalah variabilitas dalam kualitas RAP, yang dapat mempengaruhi konsistensi hasil campuran aspal. Selain itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proporsi RAP dan mengembangkan teknologi yang lebih baik untuk pengolahan dan pencampuran RAP. Dengan mengatasi tantangan ini, penelitian masa depan dapat membuka peluang baru untuk memperluas penggunaan RAP dalam berbagai aplikasi infrastruktur, membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan yang lebih luas.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah menjadi solusi yang semakin populer untuk mengatasi tantangan dalam manajemen limbah konstruksi. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur dan rehabilitasi jalan, volume aspal yang dihasilkan dari proyek perbaikan jalan semakin tinggi. RAP menawarkan pendekatan yang berkelanjutan dengan

mendaur ulang material yang sudah ada, sehingga mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, penggunaan RAP membantu mengurangi dampak lingkungan dengan menurunkan konsumsi energi, emisi karbon, dan limbah konstruksi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan diperoleh bahwa penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas dan kekuatan campuran, terutama pada proporsi yang lebih rendah (10-20%). Hasil pengujian menunjukkan bahwa RAP dapat digunakan sebagai bahan daur ulang yang memenuhi atau bahkan melampaui performa campuran aspal konvensional, memberikan solusi yang berkelanjutan dalam manajemen limbah konstruksi. Meskipun RAP menawarkan banyak manfaat, tantangan dalam hal variabilitas kualitas material, pengujian yang baik dan kesesuaian produksi dengan standart tetap ada. Selain itu, untuk memaksimalkan penggunaan RAP, diperlukan optimasi yang cermat dalam formulasi campuran dan penanganan material, serta dukungan regulasi dan kebijakan yang kuat untuk memastikan penerapan yang luas dan berkualitas. RAP berkontribusi signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi kebutuhan bahan baku baru, menurunkan emisi karbon, dan mengurangi volume limbah konstruksi. Penggunaan RAP tidak hanya mendukung inisiatif lingkungan, tetapi juga menawarkan manfaat ekonomi dengan mengurangi biaya material dan pengelolaan limbah, menjadikan komponen penting dalam strategi pembangunan infrastruktur menuju Indonesia Emas 2045.

Referensi

- Afdal, A., Wibisono, G., & Muhandi, M. (2019). Pengaruh Pemakaian Peremaja Anti Rayap Dan Aspal Pen 60/70 Terhadap Kinerja Rap (Reclaimed Asphalt Pavement) Ac-Wc Gradasi Halus Berdasarkan Uji Marshall. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.31258/jst.v17.n1.p1-8>
- Fakhri, M., & Amosoltani, E. (2017). The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>
- Farooq, M. A., Mir, M. S., & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.079>
- Hariz Akrom, F., Putra, S., & Herianto, D. (2020). Stabilitas Campuran Aspal Berbahan Dasar Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). 8(3), 599–608.
- Hasriana, Datu, I. T., & Nabi, A. (2020). Studi Evaluasi Pemanfaatan Limbah Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) Dengan Penambahan Pasir Sebagai Bahan Subgrade Jalan. *Prosiding 4th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2020*, 93–96.
- Kumar, V., & Aggarwal, P. (2023). Characteristics of Waste Oil-rejuvenated RAP Bitumen: An Experimental Study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(3), 443–456. <https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i3.07>
- Meilani, M., & Kurnia, R. (2019). Kajian Parameter Marshall Campuran Hangat Lataston (HRS-WC) Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). (Hal. 120-131). *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 5(4), 6–33. <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/3397>
- Pasayu, D., Arliansyah, J., & Kadarsa, E. (2023). Pemanfaatan Recycling Asphalt untuk Lapisan AC-WC dengan Penambahan Material Bottom Ash pada Perkerasan Lentur. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12(1), 29–40. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v12i1.182>
- Pavement, R. A., Tensile, I., & Test, S. (2023). 168–153), 7(29). *دراسة تأثير اسخادام مواد لامعادتدوير*.
- Rif'an, A., & Sunarjono, S. (2016). Pengembangan Campuran Split Mastic Asphalt menggunakan Bahan Reclaimed Asphalt Pavement dan Ijuk. *The 3rd University Research Coloqium*, 123–130.
- Toth, C., Petho, L., & Rosta, S. (2023). Rheological characterisation of bituminous binder blends for the design of asphalt mixes containing high recycled asphalt content. *Acta Technica Jaurinensis*, 16(2), 62–74. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00694>
- Twidi, R., Program Doktor, B., Sugeng, B., Program Doktor, S., Rahman, H., & Doktor, P. (2018). Campuran Beraspal Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement Dan Agregat Slag Baja. *Agustus*, 18(2), 117–126.
- Vol, J. S., Penambahan, P., Terhadap, A., & Ambon, K. (2000). MARSHALL PADA MATERIAL RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT. 13(1), 683–689.
- Xiao, J., Wang, T., Hong, J., Ruan, C., Zhang, Y., Yuan, D., & Wu, W. (2023). Experimental Study of Permeable Asphalt Mixture Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Sustainability*

(Switzerland), 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310676>