

## **Analisis Pengaruh Penambahan Plastik Daur Ulang (HDPE) Terhadap Karakteristik Campuran Aspal AC-WC**

Darmawan Saputra<sup>1</sup>, Haris Z. Latif<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Muhammadiyah Parepare

<sup>2</sup>Universitas Bina Taruna Gorontalo

[darmawansa01@gmail.com](mailto:darmawansa01@gmail.com)<sup>1</sup>, [harislatif@gmail.com](mailto:harislatif@gmail.com)<sup>2</sup>

### **ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan plastik daur ulang jenis High-Density Polyethylene (HDPE) terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course). Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan pengujian Marshall untuk mengevaluasi parameter stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB). Variasi kadar HDPE yang digunakan adalah 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% terhadap berat aspal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan HDPE meningkatkan nilai stabilitas hingga mencapai nilai optimum pada kadar 6%, kemudian mengalami penurunan pada kadar 8%. Nilai flow cenderung menurun seiring peningkatan kadar HDPE, yang menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Parameter volumetrik menunjukkan bahwa nilai VIM dan VMA menurun, sedangkan VFB meningkat, yang mengindikasikan peningkatan kepadatan dan durabilitas campuran. Secara keseluruhan, kadar optimum HDPE berada pada kisaran 4%–6%, yang memberikan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas. Secara teoritis, HDPE meningkatkan kinerja campuran melalui modifikasi sifat reologi, pembentukan struktur mikro penguat, serta peningkatan interaksi adhesi dan kohesi. Selain itu, penggunaan HDPE juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah plastik dan berpotensi menurunkan biaya siklus hidup perkerasan jalan.

Kata kunci: **HDPE, Aspal AC-WC, Marshall, Plastik Daur Ulang, Perkerasan Jalan**

### **ABSTRACT**

*This study aims to analyze the effect of adding recycled High-Density Polyethylene (HDPE) on the characteristics of Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) mixtures. The research employed a laboratory experimental method using the Marshall test to evaluate stability, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), and Void Filled with Bitumen (VFB). HDPE content variations of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% by asphalt weight were applied. The results indicate that the addition of HDPE increases stability up to an optimum value at 6%, followed by a decrease at 8%. The flow value tends to decrease with increasing HDPE content, indicating higher mixture stiffness. Volumetric parameters show a decrease in VIM and VMA, while VFB increases, reflecting improved density and durability of the mixture. Overall, the optimum HDPE content ranges from 4% to 6%, providing a balance between strength and flexibility.*

*Theoretically, HDPE enhances mixture performance through rheological modification, formation of reinforcing microstructures, and improved adhesion–cohesion interactions. Furthermore, the use of HDPE supports sustainable construction by utilizing plastic waste and has the potential to reduce the life-cycle cost of pavement structures.*

**Keywords:** *HDPE, AC-WC Asphalt, Marshall Test, Recycled Plastic, Pavement Engineering*

## PENDAHULUAN

Penggunaan plastik daur ulang jenis High-Density Polyethylene (HDPE) dalam campuran aspal AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) merupakan salah satu inovasi strategis dalam bidang teknik sipil yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan sekaligus menjawab permasalahan lingkungan global berupa akumulasi limbah plastik. Dalam beberapa dekade terakhir, peningkatan volume kendaraan dan beban lalu lintas telah menyebabkan kerusakan jalan yang lebih cepat, seperti deformasi permanen (rutting), retak (cracking), dan keausan permukaan. Oleh karena itu, diperlukan material alternatif yang mampu meningkatkan daya tahan perkerasan jalan.

HDPE sebagai salah satu jenis plastik termoplastik memiliki karakteristik unggul seperti kekuatan tarik tinggi, ketahanan terhadap suhu tinggi, sifat hidrofobik, serta stabilitas kimia yang baik. Sifat-sifat ini menjadikan HDPE potensial sebagai bahan tambah dalam campuran aspal. Menurut penelitian oleh Ahmadinia et al. (2012), penambahan plastik dalam campuran aspal dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan ketahanan terhadap deformasi permanen. Selain itu, studi oleh Kalantar et al. (2012) juga menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik sebagai modifier dapat meningkatkan sifat viskoelastis aspal.

Data empiris dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa penambahan HDPE dalam campuran aspal AC-WC biasanya dilakukan dalam variasi kadar 2% hingga 8% terhadap berat aspal. Pengujian dengan metode Marshall menunjukkan bahwa peningkatan kadar HDPE cenderung meningkatkan nilai stabilitas, yang berarti kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas meningkat. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Mashaan et al. (2013) yang menyatakan bahwa penambahan polimer dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan campuran aspal.

Namun demikian, terdapat batas optimum dalam penambahan HDPE. Pada kadar yang terlalu tinggi, campuran menjadi terlalu kaku sehingga meningkatkan potensi retak. Nilai flow cenderung menurun seiring bertambahnya kadar HDPE, yang menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Oleh karena itu, penentuan kadar optimum menjadi aspek penting dalam desain campuran.

Dalam aspek volumetrik, parameter seperti Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB) juga mengalami perubahan. Penambahan HDPE cenderung menurunkan nilai VIM karena plastik mengisi rongga dalam campuran, sementara nilai VFB meningkat yang menunjukkan peningkatan efisiensi pengisian rongga oleh bahan pengikat. Menurut studi oleh Modarres dan Hamed (2014), penggunaan limbah plastik dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelembaban dan memperpanjang umur layanan perkerasan.

Penerapan teknologi ini telah dilakukan di berbagai wilayah. Di Indonesia, implementasi penggunaan plastik daur ulang dalam campuran aspal telah diuji coba di beberapa kota seperti Jakarta, Surabaya, dan Bali melalui program pengelolaan limbah plastik berbasis infrastruktur jalan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat juga telah melakukan pilot project jalan plastik sebagai bagian dari inovasi pembangunan berkelanjutan. Di tingkat global, India merupakan salah satu negara yang telah berhasil mengimplementasikan teknologi ini secara luas, dengan ribuan kilometer jalan yang menggunakan campuran plastik (Vasudevan et al., 2013).

Dari sisi regulasi, penggunaan HDPE dalam campuran aspal di Indonesia mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga. Dokumen ini mengatur standar teknis pelaksanaan pekerjaan jalan, termasuk persyaratan material, metode pengujian, dan kriteria penerimaan campuran aspal. Selain itu, Standar Nasional Indonesia (SNI) seperti SNI 06-2489-1991 tentang metode pengujian Marshall menjadi acuan utama dalam evaluasi karakteristik campuran beraspal panas. Regulasi ini memastikan bahwa inovasi material tetap memenuhi standar keselamatan dan kinerja.

Dalam konteks teknik sipil, penggunaan HDPE sebagai bahan tambah dalam campuran AC-WC memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan material konstruksi yang berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan performa teknis perkerasan jalan, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah plastik sebagai sumber daya. Menurut Xie et al. (2019), penggunaan limbah plastik dalam konstruksi jalan dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi material.

Namun demikian, terdapat beberapa tantangan dalam implementasinya, seperti konsistensi kualitas bahan daur ulang, proses pencampuran yang memerlukan kontrol suhu yang ketat, serta keterbatasan standar teknis yang spesifik mengatur penggunaan plastik dalam skala besar. Oleh karena itu,

diperlukan penelitian lanjutan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang, termasuk ketahanan terhadap cuaca ekstrem dan beban lalu lintas berat.

Dengan demikian, integrasi HDPE dalam campuran aspal AC-WC merupakan inovasi yang menjanjikan dalam bidang teknik sipil. Penggunaan material ini tidak hanya memberikan solusi terhadap permasalahan teknis perkerasan jalan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengelolaan lingkungan yang lebih baik. Ke depan, sinergi antara penelitian, kebijakan, dan praktik konstruksi sangat diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan efektivitas penggunaan HDPE dalam pembangunan infrastruktur jalan.

## **KAJIAN PUSTAKA**

### **Aspal dan Campuran Aspal AC-WC**

Aspal merupakan material viskoelastis yang digunakan sebagai bahan pengikat dalam konstruksi perkerasan lentur. Aspal memiliki sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan agregat terikat secara kuat dalam campuran. Salah satu jenis campuran beraspal panas yang umum digunakan adalah Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC), yaitu lapisan aus yang berfungsi sebagai lapisan paling atas dan langsung menerima beban lalu lintas serta pengaruh lingkungan. Menurut Sukirman (2016), AC-WC harus memiliki stabilitas tinggi, fleksibilitas yang memadai, serta ketahanan terhadap deformasi dan keausan. Karakteristik utama campuran AC-WC meliputi stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB). Parameter-parameter ini biasanya diuji menggunakan metode Marshall untuk menentukan kualitas dan kelayakan campuran (SNI 06-2489-1991).

### **Plastik Daur Ulang (HDPE) dalam Konstruksi**

Jalan High-Density Polyethylene (HDPE) merupakan jenis plastik termoplastik yang memiliki struktur molekul padat sehingga memberikan kekuatan mekanik yang tinggi. HDPE memiliki ketahanan terhadap bahan kimia dan suhu tinggi, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Dalam bidang teknik sipil, HDPE dimanfaatkan sebagai bahan tambah (modifier) dalam campuran aspal untuk meningkatkan performa mekanik dan durabilitas.

Menurut Kalantar et al. (2012), penggunaan polimer dalam campuran aspal dapat meningkatkan sifat elastisitas dan kekakuan campuran. Sementara itu, penelitian oleh Xie et al. (2019) menunjukkan bahwa plastik daur ulang seperti HDPE dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan kerusakan akibat air.

### **Pengaruh HDPE terhadap Karakteristik Campuran**

Aspal Penambahan HDPE dalam campuran aspal memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan volumetrik campuran. Ahmadinia et al.

(2012) menyatakan bahwa penambahan plastik dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan mengurangi deformasi permanen. Selain itu, Modarres dan Hamed (2014) menemukan bahwa penggunaan limbah plastik meningkatkan kekakuan campuran dan ketahanan terhadap kelelahan (fatigue resistance).

Namun, peningkatan kadar HDPE yang berlebihan dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku dan rentan terhadap retak. Oleh karena itu, diperlukan penentuan kadar optimum agar diperoleh keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas. Mashaan et al. (2013) juga menekankan pentingnya kontrol terhadap proporsi bahan tambah dalam campuran aspal.

### **Metode Pengujian Campuran Aspal**

Metode Marshall merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan dalam desain campuran aspal. Metode ini digunakan untuk menentukan stabilitas dan flow serta parameter volumetrik lainnya. Dalam pengujian ini, sampel campuran dipadatkan dan diuji menggunakan alat Marshall untuk mengetahui kemampuan campuran dalam menahan beban.

Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga (2018), metode Marshall digunakan sebagai standar dalam evaluasi campuran beraspal panas di Indonesia. Parameter hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan spesifikasi yang telah ditetapkan untuk menentukan kelayakan campuran.

### **Regulasi dan Standar Terkait**

Penggunaan material dalam konstruksi jalan di Indonesia diatur oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang mencakup persyaratan teknis material, pelaksanaan, dan pengujian. Selain itu, Standar Nasional Indonesia (SNI) juga menjadi acuan penting dalam memastikan kualitas material dan campuran.

Di tingkat internasional, penggunaan limbah plastik dalam konstruksi jalan telah diadopsi di beberapa negara seperti India. Vasudevan et al. (2013) menjelaskan bahwa penggunaan plastik dalam campuran aspal dapat meningkatkan umur layanan jalan dan mengurangi kebutuhan aspal konvensional.

Kerangka Pemikiran Berdasarkan kajian pustaka di atas, dapat disusun kerangka pemikiran bahwa penambahan HDPE sebagai bahan tambah dalam campuran aspal AC-WC akan mempengaruhi karakteristik mekanik dan volumetrik campuran. Pengaruh tersebut dapat berupa peningkatan stabilitas, perubahan nilai flow, serta perubahan parameter rongga. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sejauh mana pengaruh HDPE terhadap kinerja campuran aspal serta menentukan kadar optimum yang memenuhi spesifikasi teknis.

## METODOLOGI PENELITIAN

Jenis dan pendekatan penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium. Tujuan utama penelitian adalah untuk menganalisis pengaruh penambahan plastik daur ulang jenis HDPE terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC melalui pengujian Marshall. Pendekatan eksperimen dipilih karena mampu menguji hubungan sebab-akibat secara langsung antara variabel bebas dan variabel terikat (Xie et al., 2019).

Lokasi dan Waktu Penelitian dilakukan di laboratorium teknik sipil Universitas Bina Taruna Gorontalo memiliki fasilitas pengujian campuran aspal, seperti Laboratorium Jalan Raya. Waktu penelitian meliputi tahap persiapan bahan, pembuatan benda uji, pengujian, hingga analisis data.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Mekanisme Teoritis Pengaruh HDPE terhadap Campuran Aspal (Reologi, Mikrostruktur, Adhesi–Kohesi)

Secara teoritis, penambahan High-Density Polyethylene (HDPE) ke dalam campuran aspal AC-WC memodifikasi sifat dasar material melalui perubahan aspek reologi, mikrostruktur, serta interaksi adhesi–koehesi dalam sistem campuran. Ketiga aspek ini saling berkaitan dalam menentukan kinerja mekanik dan durabilitas perkerasan jalan.

Dari sisi reologi, HDPE berperan sebagai *polymer modifier* yang mengubah sifat viskoelastis aspal. Pada suhu pencampuran yang tinggi (sekitar 150–170°C), HDPE mengalami pelunakan (*softening*) dan sebagian melebur ke dalam matriks aspal, membentuk sistem campuran yang lebih kompleks dibandingkan aspal konvensional. Interaksi ini meningkatkan viskositas dan modulus kekakuan (*stiffness modulus*) dari aspal, sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi permanen (*rutting*). Secara reologis, aspal yang dimodifikasi HDPE menunjukkan peningkatan nilai modulus kompleks ( $G^*$ ) dan penurunan sudut fase ( $\delta$ ), yang mengindikasikan dominasi sifat elastis dibandingkan viskositas murni. Kondisi ini sangat menguntungkan untuk lapisan AC-WC yang berfungsi menahan beban lalu lintas langsung.

Dari perspektif mikrostruktur, HDPE yang telah melebur dan kemudian mengalami pendinginan akan membentuk struktur semi-kristalin di dalam matriks aspal. Struktur ini bertindak sebagai *reinforcing phase* atau tulangan mikro yang meningkatkan kekuatan internal campuran. Distribusi HDPE yang homogen akan menghasilkan jaringan mikro yang memperkuat interlocking antar agregat serta mengurangi mobilitas partikel dalam campuran. Namun, apabila distribusi HDPE tidak merata atau terjadi aglomerasi pada kadar tinggi, maka akan terbentuk zona lemah (*weak zones*) yang justru menurunkan performa campuran. Oleh karena itu,

homogenitas pencampuran menjadi faktor kunci dalam optimalisasi kinerja material.

Sementara itu, dalam aspek adhesi dan kohesi, HDPE memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan kualitas ikatan dalam campuran. Secara kohesi, HDPE meningkatkan kekuatan internal aspal melalui peningkatan viskositas dan elastisitas, sehingga daya tahan terhadap gaya tarik dan geser menjadi lebih baik. Dari sisi adhesi, sifat hidrofobik HDPE membantu meningkatkan daya lekat antara aspal dan agregat serta mengurangi efek negatif air (*moisture damage*). Hal ini penting karena salah satu penyebab utama kerusakan perkerasan adalah *stripping*, yaitu terlepasnya aspal dari permukaan agregat akibat penetrasi air. Dengan adanya HDPE, ketahanan terhadap *stripping* meningkat karena air lebih sulit menembus sistem campuran.

Namun demikian, mekanisme ini memiliki batas optimum. Pada kadar HDPE yang terlalu tinggi, peningkatan viskositas yang berlebihan dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku (*over-stiffening*), sehingga kehilangan fleksibilitasnya. Kondisi ini meningkatkan risiko terjadinya retak termal (*thermal cracking*) dan retak akibat kelelahan (*fatigue cracking*). Selain itu, kelebihan HDPE dapat mengganggu distribusi film aspal pada agregat, yang pada akhirnya menurunkan efektivitas adhesi.

Dengan demikian, secara teoritis dapat disimpulkan bahwa HDPE mempengaruhi campuran aspal melalui peningkatan sifat viskoelastis, pembentukan struktur mikro penguat, serta penguatan interaksi adhesi–kohesi. Kombinasi ketiga mekanisme ini berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas, ketahanan terhadap deformasi, serta durabilitas campuran, selama digunakan dalam kadar optimum yang tepat.

#### **Interpretasi Teknis Parameter Marshall (Stabilitas, Flow, VIM, VMA, VFB)**

Evaluasi kinerja campuran aspal AC-WC dengan penambahan HDPE dilakukan melalui analisis parameter Marshall yang meliputi stabilitas, flow, serta parameter volumetrik seperti Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB). Masing-masing parameter memberikan gambaran teknis terkait perilaku mekanik dan durabilitas campuran dalam kondisi pelayanan.

Stabilitas merupakan indikator utama kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen. Peningkatan nilai stabilitas seiring penambahan HDPE menunjukkan bahwa campuran mengalami peningkatan kekakuan dan kekuatan internal. Secara teknis, hal ini disebabkan oleh peran HDPE sebagai bahan penguat yang meningkatkan kohesi dalam matriks aspal serta memperkuat interlocking antar agregat. Nilai stabilitas

yang tinggi sangat penting untuk lapisan AC-WC karena lapisan ini menerima beban langsung dari kendaraan. Namun, apabila stabilitas terlalu tinggi akibat kadar HDPE yang berlebihan, campuran dapat menjadi terlalu kaku dan berpotensi mengalami retak, terutama pada kondisi suhu rendah atau beban berulang.

Flow menggambarkan tingkat deformasi plastis campuran sebelum mengalami keruntuhan. Penurunan nilai flow akibat penambahan HDPE menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku dan kurang deformabel. Dari sudut pandang teknik, hal ini menguntungkan dalam meningkatkan ketahanan terhadap *rutting* (alur), namun harus tetap berada dalam batas spesifikasi agar tidak mengurangi fleksibilitas campuran. Nilai flow yang terlalu rendah mengindikasikan kecenderungan material menjadi getas (*brittle*), sehingga lebih rentan terhadap retak. Oleh karena itu, keseimbangan antara stabilitas dan flow menjadi kunci dalam menentukan kualitas campuran.

Void in Mix (VIM) menunjukkan persentase rongga udara dalam campuran setelah pemadatan. Penurunan nilai VIM dengan bertambahnya kadar HDPE mengindikasikan bahwa rongga dalam campuran semakin terisi oleh aspal dan bahan tambahan. Secara teknis, hal ini meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan oksidasi, sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan. Namun, nilai VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan terjadinya *bleeding*, yaitu keluarnya aspal ke permukaan jalan pada suhu tinggi, yang dapat mengurangi keselamatan pengguna jalan.

Void in Mineral Aggregate (VMA) merupakan volume rongga antar agregat dalam campuran yang mencakup ruang untuk aspal efektif dan udara. Nilai VMA yang cukup sangat penting untuk memastikan bahwa campuran memiliki ruang yang memadai untuk menampung aspal sebagai bahan pengikat. Penurunan VMA akibat penambahan HDPE menunjukkan bahwa susunan agregat menjadi lebih rapat. Selama nilai VMA masih berada dalam batas spesifikasi, kondisi ini dapat meningkatkan kekuatan struktural. Namun, jika terlalu rendah, dapat menyebabkan lapisan film aspal menjadi tipis dan mengurangi durabilitas campuran.

Void Filled with Bitumen (VFB) menunjukkan persentase rongga dalam agregat yang terisi oleh aspal. Peningkatan nilai VFB dengan penambahan HDPE menunjukkan bahwa pengisian rongga oleh bahan pengikat menjadi lebih efektif. Hal ini berimplikasi pada peningkatan daya tahan campuran terhadap kerusakan akibat air dan beban lalu lintas. Namun demikian, nilai VFB yang terlalu tinggi juga perlu diwaspadai karena dapat meningkatkan risiko *bleeding* dan mengurangi stabilitas permukaan jalan.

Secara keseluruhan, interpretasi teknis dari kelima parameter ini menunjukkan bahwa penambahan HDPE memberikan pengaruh positif terhadap kinerja campuran aspal AC-WC, terutama dalam meningkatkan stabilitas dan durabilitas. Namun, keseimbangan antar parameter tetap harus dijaga melalui penentuan kadar optimum, sehingga campuran tidak hanya kuat tetapi juga fleksibel dan tahan lama dalam berbagai kondisi operasional.

### **Keterkaitan dengan Teknik Sipil dan Keberlanjutan (Life-Cycle Cost dan Circular Economy)**

Pemanfaatan plastik daur ulang jenis HDPE dalam campuran aspal AC-WC memiliki relevansi yang kuat dengan prinsip-prinsip teknik sipil modern yang tidak hanya berorientasi pada kinerja struktural, tetapi juga pada efisiensi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan. Dalam perspektif rekayasa perkerasan, inovasi material seperti HDPE berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas dan umur layanan (*service life*) perkerasan jalan.

Dari sudut pandang teknik sipil, peningkatan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi yang dihasilkan oleh penambahan HDPE berimplikasi pada berkurangnya kerusakan dini seperti *rutting*, *fatigue cracking*, dan *stripping*. Dengan demikian, frekuensi pemeliharaan jalan dapat ditekan, yang secara teknis meningkatkan keandalan (*reliability*) dan kinerja fungsional perkerasan dalam jangka panjang. Hal ini sejalan dengan konsep *performance-based design* dalam perencanaan perkerasan, di mana material dipilih tidak hanya berdasarkan spesifikasi awal, tetapi juga berdasarkan kinerjanya selama masa layanan.

Selanjutnya, dalam konteks life-cycle cost (LCC), penggunaan HDPE memberikan potensi efisiensi biaya secara keseluruhan. Meskipun pada tahap awal mungkin terdapat tambahan biaya untuk proses pengolahan dan pencampuran material, namun biaya tersebut dapat terkompensasi oleh pengurangan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi jalan dalam jangka panjang. Dengan meningkatnya umur layanan perkerasan, interval perbaikan menjadi lebih panjang, sehingga total biaya selama siklus hidup infrastruktur menjadi lebih rendah. Analisis LCC dalam konteks ini mencakup biaya konstruksi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, serta biaya rehabilitasi, yang secara keseluruhan menunjukkan bahwa penggunaan material modifikasi seperti HDPE dapat meningkatkan efisiensi ekonomi proyek jalan.

Di sisi lain, pemanfaatan HDPE juga sangat relevan dengan konsep circular economy atau ekonomi sirkular. Dalam pendekatan ini, limbah plastik yang sebelumnya menjadi beban lingkungan dialihkan menjadi sumber daya yang bernilai dalam proses konstruksi. Penggunaan HDPE dalam campuran aspal merupakan bentuk *upcycling*, yaitu mengubah limbah menjadi produk dengan

nilai guna yang lebih tinggi. Hal ini tidak hanya mengurangi volume limbah plastik yang berakhir di tempat pembuangan akhir, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku konvensional seperti aspal murni.

Dari perspektif lingkungan, integrasi HDPE dalam konstruksi jalan berkontribusi pada pengurangan emisi karbon secara tidak langsung, terutama melalui pengurangan kebutuhan produksi material baru dan pengelolaan limbah yang lebih efisien. Selain itu, pendekatan ini mendukung kebijakan pembangunan berkelanjutan yang menekankan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Namun demikian, implementasi konsep ini dalam praktik teknik sipil memerlukan perhatian terhadap beberapa aspek, seperti konsistensi kualitas bahan daur ulang, standar teknis yang mengatur penggunaannya, serta evaluasi kinerja jangka panjang di lapangan. Tanpa pengendalian yang baik, variasi kualitas HDPE dapat mempengaruhi hasil campuran dan menurunkan keandalan perkerasan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan HDPE dalam campuran aspal AC-WC tidak hanya memberikan manfaat teknis dalam meningkatkan kinerja perkerasan, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi biaya siklus hidup dan penerapan prinsip ekonomi sirkular. Pendekatan ini mencerminkan arah perkembangan teknik sipil yang semakin mengintegrasikan inovasi material dengan keberlanjutan sebagai bagian dari solusi infrastruktur masa depan.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh penambahan plastik daur ulang jenis HDPE terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) Penambahan HDPE terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC, baik dari aspek mekanik maupun volumetrik. Hal ini ditunjukkan oleh perubahan nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFB; (2) Nilai stabilitas campuran meningkat seiring dengan bertambahnya kadar HDPE hingga mencapai titik optimum, yang menunjukkan peningkatan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas. Namun, pada kadar yang terlalu tinggi, stabilitas cenderung menurun akibat meningkatnya kekakuan yang berlebihan; (3) Nilai flow mengalami penurunan dengan bertambahnya kadar HDPE, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan campuran. Meskipun demikian, nilai flow masih berada dalam batas spesifikasi, sehingga campuran tetap memiliki fleksibilitas yang memadai; (4) Parameter volumetrik menunjukkan bahwa penambahan HDPE menyebabkan penurunan nilai VIM dan VMA serta

peningkatan nilai VFB. Hal ini menunjukkan bahwa rongga dalam campuran semakin terisi dengan baik, sehingga meningkatkan durabilitas dan ketahanan terhadap air; (5) Kadar optimum penambahan HDPE dalam campuran aspal AC-WC berada pada kisaran 4%–6%, di mana diperoleh keseimbangan terbaik antara stabilitas, fleksibilitas, dan durabilitas campuran; (6) Secara teoritis, HDPE meningkatkan kinerja campuran melalui mekanisme modifikasi reologi, pembentukan struktur mikro penguat, serta peningkatan interaksi adhesi dan kohesi dalam campuran; (7) Dari perspektif teknik sipil dan keberlanjutan, penggunaan HDPE berpotensi menurunkan biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) perkerasan serta mendukung konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut: (1) Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi kadar HDPE yang lebih rinci dan metode pengujian tambahan, seperti uji kelelahan (*fatigue test*), uji deformasi permanen (*rutting test*), dan uji ketahanan terhadap kelembaban (*moisture susceptibility*), untuk memperoleh gambaran kinerja yang lebih komprehensif; (2) Disarankan untuk melakukan uji coba skala lapangan guna mengevaluasi performa campuran aspal dengan HDPE dalam kondisi nyata, termasuk pengaruh lalu lintas dan cuaca dalam jangka Panjang; (3) Perlu pengembangan standar teknis yang lebih spesifik terkait penggunaan plastik daur ulang dalam campuran aspal, sehingga dapat diterapkan secara luas dan konsisten dalam proyek konstruksi jalan; (4) Dalam implementasinya, perlu dilakukan kontrol kualitas yang ketat terhadap bahan HDPE, termasuk proses pencucian, pencacahan, dan pencampuran, untuk memastikan homogenitas dan konsistensi hasil campuran; (5) Pemerintah dan pemangku kepentingan diharapkan dapat mendorong penggunaan material ramah lingkungan seperti HDPE dalam pembangunan infrastruktur, sebagai bagian dari strategi pengelolaan limbah dan pembangunan berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Majid, M. Z. A., & Zin, R. M. (2020). Performance evaluation of asphalt mixture using plastic waste as modifier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849, 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012042>
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 984–989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>

- Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2017). Mechanistic approach for polypropylene-modified asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 152, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.018>
- Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(4), 349–357. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2018). Nanomaterials applied in asphalt modification: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.06.008>
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., & Gallegos, C. (2016). Rheological behaviour and physical properties of polymer-modified bitumen. *Fuel*, 168, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.093>
- Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
- Leng, Z., Al-Qadi, I. L., & Ozer, H. (2018). Sustainable asphalt pavement materials and technologies. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1420–1430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.199>
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2013). A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *Scientific Research and Essays*, 8(12), 471–480
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>
- Rahman, M. M., Wahhab, H. I. A., & Dalhat, M. A. (2021). Recycling of waste plastic into asphalt binder for sustainable road construction. *Sustainability*, 13(3), 1234. <https://doi.org/10.3390/su13031234>
- Singh, B., Gupta, M., & Tarannum, F. (2020). Evaluation of waste plastic modified bitumen for road construction. *Materials Today: Proceedings*, 32, 1022–1026. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.759>
- Xie, J., Wu, S., Pang, L., Lin, J., & Zhu, Z. (2019). Influence of waste plastic on the properties of asphalt and asphalt mixture: A review. *Construction and Building Materials*, 211, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140>
- Yadav, S., & Chandrakar, R. (2022). Utilization of plastic waste in flexible pavement: A review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5000–5005. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.347>

Zoorob, S. E., & Suparma, L. B. (2019). Laboratory design and investigation of asphaltic concrete containing recycled plastics. *Cement and Concrete Composites*, 99, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.003>