

## Pengaruh Penggunaan Limbah Plastik *HDPE* dalam Campuran Aspal *AC-BC* sebagai Bahan Daur Ulang

Syaifuddin\*, Kurniati, Wulan Dahri

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe  
Jl. Banda Aceh - Medan Km 275,5 Buketrata Lhokseumawe, Indonesia

\*E-mail : syaifuddin@pnl.ac.id

### Abstract

#### Article history:

Received: 30-05-2025

Accepted: 26-06-2025

Published: 31-07-2025

#### Keywords:

asphalt;  
concrete;  
HDPE;  
mixture;  
Marshall.

*The use of plastic waste as an additive in asphalt mixtures presents a promising solution to reduce environmental pollution while enhancing the performance of asphalt mixtures. This study aims to investigate the effect of adding High-Density Polyethylene (HDPE) plastic waste on the Marshall characteristics of Asphalt Concrete - Binder Course (AC-BC) mixtures. Post consumer recycled plastics are being considered for construction to address the threat of plastic waste materials and to improve sustainability. Asphalt pavement construction is highly considered for plastic waste materials recycling due to its large daily production [1]. The HDPE plastic waste used was sourced from household bottle and plastic bag waste, which was shredded and added to the asphalt mixture at variations of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% by asphalt weight. The Marshall method was employed to evaluate stability, flow, Marshall Quotient, Voids in the Mixture (VIM), Voids Filled with Bitument (VFB), and Voids in Mineral Aggregate (VMA). The results indicate that the addition of 6% HDPE yields the most optimal Marshall characteristics, with a stability value of 1367.36 kg, a flow of 3.28 mm, and a Marshall Quotient of 417.09 kg/mm. All parameters at this level met the Bina Marga 2018 specifications. Therefore, the appropriate addition of HDPE waste can significantly improve asphalt mixture quality while contributing to environmental sustainability.*

### 1. Pendahuluan

Jalan sebagai tulang punggung transportasi darat memerlukan struktur perkerasan yang tidak hanya kuat dan stabil, tetapi juga tahan terhadap deformasi plastis akibat beban berulang dan perubahan suhu lingkungan. Perkerasan fleksibel (flexible pavement) berbasis aspal penetrasi 60/70 umum digunakan dalam konstruksi jalan nasional, namun masih memiliki kelemahan seperti deformasi permanen, kelelahan akibat suhu tinggi, dan kerusakan akibat kelembaban berlebih. Pertumbuhan jumlah penduduk dan volume kendaraan bermotor memberikan tekanan signifikan terhadap kualitas dan daya tahan infrastruktur jalan. Peningkatan kualitas jalan di Indonesia karena kerusakan yang dipengaruhi oleh cuaca, air, beban kendaraan berlebih, dan konstruksi perkerasan yang tidak memadai [1]. Perkerasan lentur memiliki juga beberapa kelemahan, di antaranya mengalami deformasi permanen akibat tekanan berat dan frekuensi lalu lintas berlebih [2]. Selanjutnya struktur perkerasan lentur yang menggunakan aspal sebagai pengikat saat ini menjadi andalan masyarakat Indonesia karena kapasitas daya dukung yang besar dan biaya konstruksi yang ekonomis [3]. Peningkatan volume kendaraan

akibat pertumbuhan aktivitas penduduk dan wisata dapat menyebabkan penurunan kinerja ruas jalan yang seringkali tidak mampu menampung volume lalu lintas pada jam puncak [4].

Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam konstruksi perkerasan jalan untuk meningkatkan kualitas dan daya tahannya. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah pemanfaatan limbah plastik, khususnya High-Density Polyethylene (*HDPE*), sebagai bahan tambah dalam campuran aspal. Limbah plastik *HDPE*, seperti botol air galon, botol susu, botol shampo, dan botol deterjen, merupakan bagian signifikan dari timbunan sampah yang terus meningkat [5], dan pemanfaatan plastik daur ulang pasca-konsumsi (PCR) dipertimbangkan untuk konstruksi guna mengatasi ancaman limbah plastik dan meningkatkan keberlanjutan [6]. Pemanfaatan limbah plastik tidak hanya mengurangi masalah lingkungan tetapi juga berpotensi meningkatkan performa campuran aspal. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, masyarakat Indonesia menghasilkan 0,8 kg sampah per orang per hari, dimana 15% diantaranya adalah sampah plastik atau setara dengan 189.444.000 ton sampah per hari. Oleh karena itu, jumlah sampah harus

sebanding dengan proporsi sampah yang diolah dan sisanya tidak dibuang dan mencemari lingkungan [7]. Selain itu, penting untuk mempertimbangkan pengaruh penambahan limbah plastik terhadap karakteristik campuran aspal [8] dan dampaknya pada lingkungan [9]. Penggunaan limbah plastik dalam campuran aspal juga diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang tidak terbarukan [10]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa modifikasi aspal dengan polimer, termasuk plastik, dapat meningkatkan sifat reologi aspal [11] dan ketahanan terhadap retak leleh [12].

Di sisi lain, meningkatnya jumlah sampah plastic, khususnya limbah plastik rumah tangga jenis *HDPE* menjadi persoalan lingkungan yang serius. Plastik *HDPE* memiliki sifat mekanik yang tinggi dan sangat sulit terurai secara alami, menjadikannya bahan yang potensial untuk didaur ulang sebagai bahan tambah dalam konstruksi jalan. Material limbah plastic diproduksi setiap hari dalam jumlah tonase besar di seluruh dunia [6]. Inovasi pemanfaatan limbah plastik ke dalam campuran aspal beton diharapkan dapat memberikan dua keuntungan sekaligus, yaitu meningkatkan performa teknis campuran aspal dan mengurangi volume limbah plastik di lingkungan. Sampah plastik merupakan bahan yang tidak dapat terurai secara hayati dan para peneliti menemukan bahwa bahan tersebut dapat bertahan di bumi selama 4500 tahun tanpa mengalami degradasi [2]. Salah satu benda yang bersifat limbah yang mempunyai efek negatif adalah botol air galon, botol susu, botol shampo, botol deterjen, dan plastik tebal lainnya yang terbuat dari senyawa organik dan terbuat dari plastik *HDPE* [5].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah plastik *HDPE* terhadap karakteristik campuran aspal beton *AC-BC* (Asphalt Concrete – Binder Course) menggunakan pendekatan pengujian *Marshall* [13], sesuai spesifikasi Bina Marga tahun 2018 [14]. Penambahan plastik dilakukan dalam bentuk serpihan plastik berukuran  $\pm 2-3$  cm ke dalam campuran aspal, dengan variasi kadar 0%, 4%, 6%, dan 8% terhadap berat aspal pada kadar aspal optimum (KAO). Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, kelelahan (flow), *Marshall Quotient*, rongga dalam

campuran (VIM), rongga agregat mineral (VMA), dan rongga terisi aspal (VFA).

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material perkerasan jalan yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan.

## 2. Metode

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah plastik *HDPE* terhadap karakteristik campuran aspal beton tipe *AC-BC* dengan menggunakan metode *Marshall*. Bahan utama yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 dan agregat dari stone crusher PT. Alhas Jaya Group. Limbah plastik *HDPE* yang digunakan diperoleh dari limbah rumah tangga, seperti botol deterjen dan shampo, yang telah melalui proses pembersihan, pencacahan, dan peleburan sebelum dicampurkan ke dalam aspal. Pemanfaatan material limbah plastik dalam konstruksi perkerasan menjadi alternatif yang baik dalam meningkatkan kualitas perkerasan jalan [2].

### 2.1 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dilakukan secara observasi langsung di laboratorium. Data primer dikumpulkan melalui serangkaian uji eksperimental terhadap campuran aspal beton yang telah dimodifikasi dengan limbah plastik *HDPE*. Teknik yang digunakan mencakup pencampuran manual di laboratorium, pemadatan menggunakan mesin tumbuk *Marshall*, serta pengujian karakteristik mekanis campuran menggunakan *Marshall Stability Testing Machine*.

Peralatan yang digunakan antara lain oven, timbangan digital, alat pemanas dan pengaduk, cetakan silinder *Marshall*, mesin tumbuk *Marshall*, *Marshall Stability Testing Machine*, *Water bath* bersuhu 60°C.

### 2.2 Material dan Peralatan

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi; agregat dari *stone crusher* PT. Alhas Jaya Group, terdiri dari agregat kasar (split dan screen), agregat halus (*dust stone* dan *natural sand*), *filler*, aspal penetrasi 60/70, dan limbah plastik *HDPE* yang diperoleh dari botol deterjen, botol sampo, dan kemasan sabun mandi cair. Limbah plastik ini dibersihkan, dicacah menjadi ukuran 2-3 cm, dan dilelehkan sebelum dicampurkan ke dalam aspal [15]. Peralatan yang digunakan antara lain oven, timbangan

digital, alat pemanas, cetakan silinder *Marshall*, mesin tumbuk *Marshall*, dan *Marshall stability testing machine*. Semua pengujian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe.

### 2.3 Rancangan Campuran dan Prosedur Pengujian

Campuran aspal beton dirancang berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 ditampilkan pada Tabel 1. Kadar aspal yang digunakan untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) adalah 4,2%, 4,7%, 5,2%, 5,7%, dan 6,7%. Setelah diperoleh KAO sebesar 5,7%, dilakukan pembuatan benda uji *Marshall* dengan penambahan limbah plastik *HDPE* sebesar 0%, 4%, 6%, dan 8% dari berat aspal.

Tabel 1. Rancangan benda uji

No	Kadar aspal (KAO)	Persentase limbah plastik <i>HDPE</i>	Jumlah benda uji
1	KAO	0 %	3
2	KAO	4%	3
3	KAO	6%	3
4	KAO	8%	3
Jumlah Total			12

Setiap benda uji dibuat dari campuran agregat, aspal, dan *HDPE* yang telah dipanaskan secara terpisah pada suhu  $\pm 150^{\circ}\text{C}$ . Proses pencampuran dilakukan secara manual menggunakan alat pengaduk logam dalam wadah tahan panas. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan silinder *Marshall* dan dipadatkan menggunakan mesin tumbuk dengan  $2 \times 75$  tumbukan per sisi. Benda uji yang telah terbentuk didiamkan selama 24 jam sebelum dilakukan perendaman dalam *water bath* bersuhu  $60^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit.

### 2.4 Prosedur Pengujian

Pengujian campuran aspal AC-BC dilakukan untuk menentukan kadar aspal optimum dan karakteristik fisik campuran dengan metode pengujian *Marshall* mengacu pada SNI 06-2489-1991. Pengujian lainnya meliputi pengujian penetrasi aspal (SNI 06-2456-1991), analisis butiran agregat (SNI ASTM C136-2012), pengujian berat jenis agregat (SNI 1969-2016), pengujian berat jenis nyata campuran beraspal padat (SNI 03-6757-2002), dan pengujian viskositas aspal (SNI 03-6721-2002).

### 2.5 Parameter Uji

Pengujian *Marshall* dilakukan untuk memperoleh parameter-parameter yang menjadi indikator utama dalam evaluasi kualitas campuran aspal beton yaitu stabilitas (kg), yang menunjukkan kemampuan campuran aspal untuk menahan beban maksimum sebelum terjadi deformasi, kelelahan atau *flow* (mm), yang mengukur deformasi campuran aspal saat menerima beban, yang mencerminkan fleksibilitas dan plastisitas material, *Marshall Quotient* (*MQ*, kg/mm), Rasio antara stabilitas dan *flow* yang menggambarkan kekakuan campuran aspal, berat jenis campuran ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), yang menilai kepadatan campuran yang berpengaruh pada kekuatan dan daya tahan, *Void in Mix* (*VIM*, %), persentase rongga udara dalam campuran yang mempengaruhi ketahanan terhadap deformasi dan penetrasi air, *Void in Mineral Aggregate* (*VMA*, %), volume rongga antara butiran agregat yang harus diisi oleh aspal untuk memastikan kohesi campuran, *Void Filled with Bitument* (*VFB*, %), persentase rongga agregat yang terisi oleh aspal, penting untuk keawetan dan ketahanan campuran.

Semua data dari hasil pengujian tersebut dianalisis untuk menentukan variasi kadar limbah *HDPE* yang memberikan hasil terbaik sesuai kriteria Bina Marga 2018 [14].

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian *Marshall* pada campuran aspal beton AC-BC dilakukan dengan menggunakan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,7%, yang diperoleh dari analisis awal dengan variasi kadar aspal 4,2% hingga 6,7%. Variasi penambahan limbah plastik *HDPE* yang diuji meliputi 0%, 4%, 6%, dan 8%. Tabel 2 menyajikan hasil pengujian parameter *Marshall* pada campuran aspal dengan variasi kadar *HDPE* tersebut, serta perbandingannya dengan syarat standar *Marshall*. Parameter yang diuji meliputi densitas (*density*), rongga dalam campuran (*VIM*), rongga mineral agregat (*VMA*), rongga terisi aspal (*VFB*), stabilitas, modulus kualitas (*MQ*), dan *flow*. Data ini digunakan untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah plastik terhadap kualitas dan performa campuran aspal sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 [14].

Tabel 2. Pengujian *Marshall* pada kadar aspal optimum (*KAO*)

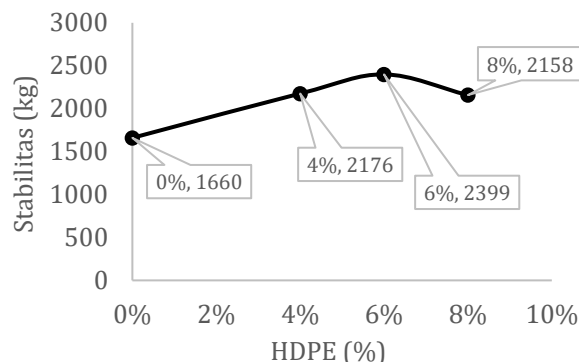
Parameter <i>Marshall</i>	Parameter Limbah Plastik <i>HDPE</i> (%)				Syarat <i>Marshall</i>
	0%	4%	6%	8%	
<i>Density</i>	2,38	2,40	2,41	2,41	>2 gr/cm <sup>3</sup>
<i>VIM</i>	4,1	3,3	3,0	2,9	3-5%
<i>VMA</i>	14,8	14,3	13,9	13,8	≥ 14%
<i>VFB</i>	81,08	82,4	83,13	83,27	≥ 65%
Stabilitas	1660	2176	2399	2158	>800 kg
<i>MQ</i>	520,69	573,53	446,94	396,73	≥ 200 Kg/mm
<i>Flow</i>	3,2	3,8	5,4	5,7	2-4 mm

### 3.1 Stabilitas *Marshall*

Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa penambahan limbah *HDPE* meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* dibandingkan campuran tanpa *HDPE*. Nilai tertinggi dicapai pada kadar 4% *HDPE*, yaitu sebesar 2176 kg. Hal ini menunjukkan bahwa plastik *HDPE* memiliki daya ikat tinggi terhadap agregat, sehingga meningkatkan kekuatan campuran dalam menahan beban. Namun, pada penambahan 6% dan 8%, nilai stabilitas mengalami sedikit penurunan, yang diduga karena plastisitas campuran yang meningkat menyebabkan distribusi beban tidak optimal. Penurunan ini masih berada dalam batas spesifikasi Bina Marga 2018, tetapi menunjukkan adanya batas maksimal pemanfaatan limbah *HDPE*.

Hasil ini lebih tinggi dibandingkan penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya, di mana penambahan *HDPE* di atas 3% menyebabkan penurunan stabilitas yang signifikan dan beberapa parameter *Marshall* tidak memenuhi spesifikasi [16]. Selain itu, dilaporkan bahwa stabilitas optimal tercapai pada penambahan *HDPE* 2-3%, dan penambahan lebih lanjut justru menurunkan nilai stabilitas hingga di bawah batas minimum standar [17]. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa campuran aspal *AC-BC* dengan penambahan *HDPE* hingga 6% masih mampu memenuhi spesifikasi teknis Bina Marga 2018 dan memiliki rentang variasi yang lebih luas dibandingkan penelitian sebelumnya, sehingga menawarkan potensi pemanfaatan limbah plastik yang lebih optimal dalam campuran aspal.

Lebih lanjut berdasarkan Gambar dari hasil penelitian seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Stabilitas vs kadar plastik *HDPE*

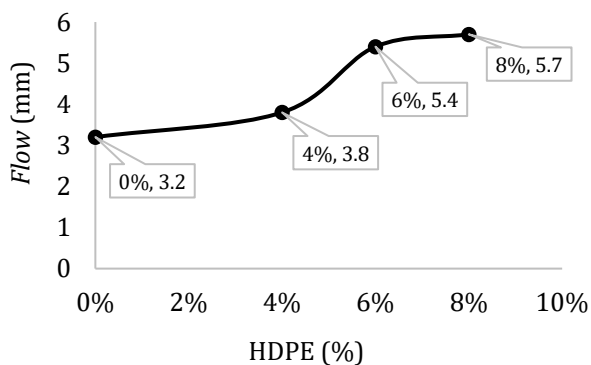
Dari Gambar 1 terlihat bahwa peningkatan stabilitas pada penambahan *HDPE* dengan komposisi awal hingga menengah (0% hingga 6%) dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme, yaitu pertama, peningkatan kekakuan matriks aspal, di mana polimer *HDPE* yang dicampur dengan aspal dapat meningkatkan viskositas dan kekakuan matriks aspal, menghasilkan pengikat yang lebih kuat dan mampu menahan deformasi akibat beban; kedua, interaksi agregat-matriks, di mana *HDPE* diasumsikan membentuk jaringan polimer dalam aspal atau mengisi rongga mikro, meningkatkan interaksi antara aspal dan agregat, yang memberikan kekuatan kohesif dan friksional yang lebih baik pada campuran; ketiga, pengurangan *VIM*, di mana penambahan *HDPE* cenderung mengurangi rongga udara dalam campuran, yang berkorelasi positif dengan peningkatan kepadatan dan stabilitas hingga batas tertentu.

### 3.2 Kelelahan (*Flow*)

Parameter *flow* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *HDPE* (Tabel 2). Kadar *flow* tertinggi terjadi pada 8% *HDPE*, yaitu 4,2 mm, sedangkan *flow* pada 4% *HDPE* masih dalam rentang ideal yaitu 3,8 mm. Nilai *flow* yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan campuran menjadi terlalu plastis, berisiko menyebabkan deformasi permanen pada permukaan jalan. Hal ini sejalan penelitian sebelumnya, yang menemukan bahwa penambahan variasi campuran plastik *HDPE* pada campuran aspal penetrasi 60/70 untuk lapis aus *AC-WC* dapat mempengaruhi karakteristik campuran, di mana nilai *flow* yang tidak terkontrol dapat

mengurangi ketahanan terhadap deformasi plastis. Dengan demikian, penambahan *HDPE* lebih dari 6% tidak disarankan karena berpotensi menurunkan ketahanan deformasi campuran aspal [18].

Selanjutnya dari Gambar 2 hubungan antara *flow* dan kadar plastik *HDPE* berikut dapat dijelaskan bahwa:



Gambar 2. Korelasi *flow* vs kadar plastik *HDPE*

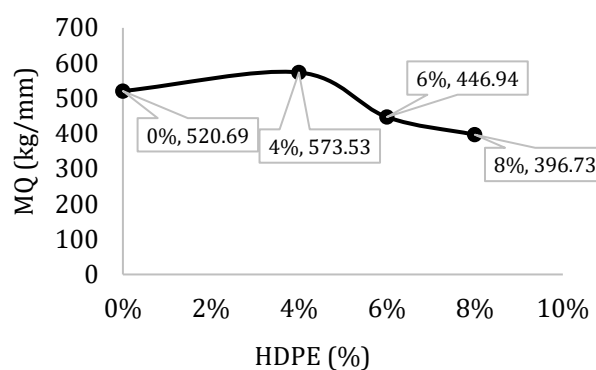
Peningkatan nilai *flow* ini dapat diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa penambahan limbah plastik *HDPE* cenderung meningkatkan plastisitas atau kemampuan deformasi campuran aspal. Meskipun *HDPE* dikenal dapat meningkatkan kekakuan aspal pada suhu tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh peningkatan stabilitas pada pembahasan sebelumnya, peningkatan *flow* ini dapat dijelaskan melalui beberapa aspek: pertama, modifikasi rheologi aspal, di mana *HDPE*, sebagai polimer termoplastik, mengubah sifat viskoelastis aspal, sehingga pada suhu pengujian *Marshall* (60°C), aspal yang dimodifikasi *HDPE* menjadi lebih plastis dan mampu berdeformasi lebih besar di bawah beban sebelum pecah, dibandingkan dengan aspal murni; kedua, perubahan struktur mikro, di mana partikel *HDPE* yang terdispersi dalam aspal menciptakan jaringan yang memungkinkan deformasi lebih besar sebelum ikatan matriks hancur; ketiga, kecenderungan untuk lebih lunak pada titik tertentu, di mana pada komposisi yang lebih tinggi, efek plastisitas berlebih dari polimer mungkin mendominasi efek pengerasan, terutama pada suhu yang relevan dengan pengujian *flow*.

### 3.3 Marshall Quotient (MQ)

*Marshall Quotient* merupakan indikator kekakuan campuran dan diperoleh dari rasio antara stabilitas dan *flow*. Nilai *MQ* tertinggi juga

terjadi pada penambahan *HDPE* 4%, yaitu 573,53 kg/mm, menunjukkan kombinasi terbaik antara kekuatan dan deformabilitas (Tabel 2). *MQ* menurun pada kadar *HDPE* 6% dan 8%, menunjukkan bahwa peningkatan *flow* tidak diimbangi oleh peningkatan stabilitas.

Dalam kaitan tersebut secara rinci Korelasi *MQ* vs kadar plastik *HDPE* diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Korelasi *MQ* vs kadar plastik *HDPE*

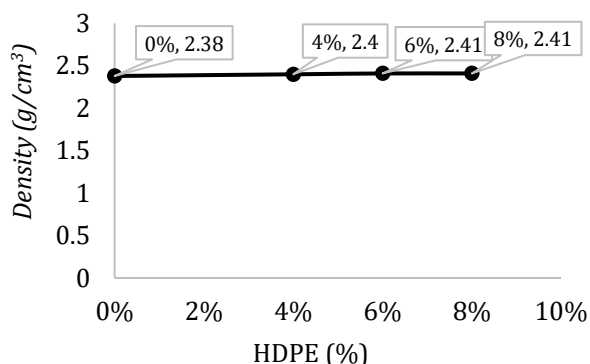
Gambar 3 menunjukkan gambaran holistik mengenai kinerja campuran aspal modifikasi *HDPE*, karena menggabungkan dua parameter *Marshall* kunci, yaitu stabilitas dan *flow*. Nilai *MQ* tertinggi pada 4% *HDPE* (572,53 kg/mm) menunjukkan bahwa pada kadar ini, campuran mencapai kekakuan dan ketahanan deformasi yang paling optimal dari rentang pengujian, di mana campuran mampu menahan beban tinggi dengan deformasi yang relatif terkontrol. Penurunan *MQ* pada 6% dan 8% *HDPE*, meskipun masih di atas batas minimum, menjadi indikasi penting yang menguatkan kekhawatiran yang muncul dari analisis grafik *flow* sebelumnya, di mana meskipun stabilitas puncak tercapai pada 6% *HDPE*, *flow* yang terlalu tinggi menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak relatif terhadap kekuatannya. Campuran dengan *MQ* yang menurun setelah puncak menunjukkan risiko lebih tinggi terhadap *rutting* (alur) di lapangan, meskipun kekuatan awalnya tinggi, karena campuran semacam itu dapat mengalir secara perlahan di bawah beban berulang.

### 3.4 Kepadatan (Density)

Nilai densitas menunjukkan tren peningkatan hingga 4% *HDPE*, yaitu sebesar 2,40 gr/cm<sup>3</sup> (Tabel 2). Nilai ini mencerminkan pemadatan yang efektif serta integritas internal campuran. Namun, setelah 6% *HDPE*, densitas

cenderung stagnan bahkan sedikit menurun, mengindikasikan bahwa kelebihan plastik mulai mengganggu distribusi antar agregat dan aspal.

Grafik yang menunjukkan keterkaitan antara density dan kadar plastik *HDPE* tersebut ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Korelasi kepadatan vs kadar plastik *HDPE*

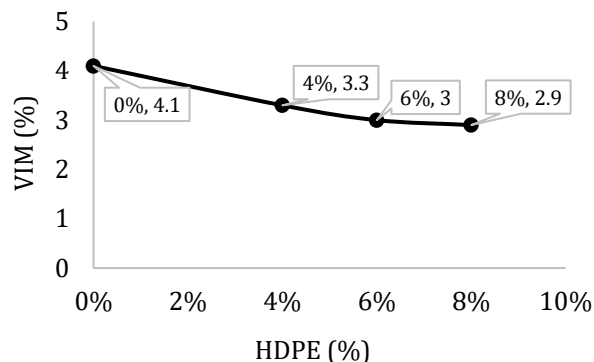
Dari Gambar 4 dapat diamati bahwa nilai kepadatan menunjukkan stabilitas yang sangat baik dan relatif tidak terpengaruh secara signifikan oleh variasi persentase penambahan limbah plastik *HDPE*. Pada 0% *HDPE* (campuran kontrol), kepadatan tercatat 2,38 gr/cm<sup>3</sup>. Seiring dengan penambahan *HDPE*, nilai kepadatan menunjukkan sedikit fluktuasi namun tetap berada pada kisaran yang sangat sempit: 2,40 gr/cm<sup>3</sup> pada 4% *HDPE*, 2,41 gr/cm<sup>3</sup> pada 6% *HDPE*, dan kembali 2,41 gr/cm<sup>3</sup> pada 8% *HDPE*.

Temuan bahwa kepadatan relatif stabil di seluruh variasi penambahan *HDPE* sangat penting karena menunjukkan bahwa penambahan *HDPE* tidak menghambat proses pemadatan campuran, di mana campuran dengan *HDPE* masih dapat dipadatkan hingga tingkat yang serupa dengan campuran kontrol. Stabilitas kepadatan ini juga menjelaskan mengapa parameter volumetrik lain, seperti *VIM*, *VMA*, dan *VFB*, mengalami perubahan tren yang jelas, karena jika kepadatan (yang merepresentasikan volume total padat) relatif konstan, maka perubahan dalam *VIM*, *VMA*, dan *VFB* lebih banyak disebabkan oleh redistribusi volume antara agregat, aspal, dan rongga udara akibat modifikasi oleh *HDPE*, bukan karena perubahan dramatis dalam tingkat pemadatan total. Sebagai contoh, penurunan *VIM* (Gambar 5) pada kepadatan yang relatif sama menyiratkan bahwa volume aspal efektif (termasuk *HDPE* yang berinteraksi dengannya)

yang mengisi rongga cenderung meningkat secara proporsional.

### 3.5 Void in Mix (*VIM*), *VMA*, dan *VFB*

Guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh penambahan limbah plastik *HDPE* terhadap kinerja campuran aspal beton AC-BC, hasil pengujian parameter *Marshall* disajikan dalam bentuk grafik. Grafik berikut berturut-turut menampilkan tren perubahan nilai *VIM*, *VMA*, dan *VFB* pada berbagai variasi kadar limbah *HDPE* yang digunakan. Visualisasi data ini diharapkan dapat memudahkan dalam memahami pola hubungan antara kadar *HDPE* dengan karakteristik utama campuran aspal, serta membantu dalam mengidentifikasi kadar optimum yang memenuhi kriteria teknis sesuai spesifikasi Bina Marga 2018.



Gambar 5. Korelasi *VIM* vs kadar plastik *HDPE*

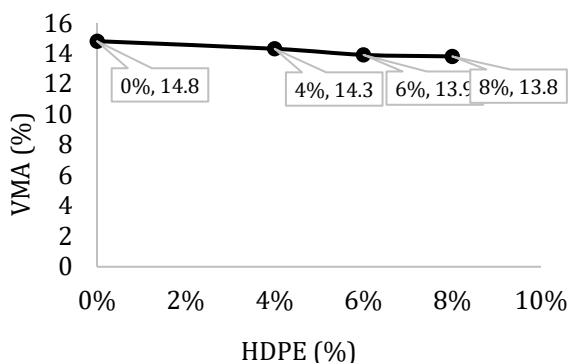
Gambar 5 merupakan hubungan *VIM* terhadap variasi penambahan limbah plastik *HDPE*. Grafik tersebut menunjukkan tren penurunan *VIM*, di mana *VIM* cenderung menurun seiring dengan peningkatan persentase limbah plastik *HDPE*. Pada penambahan 0% *HDPE* (campuran kontrol), *VIM* adalah 4,1%. Ketika penambahan *HDPE* meningkat menjadi 4%, *VIM* turun menjadi 3,3%. Selanjutnya, pada 6% dan 8% penambahan *HDPE*, nilai *VIM* relatif stabil di angka 3,0% dan 2,9% masing-masing.

Penurunan *VIM* ini dapat diinterpretasikan bahwa limbah plastik *HDPE*, ketika dicampur dengan aspal, berperan sebagai pengisi tambahan atau modifikator yang berkontribusi pada pengurangan volume rongga dalam campuran. Polimer *HDPE*, yang memiliki viskositas tinggi saat meleleh dan bercampur dengan aspal, mungkin membantu menciptakan matriks aspal-polimer yang lebih padat,

sehingga mengisi celah antar agregat secara lebih efektif dibandingkan aspal murni pada kadar aspal optimum. Hal ini menunjukkan potensi *HDPE* dalam meningkatkan kepadatan campuran dan mengurangi porositas.

Selanjutnya penambahan *HDPE* pada Kadar Aspal Optimum (KAO) cenderung menurunkan *VIM* lebih lanjut. Penurunan *VIM* hingga mendekati atau di bawah batas minimum spesifikasi (pada 6% dan 8% *HDPE*) adalah temuan penting. Ini menunjukkan bahwa meskipun *HDPE* berpotensi meningkatkan kepadatan, komposisi yang terlalu tinggi harus dipertimbangkan dengan hati-hati. *VIM* yang terlalu rendah dapat berdampak negatif pada kinerja jangka panjang perkerasan, seperti peningkatan risiko *bleeding* aspal, kehilangan kekasaran permukaan, dan penurunan ketahanan retak lelah karena campuran menjadi terlalu kaku.

Tren perubahan nilai *VMA* disajikan pada Gambar 6.



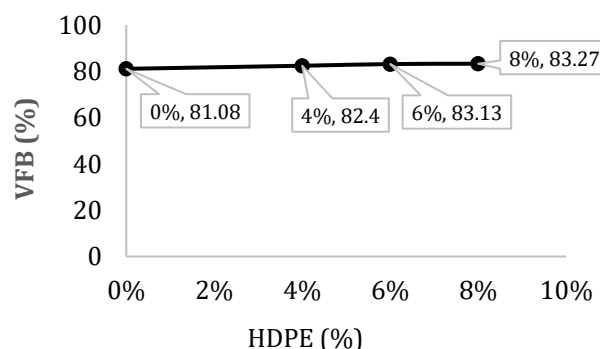
Gambar 6. Korelasi *VMA* vs Kadar Plastik *HDPE*

Gambar 6 menyajikan hasil pengujian *VMA* terhadap variasi persentase penambahan limbah plastik *HDPE* pada campuran aspal beton AC-BC. *VMA* merupakan parameter yang mengukur volume rongga antar partikel agregat dalam campuran padat, tidak termasuk volume aspal efektif. Nilai *VMA* yang memadai penting untuk memastikan ketersediaan ruang bagi aspal efektif serta sejumlah kecil rongga udara yang diperlukan untuk ketahanan terhadap deformasi dan daya tahan perkerasan. Dari grafik tersebut dapat diamati adanya tren penurunan nilai *VMA* seiring dengan peningkatan persentase limbah plastik *HDPE*. Pada penambahan 0% *HDPE* (campuran kontrol), nilai *VMA* tercatat 14,8%. Seiring

dengan penambahan *HDPE*, *VMA* menunjukkan penurunan: menjadi 14,3% pada 4% *HDPE*, 13,9% pada 6% *HDPE*, dan akhirnya mencapai 13,8% pada 8% *HDPE*.

Penurunan nilai *VMA* menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik jenis *HDPE*, yang diasumsikan bercampur homogen dengan aspal atau mengisi sebagian rongga antar agregat, secara efektif mampu menurunkan volume ruang kosong dalam campuran. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama: pertama, partikel *HDPE* yang meleleh dan menyatu dengan aspal kemungkinan berperan sebagai pengisi yang lebih efektif dibandingkan aspal murni dalam mengisi celah di antara agregat, sehingga menurunkan porositas campuran; kedua, keberadaan polimer *HDPE* berpotensi mengubah karakteristik reologi atau kekakuan matriks aspal, yang berdampak pada cara agregat tersusun dan terpadatkan selama proses pemadatan, sehingga turut berkontribusi terhadap penurunan volume *VMA*.

Untuk uji *VFB* dengan variasi *HDPE* diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Korelasi *VFB* vs kadar plastik *HDPE*

Dari Gambar 7, dapat diamati adanya tren peningkatan nilai *VFB* seiring dengan peningkatan persentase limbah plastik *HDPE*. Pada penambahan 0% *HDPE* (campuran kontrol), nilai *VFB* tercatat 81,04%. Seiring dengan penambahan *HDPE*, *VFB* menunjukkan peningkatan yang konsisten: menjadi 82,40% pada 4% *HDPE*, 83,13% pada 6% *HDPE*, dan akhirnya mencapai 83,27% pada 8% *HDPE*.

Peningkatan *VFB* ini dapat diinterpretasikan bahwa penambahan limbah plastik *HDPE* berkontribusi pada pengisian rongga agregat secara lebih efektif oleh aspal (atau matriks aspal-polimer). Mekanisme ini selaras dengan temuan sebelumnya pada grafik *VIM* dan *VMA*, yang menunjukkan pengurangan

rongga, di mana penambahan *HDPE* membantu mengurangi volume total rongga dalam campuran dan rongga antar agregat. Jika volume aspal efektif relatif konstan atau sedikit meningkat dalam proporsi pengisian rongga, maka persentase rongga yang terisi aspal (*VFB*) akan meningkat. Selain itu, modifikasi aspal dengan *HDPE* mungkin menghasilkan matriks yang lebih viskos atau lebih mampu "membasahi" agregat, sehingga aspal dapat mengisi rongga-rongga kecil dengan lebih efisien.

Menurut spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 untuk campuran AC-BC, nilai *VFB* memiliki rentang yang disarankan, umumnya antara 65% hingga 75% atau 65% hingga 80% tergantung spesifikasi detailnya, pada tabel 1 yang mengindikasikan batas minimum *VFB* sebesar 65%. Berdasarkan perbandingan dengan spesifikasi tersebut, seluruh variasi penambahan *HDPE*, termasuk campuran kontrol (0% *HDPE*), menunjukkan nilai *VFB* yang jauh di atas batas minimum 65%, dengan nilai *VFB* berkisar antara 81,04% hingga 83,27%.

Meskipun peningkatan *VFB* secara umum diinginkan untuk melindungi agregat dari air dan oksidasi, nilai yang terlalu tinggi dapat menjadi indikator masalah lain. Keterkaitan antara peningkatan *VFB* (Gambar 7), penurunan *VIM* (Gambar 5), dan penurunan *VMA* (Gambar 6) dengan penambahan *HDPE* sangat konsisten. Penambahan *HDPE* cenderung membuat campuran lebih padat dan lebih banyak rongga yang terisi oleh pengikat.

Hasil pengujian *Marshall* yang disajikan tersebut memperlihatkan dampak signifikan penambahan limbah plastik *HDPE* terhadap karakteristik volumetrik dan mekanik campuran aspal beton AC-BC. Secara umum, penambahan *HDPE* cenderung meningkatkan kepadatan campuran (*VIM* menurun), mengisi lebih banyak rongga agregat (*VFB* meningkat), dan pada komposisi awal, meningkatkan kekakuan dan kekuatan (stabilitas dan *MQ* meningkat). Puncak stabilitas tertinggi tercapai pada penambahan 6% *HDPE* (2399 kg), yang merepresentasikan peningkatan kekuatan yang substansial dibandingkan campuran kontrol (1650 kg). Peningkatan ini menunjukkan potensi *HDPE* sebagai modifikator untuk meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi akibat beban lalu lintas, sejalan dengan tujuan pemanfaatan limbah plastik dalam konstruksi jalan. Kepadatan campuran juga terbukti stabil

di seluruh variasi kadar *HDPE*, mengindikasikan bahwa penambahan polimer ini tidak menghambat proses pemadatan dan dapat diintegrasikan dengan baik ke dalam struktur campuran.

Namun, analisis lintas parameter *Marshall* menunjukkan adanya titik optimal yang perlu diidentifikasi secara cermat untuk memastikan kinerja campuran yang seimbang. Meskipun peningkatan stabilitas positif, komposisi *HDPE* yang lebih tinggi (6% dan 8%) juga menyebabkan peningkatan *flow* yang signifikan, melampaui batas atas spesifikasi (5,4 mm dan 5,7 mm dibandingkan maksimum 4,0 mm).

Kombinasi stabilitas tinggi dengan *flow* yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan campuran yang rentan terhadap deformasi plastis berlebih di lapangan (*rutting*), meskipun memiliki kekuatan awal yang besar. Selain itu, pada kadar *HDPE* 6% dan 8%, nilai *VIM* cenderung mendekati atau sedikit di bawah batas minimum spesifikasi 3%, dan *VMA* juga turun di bawah batas minimum 14,0%. Kondisi *VIM* dan *VMA* yang terlalu rendah berpotensi mengurangi durabilitas jangka panjang campuran, karena mengindikasikan kurangnya ruang untuk aspal efektif dan udara yang esensial untuk fleksibilitas dan ketahanan terhadap penuaan. Berdasarkan evaluasi keseluruhan parameter, penambahan limbah plastik *HDPE* sebesar 4% tampak sebagai komposisi yang paling menjanjikan, karena memberikan peningkatan stabilitas yang substansial (2176 kg) dan nilai *Marshall* Quotient tertinggi (572,53 kg/mm), sambil tetap menjaga parameter *flow* (3,8 mm), *VIM* (3,3%), dan *VMA* (14,3%) dalam rentang spesifikasi yang dapat diterima, sehingga menghasilkan campuran yang kokoh dan sekaligus fleksibel.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis terhadap karakteristik *Marshall* campuran aspal beton AC-BC yang dimodifikasi dengan penambahan limbah plastik *HDPE*, dapat disimpulkan:

Penambahan limbah plastik *HDPE* secara signifikan meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* campuran aspal beton AC-BC. Peningkatan puncak sebesar 45% (dari 1650 kg menjadi 2399 kg pada 6% *HDPE*) menunjukkan bahwa *HDPE* memiliki potensi besar sebagai modifikator untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan campuran aspal terhadap beban lalu lintas.

Penggunaan *HDPE* memengaruhi parameter volumetrik campuran. Terdapat tren penurunan *VIM* dan *VMA* serta peningkatan *VFB* seiring dengan bertambahnya kadar *HDPE*. Ini mengindikasikan bahwa *HDPE* berperan sebagai pengisi rongga dan meningkatkan kepadatan campuran. Namun, pada kadar *HDPE* yang lebih tinggi (6% dan 8%), *VIM* dan *VMA* cenderung berada di bawah batas minimum spesifikasi Bina Marga 2018, yang berpotensi mengurangi durabilitas jangka panjang.

Meskipun stabilitas meningkat, penambahan *HDPE* juga menyebabkan peningkatan nilai *flow* secara drastis pada kadar 6% dan 8%, melampaui batas spesifikasi yang diizinkan (2-4 mm). Peningkatan *flow* yang tidak terkontrol ini, meskipun diimbangi oleh stabilitas tinggi, mengakibatkan penurunan nilai *Marshall Quotient (MQ)* setelah mencapai puncak pada 4% *HDPE*. Ini menunjukkan adanya risiko deformasi plastis berlebih (*rutting*) pada kadar *HDPE* yang terlalu tinggi.

Seluruh parameter *Marshall* (stabilitas, *flow*, *MQ*, *VIM*, *VMA*, dan *VFB*) serta pertimbangan terhadap spesifikasi Bina Marga 2018, penambahan 4% limbah plastik *HDPE* terhadap berat aspal terbukti memberikan karakteristik campuran yang paling optimal dan seimbang. Pada kadar ini, campuran menunjukkan peningkatan stabilitas yang signifikan dan *MQ* tertinggi, sementara *flow*, *VIM*, dan *VMA* masih berada dalam rentang spesifikasi yang direkomendasikan.

### Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi terhadap penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus kepada Politeknik Negeri Lhokseumawe dan Jurusan Teknik Sipil yang telah menyediakan fasilitas yang diperlukan untuk penelitian ini.

### Daftar Pustaka

- [1] Ndun, K. D. P. N., Koreh, A. W., & Lamdu, A. K. A., 2024. Pengaruh penambahan cacahan limbah plastik *HDPE* (*high density polyethylene*) sebagai bahan tambah campuran laston *AC-WC* (*asphalt concrete-wearing course*) terhadap karakteristik *marshall*. *AL-MIKRAJ Jurnal Studi Islam dan Humaniora* (E-ISSN 2745-4584), Vol. 5, No. 01, pp. 367-378.
- [2] Latif, A.& Setiawan, A., 2023. Pengaruh penambahan plastik *high density polyethylene (HDPE)* dan *low density polyethylene (LDPE)* terhadap karakteristik campuran aspal *ac-wc* menggunakan metode kering. *Sainteks*, Vol. 20, No. 2, pp. 153-165.
- [3] Pinem, H. K. W. B., Pristyawati, T., & Safarizki, H. A., 2022. Analysis of the influence of additional plastic waste (*hdpe*) as mixed asphalt *AC-WC* on *marshall* parameters. *ASTONJADRO*, Vol. 11, No. 3, pp. 669-679.
- [4] Kariyana, I. M. et al., 2025. Evaluasi kinerja ruas jalan di kecamatan kuta utara. *Jurnal Teknik Gradien*, Vol. 17, No. 01, pp. 138-150.
- [5] Yendri, O.& Septiandi, W., 2023. Kajian kemampuan campuran aspal-beton (*AC-BC*) dengan asbuton cair yang diisi dengan serpihan *HDPE* (*high density polyethylene*). *Jurnal Teknik Gradien*, Vol. 15, No. 01, pp. 9-19.
- [6] Elnaml, I., Liu, J., Mohammad, L. N., Wasiuddin, N., Cooper III, S. B., & Cooper Jr, S. B., 2023. Developing sustainable asphalt mixtures using high-density polyethylene plastic waste material. *Sustainability*, Vol. 15, No. 13, p. 9897.
- [7] Nurfadila, T., Mustakim, M., & Fadly, I., 2024. Perbandingan kinerja *marshall* pada campuran aspal *ac-wc* menggunakan plastik *polypropilene (PP)* dan plastik *high density polyethylene (HDPE)*. *Sultra Civil Engineering Journal (SCiEJ)*, Vol. 5, No. 2, pp. 363-373.
- [8] Marlina, M., Wijayanti, D., Yudiastari, I. P., & Safitri, L., 2018. Pembuatan virgin coconut oil dari kelapa hibrida menggunakan metode penggaraman dengan *NaCl* dan garam dapur. *Jurnal Chemurgy*, Vol. 1, No. 2, pp. 7-12.
- [9] Pratama, R., 2024. Studi penggunaan bahan alternatif untuk pengurangan dampak lingkungan pada proyek konstruksi jalan tol. *WriteBox*, Vol. 1, No. 2.
- [10] Kurniasari, F. D., Pramanda, H., & Muarif, M. A., 2025. Pemanfaatan limbah plastik *low density polyethylene (LDPE)* sebagai substitusi terhadap campuran aspal *pen 60/70*. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 15, No. 1, pp. 49-60.
- [11] Shaffie, E., Ahmad, J., Arshad, A., & Kamarun, D., 2015. *Empirical and*

*rheological properties evaluation of modified asphalt binder containing nanopolyacrylate polymer modifier.* Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), Vol. 76, No. 9.

- [12] Suaryana, N., Susanto, I., Ronny, Y., & Sembayang, I. R., 2018. *Evaluasi kinerja campuran beraspal dengan bitumen hasil ekstraksi penuh dari asbuton.* Media Komunikasi Teknik Sipil, Vol. 24, No. 1, pp. 62-70.
- [16] Sumiati, S., Mahmuda, M. & Syapawi, A., 2019. *Perkerasan aspal beton (AC-BC) limbah plastik HDPE yang tahan terhadap cuaca ekstrem.* Construction and Material Journal, Vol. 1, No. 1, pp.1-11.
- [17] Eriyono, R.W. & Puspito, I.H., 2017. *Pengaruh penambahan plastik high density poly ethylene pada lapisan perkerasan aspal beton AC-BC.* Jurnal Infrastruktur, Vol. 3, No. 2, pp.115-126.
- [18] Nofriandi, I., Alamsyah, W. and Lydia, E.N., 2023. *Studi penambahan variasi campuran plastik jenis HDPE pada campuran aspal penetrasi 60/70 untuk lapis aus AC-WC.* Jurnal Teknik Sipil, Vol. 2, No. 2, pp.116-123.