

## PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK MULTILAYER SEBAGAI PENGGANTI ASPAL SEBAGIAN PADA CAMPURAN LASTON AC-BC DENGAN METODE WET PROCESSES

Safrie Rahman<sup>1\*</sup>, Anwar Efendy<sup>2</sup>, Nurul Hidayati<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Mataram, Indonesia

[safrierahman@icloud.com](mailto:safrierahman@icloud.com)

### ABSTRACT

#### Keywords:

Multilayer Plastic Waste;  
AC-BC;  
Optimum Asphalt Content (OAC);  
Marshall Method;  
Wet Process.

**Abstract:** The construction of high-quality road infrastructure relies heavily on the quality of pavement materials, such as the Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) mixture. Increasing traffic volumes and loads make conventional asphalt mixtures more susceptible to distress, including cracking, rutting, and raveling. One strategy to enhance mixture performance is the partial replacement of asphalt. This study utilized multilayer plastic waste powder as a partial asphalt replacement material in the AC-BC mixture. The research was conducted at the Civil Engineering Laboratory of Universitas Muhammadiyah Mataram using an Optimum Asphalt Content (OAC) of 5.15%. The multilayer plastic waste powder was added at varying levels—3%, 4%, 5%, 6%, and 7% by weight of the asphalt. The analyzed parameters included bulk density, stability, flow, Marshall Quotient (MQ), Voids in the Mix (VIM), Voids in Mineral Aggregate (VMA), and Voids Filled with Bitumen (VFB). The results indicated that the optimum multilayer plastic content was the 6% variation. This mixture met all specification requirements, yielding a bulk density of 2.416 g/cc, stability of 1,475 kg, flow of 3.83 mm, Marshall Quotient of 385 kg/mm, VIM of 3.16%, VMA of 15.33%, and VFB of 79.40%. These values comply with the specifications: minimum stability of 800 kg, flow of 2.0–4.0 mm, minimum MQ of 250 kg/mm, VIM of 3.0–5.0%, minimum VMA of 14%, and minimum VFB of 65%.

#### Kata Kunci:

Limbah Plastik Multilayer;  
AC-BC;  
Kadar Aspal Optimum (KAO);  
Metode Marshall;  
Wet Processes.

**Abstrak:** Pembangunan infrastruktur jalan yang baik sangat dipengaruhi oleh kualitas material perkerasan, salah satunya campuran Laston Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). Peningkatan volume dan beban lalu lintas menyebabkan campuran beraspal konvensional lebih rentan mengalami kerusakan, seperti retak, alur (rutting), dan pelepasan butiran (ravelling). Salah satu upaya untuk meningkatkan kinerja campuran adalah pengganti aspal sebagian. Penelitian ini memanfaatkan serbuk limbah plastik multilayer sebagai bahan pengganti aspal sebagian pada campuran Laston AC-BC. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Mataram menggunakan Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5,15%. Variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan adalah 3%, 4%, 5%, 6%, dan 7% terhadap berat aspal. Hasil penelitian parameter yang dianalisis meliputi berat isi, stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), Voids in the Mix (VIM), Voids in Mineral Aggregate (VMA), dan Voids Filled with Bitumen (VFB). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimum plastik multilayer adalah variasi 6%. Berdasarkan campuran tersebut diperoleh bahwa parameter marshall memenuhi persyaratan spesifikasi. Diperoleh nilai berat isi 2,416 gr/cc, stabilitas 1.475 kg, flow 3,83 mm, Marshall Quotient 385 kg/mm, VIM 3,16%, VMA 15,33%, dan VFB 79,40%. Nilai tersebut memenuhi persyaratan spesifikasi, yaitu stabilitas minimum 800 kg, flow 2,0–4,0 mm, MQ minimum 250 kg/mm, VIM 3,0–5,0%, VMA minimum 14%, dan VFB minimum 65%.

#### Article History:

Received : 01-10-2026

Accepted : 30-11-2026



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

### A. INTRODUCTION

Pembangunan infrastruktur jalan memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, meningkatkan konektivitas antarwilayah, serta memperlancar mobilitas masyarakat. Kondisi jalan yang baik dapat meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengguna, memperlancar distribusi barang dan jasa, serta mengurangi biaya operasional kendaraan. Konstruksi perkerasan jalan perlu dirancang agar mampu menahan beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan

sehingga dapat mencapai umur layan sesuai dengan perencanaan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan dalam pengembangan konstruksi jalan adalah memanfaatkan limbah plastik multilayer sebagai bahan pengganti sebagian aspal. Pemanfaatan limbah tersebut diharapkan dapat mengurangi jumlah sampah plastik sekaligus menjadi alternatif material dalam campuran perkerasan jalan. Penelitian berjudul "Pemanfaatan Limbah Plastik Multilayer sebagai Pengganti Aspal Sebagian pada Campuran Laston AC-BC dengan Metode Wet Process" dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan limbah plastik multilayer terhadap karakteristik campuran AC-BC berdasarkan pengujian Marshall.

Permasalahan dalam penelitian ini difokuskan pada pengaruh penggunaan limbah plastik multilayer dengan metode wet process terhadap kinerja campuran Laston AC-BC. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, density, Void in Mixture (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ). Penelitian ini juga diarahkan untuk mengetahui perubahan nilai masing-masing parameter Marshall akibat penggunaan variasi kadar limbah plastik multilayer serta menentukan kadar optimum yang dapat menghasilkan karakteristik campuran sesuai dengan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh penggunaan limbah plastik multilayer sebagai pengganti sebagian aspal pada campuran Laston AC-BC dengan metode wet process, menganalisis perubahan setiap parameter Marshall akibat variasi kadar limbah plastik, serta menentukan kadar optimum limbah plastik multilayer yang memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

Penelitian ini dibatasi agar pembahasannya lebih terarah. Bahan yang digunakan berupa limbah plastik multilayer sebagai pengganti sebagian aspal pada campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). Penelitian dilaksanakan di laboratorium Universitas Muhammadiyah Mataram, Gedung Baru Fakultas Teknik, dengan fokus pada karakteristik campuran berdasarkan pengujian Marshall. Variasi kadar limbah plastik multilayer yang digunakan disesuaikan dengan rancangan penelitian, yaitu 3%, 4%, 5%, 6%, dan 7%. Pengujian dilakukan untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, MQ, dan density serta menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO). Penelitian mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 dan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang relevan dengan pengujian bahan dan campuran beraspal.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam pengembangan teknologi konstruksi jalan, khususnya pemanfaatan limbah plastik multilayer sebagai bahan pengganti sebagian aspal pada campuran AC-BC. Hasil penelitian dapat menambah pengetahuan mengenai penggunaan limbah plastik sebagai material alternatif dalam konstruksi perkerasan jalan serta memberikan gambaran mengenai karakteristik Marshall campuran yang menggunakan limbah plastik multilayer. Pemanfaatan material tersebut juga diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi limbah plastik dan mendukung penggunaan material perkerasan yang lebih ramah lingkungan. Hasil pengujian dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan penggunaan limbah plastik multilayer pada campuran perkerasan jalan sesuai dengan persyaratan teknis yang berlaku.

## **B. METHOD**

### **1. Lokasi Penelitian**

Pelaksanaan pengujian dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Baru Kampus Muhammadiyah Mataram Nusa Tenggara Barat yang berlokasi di Jalan Guntur Raya, Kecamatan Sekarbela, Kota Mataram. Lokasi pelaksanaan penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Lokasi Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Mataram (*Sumber: Google Earth, 2026*)

## 2. Lokasi Pengambilan Sampel

Lokasi pengambilan sampel limbah plastik multilayer dipenjual pop ice dll. Yang terletak di Jl. Swasembada (Simpang tiga Kekalek). Sedangkan lokasi pengambilan sampel agregat seperti agregat 3/4 dan 3/8 serta abu batu adalah AMP PT. Sinar Bali Binakarya yang terletak di Jalan Raya Praya-Mujur, Batunyal, Kecamatan Praya Timur, Kabupaten Lombok Tengah, Provinsi Nusa Tenggara Barat.

## 3. Alat dan Bahan Penelitian

### a. Alat

**Tabel 1.** Alat

| No | Alat                                   |
|----|----------------------------------------|
| 1  | Timbang Digital                        |
| 2  | Hot Plate                              |
| 3  | Termometer                             |
| 4  | Pengaduk Mekanis (Centong)             |
| 5  | Cetakan Benda Uji (Mold)               |
| 6  | Dongkrak Hidrolik                      |
| 7  | Mesin Uji Marshall                     |
| 8  | Bak Perendamanan ( <i>Water bath</i> ) |
| 9  | Wadah Pencampuran                      |
| 10 | Alat Penumbuk                          |

### b. Bahan Penelitian

#### 1) Aspal

Aspal penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Aspal (*Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026*)

## 2) Agregat Kasar (batu pecah)

Agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah yang diperoleh dari *stone crusher*. Agregat kasar harus bersih, keras, tahan aus, bebas dari kotoran, serta memenuhi persyaratan gradasi dan sifat fisik sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga. Pengujian agregat kasar meliputi analisis saringan, berat jenis, penyerapan air, keausan menggunakan mesin Los Angeles, serta pengujian lain yang diperlukan. Berikut gambar agregat kasar dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Agregat Kasar (Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)

## 3) Agregat Halus (abu batu)

Agregat halus berupa pasir hasil pemecahan batu atau pasir alam yang memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran beraspal. Agregat halus harus bersih, bebas dari bahan organik maupun lumpur, serta memiliki gradasi yang sesuai dengan spesifikasi campuran AC-BC. Bahan Pengisi (*filler*). Bahan pengisi (*filler*) yang digunakan berupa semen Portland atau abu batu yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm). Filler berfungsi untuk mengisi rongga di antara butiran agregat sehingga meningkatkan kepadatan, stabilitas, dan daya ikat campuran beraspal. Berikut gambar bahan pengisi dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Bahan pengisi (*Filler*) (Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)

## 4) Limbah Plastik Multilayer

Limbah plastik multilayer merupakan bahan pengganti aspal sebagian yang digunakan dalam penelitian ini. Plastik multilayer merupakan jenis kemasan yang tersusun atas beberapa lapisan material, seperti plastik, aluminium foil, atau bahan lainnya yang menyatu sehingga memiliki sifat kedap udara dan tahan terhadap kelembapan. Sebelum digunakan, limbah plastik dibersihkan dari kotoran, dikeringkan, kemudian dipotong atau dicacah menjadi ukuran yang lebih kecil agar lebih mudah tercampur dengan aspal pada proses *wet process*. Berikut gambar limbah plastik multilayer dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Limbah Plastik Multilayer (*Sumber: Dokumentasi pribadi 2026*)

#### 4. Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan faktor yang digunakan sebagai dasar dalam pelaksanaan penelitian untuk mengetahui hubungan antara perlakuan yang diberikan dengan hasil yang diperoleh. Pada penelitian ini, variabel yang digunakan terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

##### a. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang sengaja diubah atau diberikan perlakuan oleh peneliti untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik campuran beraspal. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kadar limbah plastik multilayer sebagai bahan pengganti aspal sebagian pada campuran Laston AC-BC menggunakan metode *wet process*. Variasi kadar limbah plastik ditentukan berdasarkan persentase terhadap berat aspal sesuai dengan rancangan penelitian.

##### b. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh perlakuan pada variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel terikat adalah karakteristik campuran Laston AC-BC yang diperoleh dari hasil pengujian Marshall, meliputi:

- 1) Nilai stabilitas (*Marshall Stability*).
- 2) Nilai flow.
- 3) Void in Mix (VIM).
- 4) Void in Mineral Aggregate (VMA).
- 5) Filled with Asphalt (VFA).
- 6) Marshall Quotient (MQ).

Hasil pengujian tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah plastik multilayer terhadap kinerja campuran beraspal.

#### 5. Desain Campuran (*mix design*)

Variasi kadar limbah plastik multilayer yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan persentase terhadap berat aspal pada kadar aspal optimum. Untuk mempermudah penyajian data, komposisi variasi limbah plastik multilayer disajikan dalam bentuk Tabel 2.

**Tabel 2.** Variasi Kadar Limbah Plastik Multilayer

| No. | Variasi Campuran | Kadar Plastik Multilayer (% terhadap berat aspal) |
|-----|------------------|---------------------------------------------------|
| 1   | Variasi I        | 3%                                                |
| 2   | Variasi II       | 4%                                                |
| 3   | Variasi III      | 5%                                                |
| 4   | Variasi IV       | 6%                                                |
| 5   | Variasi V        | 7%                                                |

(*Sumber: Rancangan Penelitian Sebelumnya, 2025.*)

## C. RESULTS & DISCUSSION

### 1. Rekap Pengujian Variasi Serbuk Limbah Plastik Multilayer Terhadap KAO

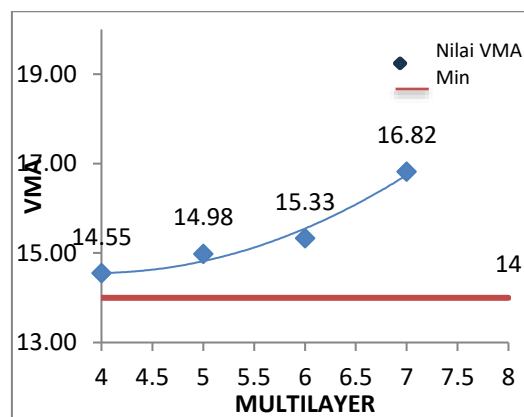
**Tabel 3.** Rekap hasil pengujian variasi serbuk limbah plastic multilayer terhadap KAO

| Plastik Multilayer         |       |       |       |       |       |           |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Binder Multilayer ( % )    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | SPEC      |
| Unit Weight                | 2.433 | 2.438 | 2.426 | 2.416 | 2.374 |           |
| Stability ( kg )           | 1503  | 1640  | 1701  | 1475  | 1701  | min 800   |
| Flow (mm )                 | 3.83  | 3.53  | 3.43  | 3.83  | 4.10  | 2.0 - 4.0 |
| Marshall Quotient (kg/mm ) | 392   | 464   | 495   | 385   | 415   | min 250   |
| Air Voids ( % )            | 2.47  | 2.27  | 2.76  | 3.16  | 4.86  | 3.0 - 5.0 |
| VMA ( % )                  | 14.73 | 14.55 | 14.98 | 15.33 | 16.82 | min14     |
| VFB ( % )                  | 83.21 | 84.43 | 81.61 | 79.40 | 71.09 | min65     |

(Sumber: Hasil Analisa, 2026)

### 2. Voids In Mineral Agregat (VMA)

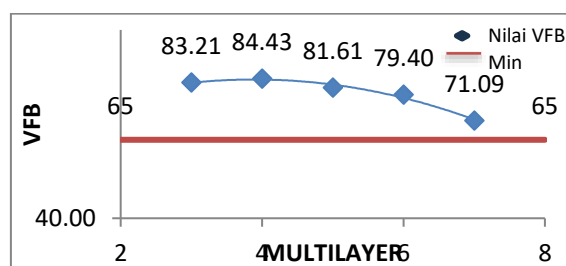
Hasil rekapitulasi pengujian nilai VMA pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Grafik penambahan plastik Multilayer terhadap VMA

### 3. Voids Filler Bitumen (VFB)

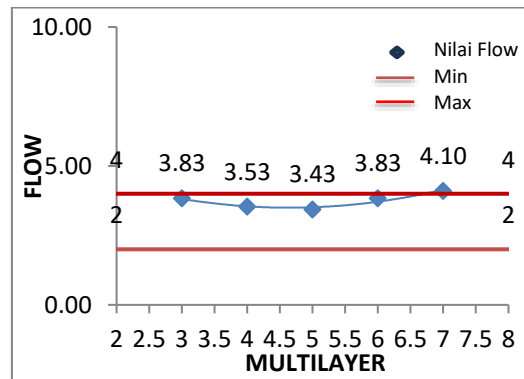
Hasil rekapitulasi pengujian nilai VFB pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Grafik penambahan palstik Multilayer terhadap VFB

#### 4. *Flow (Kelelehan)*

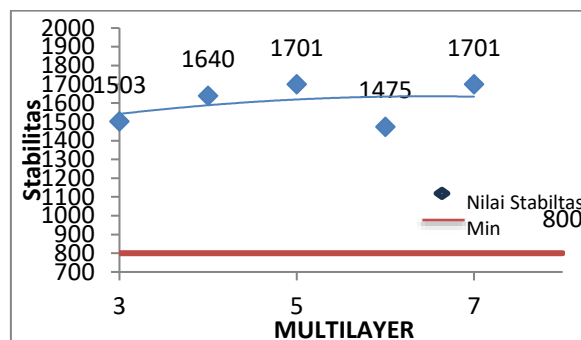
Hasil rekapitulasi pengujian nilai *Flow* pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Penambahan Plastik Multilayer Terhadap Flow

#### 5. *Stabilitas (stability)*

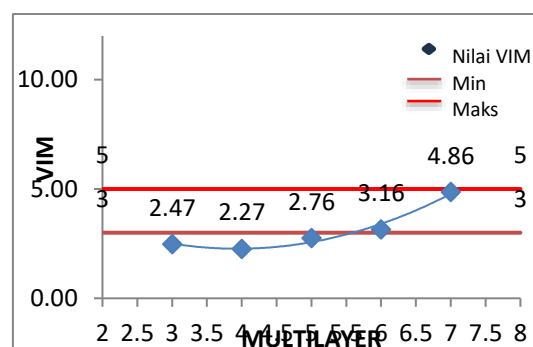
Hasil rekapitulasi pengujian nilai Stabilitas pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Penambahan Plastik Multilayer Terhadap Stabilitas

#### 6. *Voids In Mixture (VIM)*

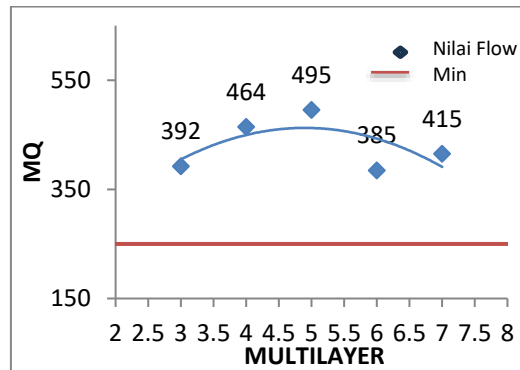
Hasil rekapitulasi pengujian nilai VIM pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Penambahan Plastik Multilayer Terhadap VIM

## 7. Marshall Quotient (MQ)

Hasil rekapitulasi pengujian nilai MQ pada campuran AC-BC dengan variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai VMA akibat variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer yang digunakan dalam campuran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Penambahan Plastik Multilayer Terhadap MQ

## D. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

### 1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pemanfaatan serbuk limbah plastik multilayer sebagai bahan pengganti aspal sebagian pada campuran Laston Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) dengan metode wet process, yang dilaksanakan pada Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5,15% dengan variasi kadar penambahan serbuk limbah plastik multilayer sebesar 3%, 4%, 5%, 6%, dan 7% terhadap berat aspal, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

- Penambahan serbuk limbah plastik multilayer pada campuran Laston AC-BC dengan metode wet process memberikan pengaruh terhadap kinerja campuran berdasarkan hasil pengujian Marshall. Secara umum, penambahan serbuk limbah plastik multilayer mampu mempertahankan bahkan meningkatkan sebagian besar karakteristik Marshall campuran, sehingga limbah plastik multilayer berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian aspal pada campuran AC-BC.
- Variasi kadar serbuk limbah plastik multilayer memberikan perubahan terhadap masing-masing parameter Marshall. Nilai stabilitas pada seluruh variasi (3%–7%) berkisar antara 1.475 kg hingga 1.701 kg dan seluruhnya memenuhi syarat minimum 800 kg. Nilai flow cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar plastik, dengan variasi 4%, 5%, dan 6% memenuhi rentang persyaratan 2,00–4,00 mm, sedangkan variasi 7% (4,10 mm) telah melampaui batas maksimum. Nilai VIM juga menunjukkan kecenderungan meningkat seiring penambahan kadar plastik, yaitu dari 2,47% pada variasi 3% menjadi 4,86% pada variasi 7%, dengan hanya variasi 6% dan 7% yang berada dalam rentang persyaratan 3,00–5,00%. Adapun nilai VMA, VFB, dan Marshall Quotient (MQ) pada seluruh variasi yang diuji secara konsisten memenuhi batas minimum spesifikasi yang disyaratkan, yaitu berturut-turut minimum 14%, minimum 65%, dan minimum 250 kg/mm.
- Berdasarkan evaluasi terhadap seluruh parameter Marshall secara bersamaan dan perbandingannya dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2, variasi penambahan serbuk limbah plastik multilayer sebesar 6% merupakan kadar optimum yang memenuhi seluruh persyaratan yang ditetapkan, dengan nilai VMA sebesar 15,84%, VFB sebesar 76,37%, flow sebesar 4,00 mm, stabilitas sebesar 1.475 kg, VIM sebesar 3,16%, dan MQ sebesar 385 kg/mm. Dengan demikian, kadar 6% dapat direkomendasikan

sebagai kadar penambahan serbuk limbah plastik multilayer yang paling sesuai pada campuran Laston AC-BC dengan metode *wet process*.

## 2. Saran

- a) Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai pengujian durabilitas, seperti perendaman (*immersion test*) pada rentang waktu yang lebih panjang, untuk mengetahui ketahanan campuran AC-BC dengan penambahan serbuk limbah plastik multilayer terhadap pengaruh air dan cuaca dalam jangka panjang.
- b) Disarankan untuk melakukan pengujian dan perhitungan Kadar Aspal Optimum (KAO) secara langsung pada campuran yang telah ditambahkan serbuk limbah plastik multilayer, tidak hanya mengacu pada hasil penelitian terdahulu, agar nilai KAO yang diperoleh lebih representatif terhadap karakteristik campuran yang diteliti.
- c) Perlu dilakukan penelitian dengan variasi kadar yang lebih rapat di sekitar rentang 5%–7%, guna memperoleh titik kadar optimum serbuk limbah plastik multilayer yang lebih akurat dan presisi.
- d) Disarankan dilakukan uji coba skala lapangan (*field trial*) untuk memvalidasi hasil pengujian skala laboratorium serta mengetahui kinerja campuran pada kondisi pembebanan dan lingkungan yang sesungguhnya.
- e) Perlu diperhatikan homogenitas ukuran dan distribusi serbuk limbah plastik multilayer sebelum proses pencampuran, agar diperoleh campuran aspal yang lebih merata dan konsisten.
- f) Perlu diperhatikan homogenitas ukuran dan distribusi serbuk limbah plastik multilayer sebelum proses pencampuran, agar diperoleh campuran aspal yang lebih merata dan konsisten.

## REFERENCES

- Irianto, Djamaluddin, A. R., Pasra, M., & Arsyad, A. (2021). STRENGTH AND TOUGHNESS CHARACTERISTICS OF AC-WC MIXTURE CONTAINING PET AND PP PLASTIC WASTE UNDER STATIC COMPRESSION. *International Journal of GEOMATE*, 20(78), 20–27. <https://doi.org/10.21660/2021.78.68868>
- Karyawan, I. D. M. A., Widianty, D., & Febriana, A. (2025). Potensi Pemanfaatan Limbah Plastik HDPE Sebagai Bahan Aditif untuk Meningkatkan Kinerja Perkerasan AC-BC. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 7(01), 468–479. <https://doi.org/10.53863/kst.v7i01.1660>
- Lulu'ah, L., Irwansyah, I., & Ardhyani, M. Z. (2023). Pengaruh Penambahan Limbah Plastik LDPE pada Lapisan Perkerasan Jalan AC-WC. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.30811/portal.v15i1.3898>
- Nugraha, A. F., Gaol, C. S. A. L., Chalid, M., Akbar, G. M. H. H., & Aqoma, H. (2024). Enhancing the compatibility of low-value multilayer plastic waste in bitumen mixtures using atmospheric cold plasma and thermal oxidation. *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/20550340.2024.2375929>
- Nugraha, A. F., Naindraputra, A. J., Gaol, C. S. A. L., Ismojo, & Chalid, M. (2022). Polypropylene-based Multilayer Plastic Waste Utilization on Bitumen Modification for Hot-Mixed Asphalt Application: Preliminary Study. *Journal of Applied Science, Engineering, Technology, and Education*, 4(2), 157–166. <https://doi.org/10.35877/454RI.asci1119>
- Nurkhaerani, F., Sari, G. L., Debora, F., Nugroho, E. O., & Hassalum, Z. D. (2024). Analisis Paving Block berdasarkan Sifat Tampak dan Reduksi Limbah Plastik Multilayer, Limbah Keramik Sanitary, dan Limbah Karet Alas Sepatu Analysis of Paving Blocks based on Visible Properties and Reduction of Multilayer Plastic Waste, Sanitary Cerami. 6(2), 91–97.
- Qabur, A. (2023). Optimization of the Use of Post-Industrial Recycled Multilayer Plastic Packaging (MPP) as Asphalt Modifier.
- Qabur, A., Baaj, H., & El-Hakim, M. (2024). Exploring the low-temperature performance of MPP-modified asphalt binders and mixtures using wet method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 51(5), 489–507. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0306>
- Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2022). Using waste plastics as asphalt modifier: A review. *Dalam Materials* (Vol. 15, Nomor 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15010110>