

Analysis of the Effect of Adding PET (Polyethylene Terephthalate) Plastic Waste to a Laston Aus (AC-WC) Mixture Using the Marshall Method

[Analisis Pengaruh Penambahan Limbah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) pada Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC) Menggunakan Metode Marshall]

Dimas Yudhistira ¹⁾, Atik Wahyuni ^{*2)}

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: atikwahyuni@umsida.ac.id

Abstract. Laston Lapis Aus (AC-WC) is a surface layer of flexible pavement that is directly exposed to traffic loads and environmental effects. This study aimed to analyze the effect of PET plastic waste addition on the Marshall characteristics of AC-WC mixtures and determine whether an optimum PET content could be obtained. PET contents of 0%, 2%, 4%, and 6% were used with asphalt contents of 5.40%, 5.90%, and 6.40%, resulting in 36 main specimens. The mixtures were prepared using the wet process and evaluated based on density, stability, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, and VFA. The results showed non-linear changes in Marshall characteristics. At 5.90% asphalt, the highest stability of 4,790.77 kg was obtained at 4% PET, while the highest MQ of 1,202.23 kg/mm occurred at 6% PET. However, VIM remained above the specified range. Therefore, the optimum PET content could not be determined.

Keywords - AC-WC; Marshall; PET; plastic waste; wet process

Abstrak. Laston Lapis Aus (AC-WC) merupakan lapisan permukaan perkerasan lentur yang secara langsung menerima beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan limbah PET terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC serta mengetahui kemungkinan diperolehnya kadar PET optimum. Variasi PET sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% digunakan pada kadar aspal 5,40%, 5,90%, dan 6,40% dengan 36 benda uji utama. Campuran dibuat menggunakan wet process dan dievaluasi berdasarkan kepadatan, stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFA. Hasil menunjukkan perubahan karakteristik Marshall yang tidak linier. Pada kadar aspal 5,90%, stabilitas tertinggi sebesar 4.790,77 kg diperoleh pada PET 4%, sedangkan MQ tertinggi sebesar 1.202,23 kg/mm pada PET 6%. Namun, nilai VIM masih berada di atas rentang persyaratan. Dengan demikian, kadar PET optimum belum dapat ditentukan.

Kata Kunci - AC-WC; Marshall; PET; limbah plastik; wet process

I. PENDAHULUAN

Limbah plastik merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memerlukan alternatif pengelolaan karena penggunaannya yang luas menghasilkan limbah dalam jumlah besar. Salah satu jenis plastik yang banyak digunakan sebagai bahan kemasan adalah *Polyethylene Terephthalate* (PET). Pemanfaatan kembali limbah PET pada bidang konstruksi jalan merupakan salah satu pendekatan yang telah dikembangkan untuk memberikan nilai guna terhadap material tersebut sekaligus mengurangi limbah plastik [1], dan [2].

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan tambah pada campuran beraspal telah menjadi salah satu topik penelitian dalam bidang perkerasan jalan. Penambahan limbah plastik pada campuran laston dapat memengaruhi karakteristik Marshall, antara lain stabilitas, *flow*, dan parameter volumetrik campuran [1], [3], dan [4]. Penelitian mengenai penggunaan PET pada AC-WC juga menunjukkan bahwa penambahan PET dapat menghasilkan perubahan pada kepadatan, stabilitas, *flow*, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient (MQ) [5], dan [6]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PET memiliki potensi sebagai bahan tambah pada campuran beraspal, tetapi respon yang dihasilkan bergantung pada variasi material dan kadar PET yang digunakan. Penelitian terbaru juga menunjukkan adanya perbedaan karakteristik campuran pada variasi kadar PET tertentu [7].

Penelitian khusus mengenai PET menunjukkan bahwa kadar bahan tambah merupakan salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik campuran. Variasi kadar PET dapat menghasilkan peningkatan stabilitas pada kondisi tertentu, tetapi peningkatan tersebut tidak selalu berlangsung secara linier pada seluruh parameter Marshall [5], dan [8]. Penelitian lainnya memperoleh kadar PET tertentu yang memenuhi persyaratan Marshall, tetapi kadar optimum

yang diperoleh berbeda antara satu penelitian dan penelitian lainnya [6], dan [7]. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa hasil penggunaan PET dipengaruhi oleh karakteristik campuran dan rancangan penelitian yang digunakan.

Selain kadar PET, metode pencampuran juga merupakan faktor yang perlu diperhatikan. Penelitian mengenai PET menunjukkan bahwa ukuran, kadar, dan proses pencampuran dapat memengaruhi sifat reologi bahan pengikat dan karakteristik material yang dihasilkan [9]. Penelitian lain mengenai modifikasi bahan pengikat dengan berbagai jenis PET juga menunjukkan bahwa karakteristik PET dapat memberikan respons yang berbeda terhadap bahan pengikat aspal [10]. Dengan demikian, variasi metode pencampuran menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam penggunaan PET sebagai bahan tambah.

Penelitian terdahulu mengenai PET pada AC-WC umumnya berfokus pada penentuan kadar PET atau kadar aspal yang menghasilkan parameter Marshall tertentu. Beberapa penelitian menggunakan metode *dry process*, sedangkan penelitian lainnya menggunakan proses pencampuran PET dengan aspal sebelum dicampurkan dengan agregat [6], dan [9]. Perbedaan kadar PET, kadar aspal, gradasi agregat, dan proses pencampuran dapat menghasilkan respons Marshall yang berbeda. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian yang mengevaluasi perubahan karakteristik Marshall pada rentang kadar PET dan kadar aspal yang berbeda dengan metode *wet process* serta mempertimbangkan keterpenuhan seluruh parameter Marshall secara bersamaan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan variasi PET sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat aspal pada kadar aspal 5,40%, 5,90%, dan 6,40% menggunakan metode *wet process*. Pengaruh variasi tersebut dianalisis melalui kepadatan, stabilitas, *flow*, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFA. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengetahui pola perubahan karakteristik Marshall sekaligus mengevaluasi apakah terdapat kombinasi kadar PET dan kadar aspal yang dapat memenuhi seluruh persyaratan Marshall. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan limbah plastik PET terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC pada variasi kadar PET dan kadar aspal yang digunakan serta mengevaluasi kemungkinan diperolehnya kadar PET optimum berdasarkan persyaratan Marshall.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) terhadap karakteristik campuran Laston Lapis Aus (AC-WC) menggunakan metode Marshall. Tahapan penelitian meliputi persiapan bahan dan peralatan, pemeriksaan material, perancangan campuran, pembuatan benda uji, pengujian Marshall, dan analisis data.

Bahan yang digunakan terdiri atas agregat kasar, agregat halus, abu batu, aspal, dan limbah PET dalam bentuk cacahan. Komposisi agregat terdiri atas 50% agregat kasar, 41% agregat halus, dan 9% abu batu. Penggunaan PET sebagai bahan tambah pada campuran beraspal dapat memengaruhi karakteristik Marshall berdasarkan kadar dan metode pencampurannya [5], [6], dan [7]. Peralatan yang digunakan meliputi timbangan, oven, alat pemanas, cetakan benda uji, alat pemadat, bak perendam, dan mesin Marshall.

Rancangan penelitian menggunakan kadar PET 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat aspal serta kadar aspal 5,40%, 5,90%, dan 6,40%. Kadar aspal 5,90% merupakan nilai kadar aspal rencana (Pb) hasil perhitungan komposisi campuran. Setiap kombinasi dibuat sebanyak tiga benda uji sehingga diperoleh 36 benda uji utama. Rancangan benda uji ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan benda uji utama

Tahap Pengujian	Kadar PET	Kadar Aspal	Jumlah Benda Uji
1.	PET 0%	5.4%	3
	PET 0%	5.9%	3
	PET 0%	6.4%	3
2.	PET 2%	5.4%	3
	PET 2%	5.9%	3
	PET 2%	6.4%	3
3.	PET 4%	5.4%	3
	PET 4%	5.9%	3
	PET 4%	6.4%	3

Tahap Pengujian	Kadar PET	Kadar Aspal	Jumlah Benda Uji
4.	PET 6%	5.4%	3
	PET 6%	5.9%	3
	PET 6%	6.4%	3
Total Benda Uji Utama:			36

Pencampuran menggunakan metode *wet process*, yaitu PET dicampurkan dengan aspal sebelum dicampurkan dengan agregat. Aspal dan PET dipanaskan secara terpisah, kemudian dicampurkan hingga homogen. Metode pencampuran PET dapat memengaruhi karakteristik campuran beraspal [9], dan [10]. Benda uji dipadatkan sebanyak 75 tumbukan pada setiap sisi sesuai prosedur pengujian Marshall [11].

Selain 36 benda uji utama, dibuat dua benda uji tambahan dengan kadar PET 2% dan 4% pada kadar aspal 5,90%. Pada benda uji tambahan, aspal dan PET dicampurkan terlebih dahulu kemudian dipanaskan secara bersama-sama sebelum dicampurkan dengan agregat. Data tersebut dianalisis secara terpisah dan digunakan sebagai pembandingan terhadap benda uji utama.

Variabel bebas penelitian adalah kadar PET dan kadar aspal, sedangkan variabel terikat meliputi stabilitas, *flow*, Marshall Quotient (MQ), *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), dan *Void Filled with Asphalt* (VFA). Pengumpulan data dilakukan melalui pengujian Marshall terhadap benda uji [11].

Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan perubahan nilai stabilitas, *flow*, MQ, VIM, VMA, dan VFA pada setiap variasi kadar PET dan kadar aspal. Hasil pengujian dibandingkan dengan persyaratan karakteristik campuran AC-WC yang digunakan dalam penelitian [10], dan [11].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

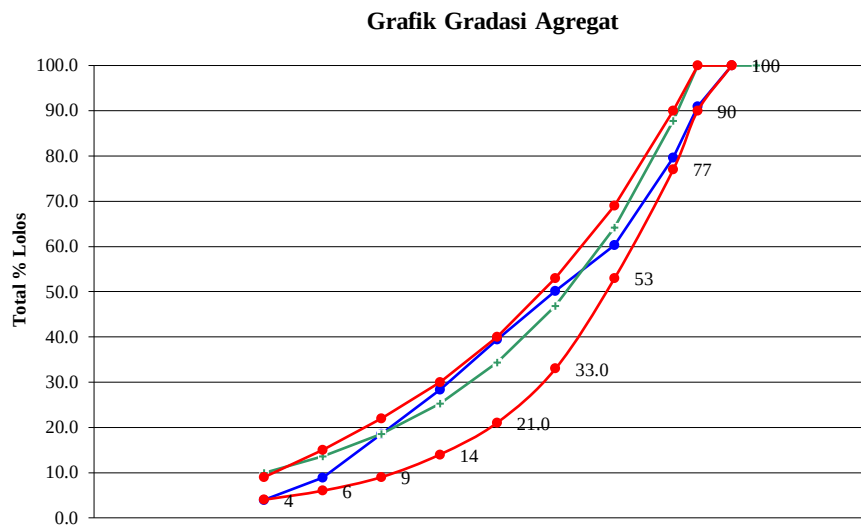
A. Hasil pengujian material

Hasil pemeriksaan aspal Pen 60/70 menunjukkan nilai penetrasi 70 (0,1 mm), titik lembek 68°C, titik nyala 262°C, daktilitas 157,83 cm, berat jenis 1,00 gr/cm³, dan kehilangan berat 0%. Hasil tersebut memenuhi persyaratan material yang digunakan dalam penelitian sehingga aspal dapat digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran AC-WC [10].

Tabel 2. Hasil pemeriksaan karakteristik aspal

No.	Parameter Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Status
1	Penetrasi pada 25 °C	70 (0.1 mm)	60 – 70	Memenuhi
2	Titik lembek	68°C	≥ 48°C	Memenuhi
3	Titik nyala	262°C	≥ 232°C	Memenuhi
4	Daktilitas	157.83 cm	≥ 100 cm	Memenuhi
5	Berat jenis	1.00 gr/ml	≥ 1.00 gr/ml	Memenuhi
6	Kehilangan berat	0%	Maks 0.8%	Memenuhi

Perencanaan campuran menggunakan 50% agregat kasar, 41% agregat halus, dan 9% abu batu. Kadar aspal rencana (Pb) diperoleh sebesar 5,89833% dan dibulatkan menjadi 5,90%. Kadar tersebut digunakan sebagai titik tengah variasi, sedangkan 5,40% dan 6,40% digunakan sebagai variasi kadar aspal di bawah dan di atas Pb.



Gambar 1. Grafik gradasi agregat gabungan AC-WC

B. Karakteristik Marshall campuran AC-WC

Pengujian Marshall dilakukan pada 36 benda uji utama dengan empat variasi PET dan tiga variasi kadar aspal. Hasil pengujian meliputi kepadatan, VIM, VMA, VFA, stabilitas, *flow*, dan MQ.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil pengujian Marshall

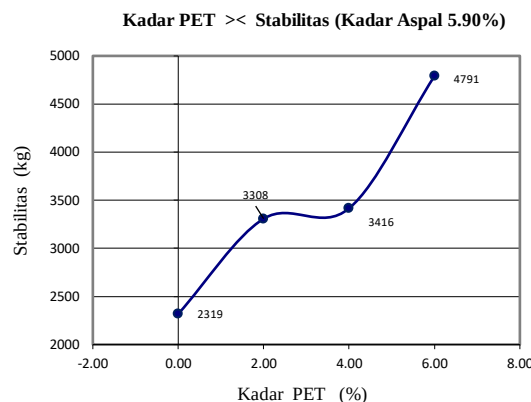
Kadar PET (%)	Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	Kepadatan (gr/cm ³)
0	5.40	2025.79	3.27	22.658	35.844	86.813	2.443
	5.90	2318.71	3.80	20.985	35.542	85.443	2.467
	6.40	3345.27	4.54	36.319	48.904	87.415	1.966
2	5.40	4958.98	6.06	22.355	33.123	89.232	2.452
	5.90	3307.69	4.52	19.446	31.504	87.943	2.515
	6.40	3887.37	4.16	21.393	34.002	87.391	2.427
4	5.40	3018.78	3.14	25.601	35.963	89.639	2.350
	5.90	4790.77	4.25	22.643	34.255	88.388	2.416
	6.40	3702.03	4.03	28.472	40.000	88.473	2.209
6	5.40	2997.17	5.47	32.527	41.888	90.639	2.131
	5.90	3415.51	2.82	26.310	37.426	88.884	2.301
	6.40	3729.83	4.20	28.745	40.235	88.511	22.00

Secara umum, penambahan PET menghasilkan perubahan karakteristik Marshall yang tidak linier. Pada kadar aspal 5,90%, kepadatan meningkat dari 2,467 gr/cm³ pada PET 0% menjadi 2,515 g/cm³ pada PET 2%, kemudian menurun menjadi 2,416 gr/cm³ dan 2,301 gr/cm³ pada PET 4% dan 6%. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar PET tidak secara langsung menghasilkan peningkatan kepadatan. Perubahan susunan material dan perbedaan karakteristik PET terhadap agregat mineral dapat memengaruhi kemampuan campuran untuk mencapai kondisi yang lebih rapat.

Stabilitas pada kadar aspal 5,90% meningkat dari 2.318,71 kg pada PET 0% menjadi 3.307,69 kg pada PET 2% dan mencapai 4.790,77 kg pada PET 4%, kemudian turun menjadi 3.415,51 kg pada PET 6%. Peningkatan hingga PET 4% menunjukkan bahwa PET dapat meningkatkan kekakuan campuran melalui modifikasi binder. Namun, penurunan pada PET 6% menunjukkan bahwa penambahan PET yang lebih tinggi tidak selalu meningkatkan kemampuan campuran menahan beban. Hal tersebut dapat berkaitan dengan perubahan homogenitas dan distribusi PET dalam binder. Pengaruh kadar PET terhadap karakteristik campuran yang tidak selalu linier juga dilaporkan pada penelitian terdahulu [4], [5], dan [7].

C. Pengaruh kadar PET terhadap karakteristik Marshall

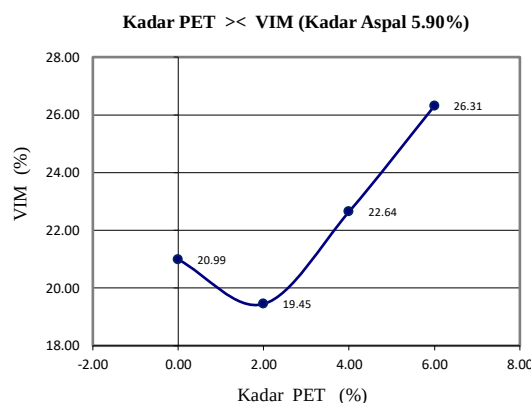
Pada kadar aspal 5,90%, nilai MQ meningkat dari 614,19 kg/mm pada PET 0% menjadi 718,27 kg/mm pada PET 2%, 1.180,96 kg/mm pada PET 4%, dan 1.202,23 kg/mm pada PET 6%. Peningkatan MQ menunjukkan meningkatnya kekakuan relatif campuran berdasarkan hubungan antara stabilitas dan *flow*. Hal ini menunjukkan bahwa PET memberikan pengaruh terhadap respons mekanis campuran, meskipun pengaruh tersebut tidak dapat digunakan secara tunggal untuk menentukan kadar PET optimum.



Gambar 2. Hubungan kadar PET terhadap stabilitas pada kadar aspal 5,90%

VIM menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Pada kadar aspal 5,90%, nilai VIM sebesar 20,985% pada PET 0%, menurun menjadi 19,446% pada PET 2%, kemudian meningkat menjadi 22,643% pada PET 4% dan 26,310% pada PET 6%. Nilai VIM terendah pada PET 2% menunjukkan bahwa kadar tersebut menghasilkan kondisi volumetrik paling rendah dalam rentang PET yang diuji. Namun, nilainya masih jauh di atas rentang 3–5%.

Peningkatan VIM pada PET 4% dan 6% dapat dikaitkan dengan meningkatnya jumlah PET dalam campuran yang dapat memengaruhi susunan partikel dan proses pemadatan. Dengan meningkatnya rongga campuran, kepadatan juga cenderung menurun, sebagaimana terlihat pada PET 4% dan 6%. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa respons mekanis PET perlu dianalisis bersamaan dengan parameter volumetrik. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa ukuran, kadar, dan proses pencampuran PET dapat memengaruhi sifat material dan respon campuran beraspal [7], [8], dan [9].



Gambar 3. Hubungan kadar PET terhadap VIM pada kadar aspal 5,90%

Nilai *flow* pada kadar aspal 5,90% meningkat dari 3,80 mm pada PET 0% menjadi 4,52 mm pada PET 2% dan 4,25 mm pada PET 4%, kemudian menurun menjadi 2,82 mm pada PET 6%. Pola tersebut menunjukkan bahwa respon deformasi campuran terhadap penambahan PET tidak linier. PET 2% dan PET 4% menghasilkan *flow* di atas batas maksimum 4 mm, sedangkan PET 6% kembali berada dalam rentang persyaratan.

Apabila seluruh parameter dibandingkan, PET 4% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 4.790,77 kg, sedangkan PET 6% menghasilkan MQ tertinggi sebesar 1.202,23 kg/mm. Namun, VIM masing-masing masih sebesar 22,643% dan 26,310%. Dengan demikian, kedua variasi tersebut menunjukkan respon mekanis yang menonjol, tetapi tidak dapat dinyatakan sebagai kadar PET optimum.

Kadar aspal 5,90% menghasilkan VIM terendah pada seluruh variasi PET, yaitu 20,985% pada PET 0%, 19,446% pada PET 2%, 22,643% pada PET 4%, dan 26,310% pada PET 6%. Meskipun demikian, seluruh nilai tersebut masih berada di atas batas maksimum 5%, sehingga 5,90% hanya merupakan kadar aspal yang menghasilkan VIM terendah dalam rentang pengujian dan bukan KAO.

Hasil ini berbeda dengan beberapa penelitian yang memperoleh kondisi campuran yang memenuhi seluruh parameter Marshall pada kadar PET dan kadar aspal tertentu. Penelitian lain melaporkan bahwa campuran dengan PET dapat memenuhi karakteristik Marshall pada kadar aspal 6% dan 6,5% [4]. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh kadar aspal, komposisi material, kadar PET, serta metode pencampuran yang digunakan. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa perubahan kadar PET dapat memberikan respons berbeda terhadap stabilitas, *flow*, dan parameter volumetrik [5], [7].

Dengan demikian, temuan penelitian menunjukkan bahwa penambahan PET dapat meningkatkan beberapa parameter mekanis, tetapi peningkatan tersebut tidak otomatis menghasilkan campuran yang memenuhi seluruh persyaratan Marshall. Dalam penelitian ini, VIM menjadi parameter pembatas karena seluruh variasi masih menghasilkan nilai di atas rentang yang dipersyaratkan.

D. Pengaruh urutan proses pencampuran

Dua benda uji tambahan digunakan untuk mengamati pengaruh perbedaan urutan pencampuran pada PET 2% dan PET 4% dengan kadar aspal 5,90%. Pada benda uji utama, aspal dan PET dipanaskan secara terpisah sebelum dicampurkan, sedangkan pada benda uji tambahan aspal dan PET dicampurkan terlebih dahulu kemudian dipanaskan bersama. Perbedaan tersebut dapat memengaruhi kontak awal dan dispersi PET dalam binder.

Pada PET 2%, stabilitas meningkat dari 3.307,69 kg pada benda uji utama menjadi 3.491,79 kg pada benda uji tambahan. Sebaliknya, pada PET 4%, stabilitas menurun dari 4.790,77 kg menjadi 4.221,15 kg. Perbedaan arah tersebut menunjukkan bahwa urutan pencampuran berpotensi memengaruhi respon campuran, tetapi pengaruhnya tidak sama pada setiap kadar PET.

Perbedaan juga terlihat pada VIM. PET 2% meningkat dari 19,446% menjadi 23,824%, sedangkan PET 4% menurun dari 22,643% menjadi 21,874%. Hasil ini menunjukkan adanya indikasi perubahan homogenitas atau susunan internal campuran akibat perbedaan proses pencampuran. Penelitian mengenai PET juga menunjukkan bahwa proses pencampuran merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi karakteristik material yang dimodifikasi PET [7].

Namun, kedua kondisi tambahan hanya terdiri atas satu benda uji sehingga hasilnya belum dapat digunakan untuk generalisasi statistik. Oleh karena itu, hasil ini diposisikan sebagai data observasi pembandingan, bukan sebagai dasar untuk menentukan metode pencampuran yang lebih baik.

E. Temuan ilmiah penelitian

Berdasarkan keseluruhan hasil, penambahan PET menghasilkan respon Marshall yang tidak linier. Pada kadar aspal 5,90%, peningkatan PET hingga 4% meningkatkan stabilitas, sedangkan PET 6% menghasilkan MQ tertinggi tetapi stabilitas menurun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kontribusi PET terhadap kekakuan campuran tidak terus meningkat secara proporsional seiring bertambahnya kadar PET.

Temuan lainnya adalah bahwa peningkatan parameter mekanis belum diikuti oleh terpenuhinya parameter volumetrik. VIM menjadi parameter pembatas pada seluruh variasi, dengan nilai terendah 19,446% pada PET 2% dan kadar aspal 5,90%. Dengan demikian, kadar PET optimum belum dapat ditentukan, karena tidak terdapat kombinasi kadar PET dan kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter Marshall secara bersamaan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa evaluasi PET pada campuran AC-WC tidak cukup dilakukan berdasarkan stabilitas atau MQ saja. Parameter mekanis dan volumetrik harus dipertimbangkan secara bersamaan. Perbedaan hasil dengan penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa kinerja PET pada campuran beraspal sangat bergantung pada kombinasi kadar PET, kadar aspal, karakteristik material, ukuran PET, dan proses pencampuran [4], [5], [7], dan [9].

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan limbah plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% pada campuran AC-WC dengan kadar aspal 5,40%, 5,90%, dan 6,40% belum menghasilkan kombinasi campuran yang memenuhi seluruh persyaratan karakteristik Marshall secara bersamaan. Nilai stabilitas, VMA, dan VFA pada umumnya telah memenuhi persyaratan yang digunakan, tetapi seluruh variasi masih menghasilkan nilai VIM di atas rentang 3–5% dan beberapa variasi memiliki nilai *flow* di luar rentang 2–4 mm. Pada kadar aspal 5,90%, stabilitas tertinggi sebesar 4.790,77 kg diperoleh pada PET 4%, sedangkan nilai Marshall Quotient (MQ) tertinggi sebesar 1.202,23 kg/mm diperoleh pada PET 6%. Meskipun demikian, kedua variasi tersebut belum dapat ditetapkan sebagai kadar PET optimum karena parameter volumetriknya belum memenuhi persyaratan. Nilai VIM terendah diperoleh pada PET 2% dengan kadar aspal 5,90%, yaitu sebesar 19,446%, tetapi masih jauh di atas batas yang dipersyaratkan. Dengan demikian, kadar PET optimum belum dapat ditentukan pada rentang variasi yang digunakan dan kadar aspal 5,90% belum dapat dinyatakan sebagai Kadar Aspal Optimum (KAO). Secara keseluruhan, penambahan PET memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall dengan pola perubahan yang tidak linier, sehingga evaluasi penggunaan PET pada campuran AC-WC perlu mempertimbangkan parameter mekanis dan volumetrik secara bersamaan. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mempersempit variasi kadar PET pada rentang yang menunjukkan respon mekanis tertentu serta memberikan perlakuan awal pada PET untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap homogenitas pencampuran dan karakteristik Marshall.

UCAPAN TERIMA KASIH

Seluruh rangkaian penelitian hingga penyusunan artikel ini terlaksana dengan adanya dukungan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan apresiasi kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo melalui Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, serta pihak-pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian, khususnya pada tahap persiapan bahan, pembuatan benda uji, pengujian Marshall, dan penyelesaian artikel.

REFERENSI

- [1] N. S. Ngabar, “Pengaruh Penggunaan Limbah Botol Plastik Terhadap Karakteristik Marshall Campuran Lapis Aspal Beton (LASTON),” *DTS*, vol. 15, no. 2, hlm. 77–84, Nov 2022, doi: 10.23917/dts.v15i2.18748.
- [2] G. Priyadi, I. Indriasari, dan R. L. Rahman, “Analisis Substitusi Limbah Plastik (LDPE) terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Laston AC-WC,” *Jurnal Kridatama Saintek*, vol. 5, no. 02, hlm. 334–347, Okt 2023, doi: 10.53863/kst.v5i02.945.
- [3] D. Asmaroni, A. Fatoni, dan A. Yusriyah, “Pengaruh Penggunaan Aspal Plastik Recycle dan Aspal Pen 60/70 Pada Campuran Aspal Panas AC-WC (Asphalt Concrete Wearing Course) Menggunakan Agregat Lokal Madura Terhadap Karakteristik Marshall,” vol. 06, 2023.
- [4] J. E. Simangunsong, M. J. Alkas, dan A. Wati, “PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK PET SEBAGAI BAHAN TAMBAH ASPAL PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE WEARING COURSE (AC-WC),” vol. 5, 2021.
- [5] S. Hani, M. Y. P. Lubis, dan H. Giawa, “Studi Karakteristik Marshall pada Campuran Aspal AC-WC dengan Penambahan Limbah Botol Plastik”.
- [6] T. W. Mahdi, S. Senadheera, dan T. Ghebrab, “Effect of PET Size, Content and Mixing Process on the Rheological Characteristics of Flexible Pavement,” *Materials*, vol. 15, no. 10, hlm. 3565, Mei 2022, doi: 10.3390/ma15103565.
- [7] I. K. Abdulhasan, H. H. Joni, T. D. Saadoon, dan A. Dulaimi, “Optimizing asphalt binder performance with various PET types,” *Open Engineering*, vol. 14, no. 1, hlm. 20220595, Jul 2024, doi: 10.1515/eng-2022-0595.
- [8] A. Jexembayeva, M. Konkanov, L. Aruova, A. Kirgizbayev, dan L. Zhaksylykova, “Performance Optimization Approach of Polymer-Modified Asphalt Mixtures with PET and PE Waste,” *Polymers*, vol. 16, no. 23, hlm. 3308, Nov 2024, doi: 10.3390/polym16233308.
- [9] M. Hafidz, S. Mayuni, dan H. Azwansyah, “Utilization of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste as Material in AC-WC Mixture,” *JTS*, vol. 25, no. 3, hlm. 2237–2249, Agu 2025, doi: 10.26418/jts.v25i3.90392.
- [10] D. J. B. Marga and K. P. U. dan P. Rakyat, ‘Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2),’ Jakarta, 2020. [Online]. Available: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/spesifikasi-umum-bina-marga-2018-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan-revisi-2-no-161sedb2020>.
- [11] B. S. Nasional, ‘SNI 2489:2018 Metode Uji Stabilitas dan Pelelehan Campuran Beraspal Panas dengan Menggunakan Alat Marshall,’ 2018, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta. [Online]. Available: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/13901-sni24892018>.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.