

PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK *POLYETHYLENE THEREPHTHALETE* (PET) UNTUK CAMPURAN *ASPHALT CONCRETE - WEARING COURSE* (AC – WC)

Tantin Pristyawati^{1*}, Hery Susilo², dan Bagas Wahyu Adhi³

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Jl. Sudjono Humardhani No. 1 Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia

²PUPR, Kabupaten Sukoharjo, Jl. Rajawali No. 8 Mojotegalan Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Batik, Jl. Agus Salim No. 10 Sondakan, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

*tantintsipil@gmail.com

Masuk: 06-02-2025, revisi: 05-03-2025, diterima untuk diterbitkan: 17-03-2025

ABSTRACT

This research is an innovation to reduce asphalt use by adding PET plastic waste to the asphalt mixture. The asphalt mix design uses 60/70 pen asphalt with a certain percentage as well as PET waste. The aim of the research is to find out what is the optimal percentage of using PET in the pen 60/70 asphalt mixture to produce an asphalt mixture that meets the criteria or specifications and what are the stability and flow values with this mixed innovation. The use of PET is being considered because this is expected to reduce plastic waste. Apart from that, PET's properties include being strong, water resistant and easy to recycle. It is hoped that it will be able to contribute to the mixture in terms of ease of implementation in the mixture and providing strength to the mixture. The implementation used the experimental method with data taken directly where the aggregate data, the average density of fine and coarse aggregates was 2.7 and 2.6, gradation analysis using a combination of coarse aggregates (CA): medium aggregates (MA): fine aggregates (FA) obtained 19%: 34%: 46%. Asphalt pen 60/70 which meets specifications and PET waste with percentages of 2%, 4%, 6%, 8% and 10%. The test results of the mixture obtained a stability value between 1100 to 1300 kg and a flow value ranging from 3.00 – 3.70.

Keywords: asphalt innovation; polyethylene therephtalete (PET); stability

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan salah satu inovasi untuk mengurangi penggunaan aspal dengan menambahkan limbah plastik PET pada campuran aspal. Desain campuran aspal menggunakan aspal pen 60/70 dengan persentase tertentu begitu juga limbah PET. Tujuan untuk mengetahui berapa persentase optimal penggunaan PET pada campuran aspal pen 60/70 untuk menghasilkan campuran aspal yang memenuhi kriteria atau spesifikasi dan berapa nilai *stability* dan *flow* dengan inovasi campuran tersebut. Penggunaan PET dipertimbangkan karena dengan ini diharapkan dapat mengurangi limbah plastic, selain itu sifat yang dimiliki PET antara lain kuat, tahan air dan mudah di daur ulang diharapkan mampu memberikan kemudahan pelaksanaan dalam campuran dan memberikan tambahan kekuatan pada campuran aspal. Pelaksanaan menggunakan metode experiment dengan data yang diambil secara langsung dimana data agregat berat jenis rata – rata agregat halus juga kasar adalah 2,7 dan 2,6, analisa gradasi dengan kombinasi *coarse agregates* (CA) : agregat medium (MA) : agregat halus (FA) diperoleh 19% : 34% : 46%. Aspal pen 60/70 yang memenuhi spesifikasi dan limbah PET dengan persentase 2%, 4%, 6%, 8% dan 10 %. Hasil uji dari campuran diperoleh nilai stabilitas di antara 1100 sampai 1300 kg dan nilai flow rentang 3,00 – 3,70.

Kata kunci: inovasi aspal; *polyethylene therephtalete* (PET); stabilitas

1. PENDAHULUAN

Perkerasan lentur atau *flexible pavement* sampai saat ini masih menjadi andalan Indonesia sebagai struktur perkerasan jalan. kemampuan dalam penerimaan beban serta kenyamanan dalam berkendara menjadi salah satu alasannya. Struktur lapisan aspal dari atas tersusun lapis permukaan, lapis pondasi atas (*base*), lapis pondasi bawah (*sub base*) dan tanah dasar (*sub grade*). Lapis permukaan terdiri dari AC-WC, AC-BC dan AC base, AC- WC merupakan lapisan paling atas yang langsung berhubungan dengan beban roda kendaraan. Menurut (Simangunsong, 2021) semakin meningkatnya pembebanan kendaraan bermotor serta kurangnya pemeliharaan perkerasan jalan dapat mempercepat kerusakan pada perkerasan jalan. Perbaikan dan pembangunan jalan yang terus menerus menyebabkan kebutuhan penggunaan aspal sebagai bahan pengikat semakin meningkat.

Berdasarkan hal tersebut, diperlukan adanya inovasi untuk mendapatkan formula campuran aspal dengan menggunakan penambahan bahan lain atau penggunaan kembali (*reuse*) limbah dengan persentase tertentu sebagai bagian dari aspal tetapi tidak membuat aspal kehilangan sifat – sifatnya. Selain itu juga untuk penghematan penggunaan aspal. Pemilihan penggunaan plastik sebagai campuran karena berlimpahnya plastik yang masih digunakan secara massal. Berdasarkan data pada tahun 2020 di Indonesia menghasilkan sampah plastik sebanyak 3,4 juta ton yang menjadikan Indonesia dalam peringkat ketiga setelah India dan Nigeria sebagai penghasil sampah plastik terbesar.

Ada beberapa jenis plastik yang digunakan dalam keseharian antara lain PET, HDPE, PP dan sebagainya. Beberapa jenis plastik sudah digunakan sebagai bahan tambah dalam campuran aspal, antara lain pemanfaatan limbah HDPE dalam campuran. Meningkatnya penggunaan kantong plastik sebagai kemasan menyebabkan peningkatan jumlah sampah, oleh karena itu perlu ada pemanfaatan sampah untuk mengurangi penumpukan yang terus bertambah. Penelitian dengan pemanfaatan limbah kantong plastik HDPE sebagai substitusi sebagian bitumen atau aspal pada campuran aspal *Asphalt Concrete–Wearing Course* (AC–WC) dengan variasi kadar HDPE sebesar 2%, 4%, 6%, 8%, 10% menghasilkan kesimpulan kadar aspal optimal (KAO) yang diperoleh adalah 5,7%. (Pinem et al., 2022).

Penggunaan PE dan HDPE pada jenis ini memberikan pengaruh pada campuran laston terhadap berbagai karakteristik Marshall yakni untuk nilai stabilitas, kelelahan dan VFA yang cenderung mengalami peningkatan, sedangkan nilai Flow, VIM, VMA dan MQ yang cenderung mengalami penurunan. Pengaruh campuran aspal-HDPE memberikan nilai atau hasil karakteristik Marshall yang lebih bagus dibandingkan campuran aspal-PE (Rahmawati, 2015). Pengaruh penambahan Plastik HDPE terhadap campuran aspal AC-BC tidak optimal karena semakin besar penambahan plastik HDPE dapat menurunkan kualitas AC-BC. Hasil pembuktian KAO dari nilai karakteristik yang telah diperoleh yang di uji pada kadar HDPE 0% dan di tes pada kadar aspal 4,5% sampai dengan 6,5% didapatkan nilai 5,87% (Khadafi & Fadly, 2021).

Salah satu jenis plastik PET merupakan plastik yang biasanya digunakan untuk kemasan minuman ringan, air mineral, kemasan makanan maupun beberapa untuk kemasan kebutuhan farmasi. Plastik PET merupakan salah satu plastik yang bisa di daur ulang tetapi kegiatan daur ulang belum banyak dilakukan sehingga masih banyak yang limbah yang menumpuk pada lokasi – lokasi pembuangan sampah. Limbah PET juga dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan nanokomposit, semen mortar, dan juga aspal. Penambahan limbah PET (rPET) dalam pembuatan nanokomposit dapat meningkatkan nilai dari konduktivitas termal (GNPs), stabilitas termal (CATAS, GNPs), modulus penyimpanan (CATAS, GNPs), kekuatan tarik dan kekerasan (CNTs). Dalam pembuatan semen mortar, penambahan limbah PET dapat meningkatkan flowability secara signifikan dengan meningkatkan persentase jumlah limbah plastik PET (Utomo & Arfiana, 2023).

Berlimpahnya limbah plastik yang kemudian menjadi dasar untuk bisa memanfaatkan kembali sebagai campuran aspal. Pertimbangan lain adalah beberapa sifat yang dimiliki plastik PET seperti ringan, kuat, jernih, mudah di daur ulang dan mampu bertahan dalam segala kondisi merupakan sifat yang dibutuhkan dalam campuran aspal. Sifat kuat sangat dibutuhkan dalam campuran aspal karena dalam aplikasinya aspal akan menahan beban roda kendaraan secara berulang. Sifat ringan dan mudah di daur ulang lebih kepada kemudahan dalam pelaksanaan, sedangkan sifat mampu bertahan dalam segala kondisi ini akan dibutuhkan aspal dalam beradaptasi menghadapi perubahan cuaca. Seperti pada penelitian (Lombogia et al., 2022) pengaruh dan manfaat substitusi limbah plastik PETE terhadap karakteristik marshall yakni nilai Stabilitas, Flow, VMA, VIM, VFB dan Density pada kadar plastik 5% meningkatkan namun kemudian pada kadar plastik 10%, 15% dan 20% mengalami penurunan.

Berdasarkan dari beberapa pertimbangan diatas oleh karena itu penelitian ini dilakukan, tujuannya adalah untuk mengetahui berapa persentase optimal penggunaan PET pada campuran aspal pen 60/70 untuk menghasilkan campuran aspal yang memenuhi kriteria atau spesifikasi dan berapa nilai *stability* dan *flow* dengan inovasi campuran tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Universitas Veteran Bangun Nusantara (Univet Bantara) dengan tahapan sebagai berikut :

1. Penyiapan agregat, filler, aspal dan peralatan yang akan digunakan dalam kegiatan yaitu saringan untuk gradasi, alat pengujian berat jenis, timbangan, mold, ekstruder, alat pemanas campuran aspal, waterbath dan marshall test,
2. Pengujian analisa butiran agregat atau analisa saringan untuk mendapatkan berat jenis dan penyerapan dari masing – masing,
3. Pengujian gradasi agregat atau analisa saringan untuk mendapatkan komposisi gabungan (combined grading) dari masing – masing agregat kasar (CA), agregat medium/ sedang (MA) dan agregat halus (FA). Besaran persentase

Combine grading diperoleh melalui trial and error dengan batasan minimum dan maksimum sesuai dengan spesifikasi SNI ASTM C136:2012.

4. Pembuatan benda uji yang pertama dengan komposisi agregat sesuai dengan hasil dari tahap 3 untuk agregat dan untuk filler mengikuti peraturan dengan besaran 1-2% dari total berat keseluruhan benda uji. Penentuan Kadar aspal perkiraan dengan menggunakan persamaan $P_b = P_b = (0,035 \times \%CA) + (0,045 \times \%FA) + (0,18 \times \%FF) + K$ dimana nilai FF adalah filler dan K adalah konstanta untuk laston nilai 0,5 – 1,0. Jumlah benda uji 5 dengan persentase kadar aspal $\pm 0,5$ dari hasil perkiraan kadar aspal, Berat satu benda uji sesuai dengan peraturan SNI 03-6399-2000 seberat ± 1200 gram.
5. Tahapan ini adalah pengujian benda uji diawali dengan perendaman benda uji pada waterbath dalam suhu 60° C selama kurang lebih 30 menit. Dari waterbath kemudian dikeringkan untk melihat berat SSD atau jenuh permukaan, tahap berikutnya adalah pengujian dengan marshall untuk menenrukan karakteristiknya dan menghitung kadar aspal optimal atau KAO.
6. Hasil KAO digunakan untuk membuat benda uji yang kedua yaitu benda uji yang menggunakan bahan tambah inovasi dari limbah plastik PET. Proses penambahan limbah dilakukan dengan dibersihkan dahulu kemudian dikeringkan, limbah yang sudah kering di potong kecil – kecil. Potongan tersebut akan dicampurkan pada agregat saat kondisi dipanaskan pada suhu kurang lebih 125°C, dengan berat sesuai perhitungan. . Penambahan limbah ini tidak menambah berat benda uji atau beratnya tetap, tetapi penambahan PET akan mengurangi berat aspal pen 60/70 yang digunakan. Prosentase penambahan limbah plastik PET tidak ada pedoman , secara prinsip dari aspal modifikasi (inovasi) yang kemungkinan dan diharapkan bisa di aplikasikan harus masuk pada spesifikasi umum Bina Marga revisi 3 Tahun 2010 Tabel 6.3.2.5.
7. Selanjutnya pengujian benda uji yang kedua dengan menggunakan alat marshall test, pengujian akan menghasilkan nilai karakteristik, stabilitas dan flow.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian agregat

Pengujian fisik agregat dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat yang akan dan memperoleh nilai berat jenisnya masing - masing. Pedoman pengujian untuk agregat halus SNI 1970:2008 (BSN, 2008) dan agregat kasar SNI 1969:2008. Kelompok agregat halus mempunyai ukuran butiran terbesar tertahan saringan nomor #4 atau ukuran 4,75mm, sedangkan agregat kasar merupakan agregat yang tertahan diatas nomor #4. Hasil pengujian agregat berupa berat jenis dan kemampuan penyerapan pada Tabel 1 dan Tabel 2, yang dihitung dengan menggunakan persamaan 1:

$$\text{berat jenis SSD} = \frac{a}{c+a-d} \quad (1)$$

dengan **a** adalah berat benda uji permukaan jenuh/SSD, **c** adalah Berat piknometer + air dan **d** merupakan Berat piknometer + air + benda uji yang masing – masing satuannya adalah gram.

Tabel 1. Hasil pengujian berat jenis agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil rata – rata
Berat Jensi Bulk	2,654
Berat Jenis Kering permukaan (SSD)	2,698
Berat jenis semu (<i>apparent</i>)	2,777
Penyerapan (<i>absorption</i>)	1,667

Tabel 2. Hasil pengujian berat jenis agregat kasar

Jenis Pengujian	Hasil rata – rata
Berat Jensi Bulk	2,534
Berat Jenis Kering permukaan (SSD)	2,570
Berat jenis semu (<i>apparent</i>)	2,629
Penyerapan (<i>absorption</i>)	1,437

Hasil yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2, dimana berat jenis bulk agregat kasar dan halus ada pada rentang 2,5 – 2,6 sedangkan berat jenis SSD terdapat rata – rata diperoleh hampir sama dengan berat jenis bulk, sedangkan untuk berat jenis semu rata – rata dari kedua agregat adalah kurang lebih 2,7. Secara umum rata – rata berat jenis antara

2,500 sampai 2,700, dengan nilai tersebut sudah sesuai dengan spesifikasi pada standar nasional. Penyerapan rata – rata agregat halus dan agregat kasar $\pm 1,5\%$ dimana secara peraturan penyerapan harus $< 3\%$. Sedangkan untuk nilai berat jenis efektif agregat (G_{se}) sebesar 2,628 dan berat jenis total bulk agregat (G_{sb}) adalah 2,607.

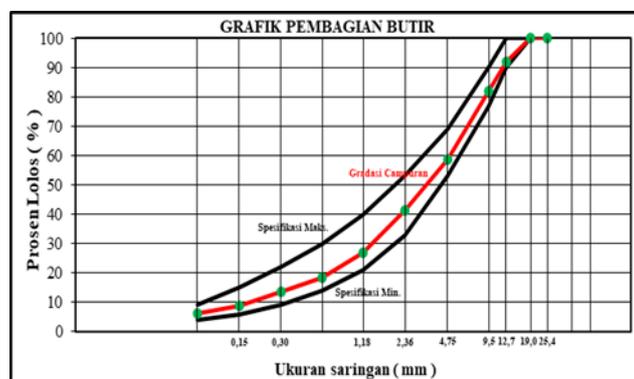
Pengujian gradasi atau analisa saringan untuk mencari persentase masing – masing CA, MA dan FA dengan *trial and error* untuk mendapatkan formula terbaik pada gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018. Hasil analisa saringan yang diperoleh adalah 19% untuk CA, 34% untuk MA dan 46% untuk FA. Persentase tersebut kemudian dikalikan dengan hasil pada analisa saringan yang termuat pada Tabel 3 untuk kolom yang berjudul A, B, dan C, dengan di tambahkan persentase filler sehingga diperoleh gradasi gabungan atau *Combined grading*, seperti yang di tunjukkan pada Tabel 3. Hasil tersebut kemudian di plotting pada grafik seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 dengan batasan maksimum dan minumum sesuai dengan Tabel 4. Hasil formula yang baik tidak boleh melewati spesifikasi gradasi yang sudah ditentukan.

Tabel 3. Hasil analisa saringan dan kombinasi gradasi

No Saringan	Ukuran Saringan (mm)	A FA	B MA	C CA	F semen	Gradasi Gabungan
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	100,00	100,00	57,22	100,00	91,87
3/8"	9,5	100,00	100,00	6,29	100,00	82,19
#4	4,75	98,36	39,88	0,67	100,00	59,93
#8	2,36	83,65	9,74	0,53	100,00	42,89
#30	0,6	36,28	3,57	0,44	100,00	18,99
#50	0,3	25,87	3,16	0,42	100,00	14,05
#100	0,15	15,34	2,64	0,38	100,00	9,02
#200	0,075	9,87	2,13	0,34	99,86	6,33

Tabel 4. Spesifikasi Bina Marga untuk gradasi

No saringan	Ukuran Saringan (mm)	Spesifikasi	
		min	maks
1"	25	100	100
3/4"	19	100	100
1/2"	12,7	90	100
3/8"	9,5	77	90
#4	4,75	53	69
#8	2,36	33	53
#16	1,18	21	40
#30	0,6	14	30
#50	0,3	9	22
#100	0,15	6	15



Gambar 1. Pembagian butiran

Combined grading diberikan grafik warna merah pada Gambar 1, sedangkan grafik warna hitam merupakan spesifikasi yang tercantum dalam peraturan teknis Bina Marga 2018 sesuai pada Tabel 4. Berdasarkan Gambar tersebut bahwa secara keseluruhan nilai masuk pada spesifikasi. Nilai pada saringan no 200 yang paling mendekati dari spesifikasi tetapi masih masuk dalam rentang dengan selisih terhadap nilai minimum 0,33. Nilai yang lain sebagai salah satu contoh pada agregat kasar dimana nomor saringan 3/8” diperoleh nilai 82,19, sedangkan spesifikasi adalah 77 – 90 dan pada agregat halus dengan nomor saringan #8 hasil gradasi adalah 42,89 masuk pada spesifikasi 33 – 53, bisa diambil kesimpulan bahwa formula yang dipilih sudah sesuai dengan spesifikasi.

Pembuatan benda uji pertama

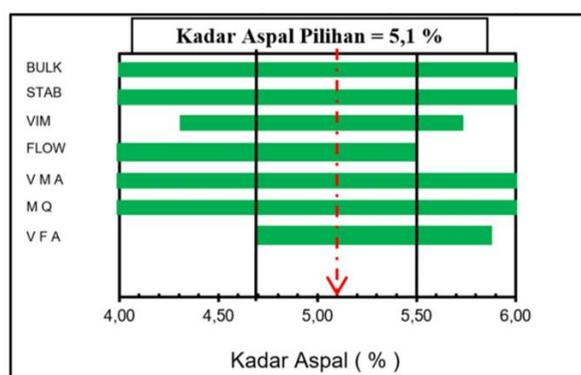
Tabel 5. Komposisi campuran aspal

Nama	A	B	C	D	E
Berat benda uji	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0
Kadar aspal	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3
Berat aspal	51,9	57,9	63,9	69,9	75,9
Filler	10	10	10	10	10
Agregat	1138,1	1132,1	1126,1	1120,1	1114,1

Dengan berdasarkan komposisi pada Tabel 5 tersebut selanjutnya adalah pembuatan benda uji. Tahapan garis besar pembuatan benda uji yang dilaboratorium adalah sebagai berikut : Persiapan material sesuai dengan komposisi dan persiapan alat yang akan digunakan. Sesuai SNI 06-2489-1991, pemanasan agregat sampai pada suhu $\pm 140^{\circ} - 150^{\circ} C$ dan pemanasan aspal pen 60/70 sampai suhu kurang lebih sama dengan agregat. Setelah suhu tercapai dilanjutkan pencampuran aspal dengan agregat sampai suhu stabil dengan panas antara $150^{\circ} - 165^{\circ}C$ dan dipastikan agregat dan aspal tercampur sempurna,. Campuran kemudian di tuangkan cetakan atau *mold*. Memastikan agar campuran tidak memiliki resiko rongga yang besar dalam prosesnya dengan ditusuk – tusuk bagian tengah dan pinggir. Proses berikutnya *mold* dimasukkan dalam compactor untuk dilakukan penumbukan sebanyak dengan 75 kali tumbukan pada satu sisi benda uji dan diulang pada sisi sebaliknya dengan tumbukan yang sama. Jumlah tumbukan berdasarkan SNI yang digunakan untuk lalu lintas berat. Setelah penumbukan selesai kemudian *mold* di lepas dr comoactor untuk ditunggu sampai dingin sebelum dipindahkan ke *ekstruder* untuk mengeluarkan benda uji.

Pengujian marshall

Pengujian *marshall* dilakukan setelah proses pendinginan dan perendaman dalam *waterbath* dengan suhu $\pm 60^{\circ} C$ selama kurang lebih 30 menit. Salah satu hasil diuraikan untuk benda uji dengan kadar aspal 5,3% yang memiliki berat jenis 2,429, nilai VIM diperoleh dengan dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan $VIM (\%) = \frac{2,429 - 2,321}{2,429} \times 100 = 4,43 \%$.



Gambar 2. Penentuan nilai KAO

Dengan sampel 5 benda uji diperoleh hasil rata – rata adalah 4,57% dimana spesifikasi dengan batas bawah 3% dan batas atas 5%. Nilai VMA dan VFA yang masing – masing dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut : $VMA (\%) = 100 - \frac{2,321 \times 94,7}{2,607} = 15,69$ dan nilai $VFA (\%) = \frac{15,69 - 4,43}{15,69} \times 100 = 71,76$. Rata – rata dari perhitungan keseluruhan dengan penggunaan kadar aspal 5,3% diperoleh VMA sebesar 15,85% dan VFA sebesar 71,09% yang secara spesifikasi harus memenuhi persyaratan minimal 15% dan 61%. Perhitungan keseluruhan 5 benda uji di tunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian

No	% kadar aspal	BJ maks camp	berat benda uji			BJ Bulk Camp.	% VIM	% VMA	% VFA	Kadar Aspal Efektif	stabilitas		Flow	
			di udara	di air	SSD						isi	bacaan jarum		beban (Kg)
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	4,30	2,464	1188,6	699,6	1197,3	497,7	2,388	3,08	12,34	75,05	101	1101,26	3,20	
2			1187,5	668,4	1191,5	523,1	2,270	7,87	16,67	52,80	96	1141,55	3,00	
3			1180,1	685,8	1184,1	498,3	2,368	3,89	13,07	70,26	104	1128,12	3,10	
							2,342	4,94	14,03	66,04	4,01	1123,64	3,10	
1	4,80	2,446	1183,7	679,4	1187,8	508,4	2,328	4,82	14,98	67,82	96	1154,98	3,20	
2			1187,4	680,4	1191,4	511,0	2,324	5,01	15,15	66,94	93	1007,25	3,40	
3			1186,6	680,6	1191,9	511,3	2,321	5,13	15,26	66,38	90	980,39	3,70	
							2,324	4,99	15,13	67,05	4,51	1047,54	3,43	
1	5,30	2,429	1185,4	677,8	1188,2	510,4	2,322	4,37	15,64	72,04	90	993,82	3,60	
2			1187,7	678,4	1190,1	511,7	2,321	4,43	15,69	71,76	89	993,82	3,60	
3			1186,7	676,5	1190,4	513,9	2,309	4,92	16,12	69,49	86	1007,25	3,50	
							2,318	4,57	15,82	71,10	5,01	998,30	3,57	
1	5,80	2,411	1187,6	674,9	1189,9	515,0	2,306	4,37	16,68	73,80	86	1007,25	3,50	
2			1185,5	670,7	1189,3	518,6	2,286	5,20	17,41	70,11	80	980,39	3,70	
3			1190,3	681,3	1191,9	510,6	2,331	3,33	15,77	78,91	84	966,96	3,80	
							2,308	4,30	16,62	74,27	5,52	984,87	3,67	
1	6,30	2,394	1190,2	672,7	1193,2	520,5	2,287	4,50	17,82	74,76	82	980,39	3,70	
2			1193,8	677,5	1195,1	517,6	2,306	3,67	17,11	78,53	79	980,39	3,70	
3			1192,2	673,0	1195,4	522,4	2,282	4,69	17,98	73,94	85	953,53	3,90	
							2,292	4,29	17,64	75,74	6,02	971,44	3,77	
BATASAN														
							3,0 -	5,0	min	min		min	2,0 -	
												800	4,0	

Tabel 7. Hasil Marshall penambahan PET

No	P E T	% kadar aspal	BJ maks camp	berat benda uji			SSD isi	BJ. Bulk Camp.	% VIM	% VMA	% VFA	Kadar Aspal Efektif	stabilitas beban			Flow
				udara	di air	dalam							jarum	M	N	
A	1 2 3	B 5,10	C 2,436	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
	1	5,10	2,436	1188,6	699,6	1197,3	497,7	2,388	1,95	13,07	85,08		101	1356,43	2,60	
	2	5,10	2,436	1187,5	668,4	1191,5	523,1	2,270	6,80	17,37	60,87		96	1289,28	3,30	
	3	5,10	2,436	1180,1	685,8	1184,1	498,3	2,368	2,77	13,80	79,94		104	1396,72	3,00	
	1	5,10	2,436	1183,7	679,4	1187,8	508,4	2,328	3,84	14,75	75,29	4,81	96	1347,48	2,97	
	2	5,10	2,436	1187,4	680,4	1191,4	511,0	2,324	4,41	15,25	71,09		93	1289,28	3,00	
	3	5,10	2,436	1186,6	680,6	1191,9	511,3	2,321	4,60	15,42	70,18		90	1248,99	3,20	
	1	5,10	2,436	1185,4	677,8	1188,2	510,4	2,324	4,72	15,53	69,61		90	1208,70	3,40	
	2	5,10	2,436	1187,7	678,4	1190,1	511,7	2,321	4,58	15,40	70,29	4,81	90	1248,99	3,20	
	3	5,10	2,436	1186,7	676,5	1190,4	513,9	2,309	4,65	15,46	69,95		89	1208,70	3,90	
	1	5,10	2,436	1187,6	674,9	1189,9	515,0	2,306	4,70	15,51	69,67		86	1154,98	4,40	
	2	5,10	2,436	1185,5	670,7	1189,3	518,6	2,286	5,19	15,95	67,44		86	1186,32	4,17	
	3	5,10	2,436	1190,3	681,3	1191,9	510,6	2,331	5,32	16,06	66,86		86	1154,98	4,30	
	1	5,10	2,436	1190,2	672,7	1193,2	520,5	2,287	6,15	16,79	63,39		80	1074,40	4,80	
	2	5,10	2,436	1193,8	677,5	1195,1	517,6	2,306	4,29	15,15	71,67		84	1128,12	4,60	
	3	5,10	2,436	1192,2	673,0	1195,4	522,4	2,282	5,25	16,00	67,31	4,81	82	1119,17	4,57	
								2,292	6,12	16,77	63,51		82	1101,26	4,30	
									5,31	16,05	66,93		79	1060,97	5,00	
									6,30	16,93	62,77		85	1141,55	4,50	
									5,91	16,58	64,40	4,81		1101,26	4,60	
									3,0 - 5,0	min 15	min 65			min 800	2,0 - 4,0	

BATASAN

Setelah diperoleh nilai keseluruhan karakteristik marshall dilanjutkan tahapan berikutnya adalah penentuan kadar aspal optimal (KAO). Nilai KAO diperoleh dari plotting hasil seluruh karakteristik yang ada pada Tabel 6 ke dalam Gambar 2, nilai tersebut berat jenis, stabilitas, VIM, flow, VMA VFA dan MQ. Penentuan KAO dimulai dengan melihat keseluruhan karakteristik yang memiliki nilai rentang sama dijadikan sebagai batasan awal dan akhir pada Gambar 5, selanjutnya mencari nilai tengah dari batasan tersebut dan diperoleh nilai 5,1%. Nilai tersebut yang akan dijadikan persentase kadar aspal pada benda uji 2 yang bisa diartikan bahwa pada penelitian ini kadar aspal terbaik untuk campuran berdasarkan karakteristik adalah sebesar 5,1%.

Pembuatan benda uji kedua dan pengujian *marshall*

Pembuatan benda uji kedua dengan tahapan yang sama dengan benda uji pertama, yang membedakan adalah pada benda uji kedua kadar aspal menggunakan 5,1% hasil dari KAO dan penambahan limbah plastik PET pada aspal dengan persentase 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari total KAO. Setelah proses pembuatan benda uji kedua selesai kemudian dilakukan uji tes marshall dengan tahapan yang sama pada uji sebelumnya. Hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7. Berdasarkan Tabel 7 yang merupakan hasil pengujian marshall dengan adanya tambahan limbah plastik PET diperoleh nilai rata – rata VIM antara 3 – 6 yang mana spesifikasi pada peraturan mengharuskan nilai tersebut masuk pada rentang 3 – 5%, sehingga dari nilai tersebut diperoleh hasil bahwa pada penambahan limbah PET sampai 6% masih memenuhi spesifikasi, sedangkan penambahan > 6% sudah tidak memenuhi. Nilai VMA rata – rata dengan minimal 15% memenuhi jika penambahan kadar PET dimulai dari 6%. Sedangkan nilai rata – VFA untuk penambahan di atas 6% tidak memenuhi. Pengujian stabilitas yang dilakukan menghasilkan nilai rata – rata minimal 1101,26 yang jika didasarkan pada batasan minimal semua memenuhi, sedangkan pada nilai flow yang memiliki batasan 2 -4 untuk rata – rata flow yang terpenuhi hanya pada penambahan limbah plastik PET kadar 2% dan 4%.

4. KESIMPULAN

Penambahan limbah plastik PET pada campuran AC-WC dengan persentase 2% sampai maksimal 10% diperoleh bahwa penambahan limbah PET paling optimal sebesar 4%. Hasil dari pengujian dengan kadar penambahan PET 4% pada aspal diperoleh nilai VIM 4,58 dengan VMA 15,40 dan VFA 70,29. Sedangkan nilai stabilitas sebesar 1248,99 dan flow 3,2, yang mana dari seluruh hasil sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018. Saran untuk penelitian selanjutnya bisa menggunakan limbah plastik yang lainnya yang sampai saat ini mendominasi sebagai sampah yang belum banyak dimanfaatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2008). Metode uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus (SNI 1970:2008). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar (ASTM C 136-06, IDT) (SNI ASTM C136:2012). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (1991). Metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall (SNI 06-2489-1991). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- 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*, 11(3), 669-679. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v11i3.7507>
- Khadafi, M., & Fadly, I. (2023). Studi penggunaan plastik HDPE (High Density Polyethylene) pada campuran aspal sebagai bahan pengikat konstruksi jalan. *Jurnal Karajata Engineering*, 3(2), 102-106.
- Utomo, L. W., & Arfiana, S. (2023). Pemanfaatan limbah plastik daur ulang dari polietilen tereftalat (PET) sebagai bahan tambahan dalam pembuatan nanokomposit, semen mortar, dan aspal. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(1), 164-179.
- Rahmawati, A. (2015). Pengaruh penggunaan Plastik Polyethylene (PE) dan High Density Polyethylene (HDPE) pada campuran Lataston-WC terhadap karakteristik Marshall. *Semesta Teknika*, 18(2), 147-159.. <https://journal.umy.ac.id/index.php/st/article/view/1816/1820>
- Simangunsong, J.E. (2021). Pemanfaatan limbah plastik pet sebagai bahan tambah aspal pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 5(2), 26-33.. <http://dx.doi.org/10.30872/ts.v5i2.6983>