



PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK DENGAN TEKNOLOGI DAUR ULANG PADA HOT ROLLED ASPHALT
DITINJAU DARI ASPEK *PROPERTIES MARSHALL*, NILAI KETIDAKRATAAN, DAN DURABILITAS

Agus Riyanto^{1*}, Yan Pramesti²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A.Yani, Tromol Pos 1 Pabelan, Kartasura, Surakarta, Indonesia, Kode Pos 57102

*Email: ar242@ums.ac.id

Diajukan:14/04/2022 Direvisi: 25/07/2022 Diterima:28/07/2022

Abstrak

Hot Rolled Asphalt (HRA) merupakan campuran aspal – agregat bergradasi senjang yang memiliki workabilitas tinggi sehingga mudah dalam pengerjaannya. Penelitian ini menggunakan aditif limbah plastik jenis PET (Polietilena Tereftalat) sebagai aditif. Tujuan penelitian ini untuk mencari nilai KPO (Kadar Plastik Optimal), Properties Marshall, Nilai Ketidakrataan, dan Durabilitas campuran. Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer merupakan hasil dari pengujian ekstraksi, aspal, dan agregat oleh peneliti, sedangkan data sekunder didapatkan dari BPPJN VII, 2020. Membuat benda uji dengan kadar aspal 7%, 8%, dan 9% masing-masing 2 sampel untuk mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Dilanjutkan membuat benda uji dengan penambahan limbah plastik dengan kadar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap nilai KAO masing-masing 2 sampel untuk mencari nilai Kadar Plastik Optimum (KPO). Dilakukan pengujian volumetric, uji Marshall test untuk mendapatkan nilai KPO, dilanjutkan membuat benda uji untuk mencari nilai ketidakrataan dan durabilitas campuran. Hasil penelitian dengan penambahan limbah plastik pada campuran didapatkan KPO sebesar 4,7% dengan Stabilitas 2133,67 kg, flow 3,67 mm, VFWA 83,48 %, VMA 21,13 %, VIM 3,49 %, dan MQ 499,76 kg/mm. Didapatkan nilai ketidakrataan sebesar 1,692 m/km sehingga menurut indikator kondisi perkerasan jalan benda uji termasuk dalam kondisi baik. Penambahan limbah plastik meningkatkan nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sebesar 91,60% dengan spesifikasi IKS yaitu 80% dari nilai stabilitas normal sehingga campuran dinyatakan durabel. Hasil penelitian ini, campuran HRA dengan penambahan limbah plastik dapat meningkatkan kekuatan dan mengurangi nilai ketidakrataan pada lapis perkerasan, serta mengurangi jumlah limbah plastik yang ada di Indonesia.

Kata kunci : Durabilitas, HRA, Ketidakrataan, Limbah Plastik PET, Properties Marshall

Abstract

Asphalt that has been aggregated with gap grades and has a high degree of workability is known as hot rolled asphalt (HRA). PET (Polyethylene Terephthalate) waste plastic is used as an additive in this study because it has hard qualities, is deformation-resistant, and has a composition that is compatible with asphalt. Finding the values of KPO (Optimal Plastic Content), Marshall Properties, Roughness Value, and Durability of The Mixture were the goals of this study. Both primary and secondary data were employed in the investigation. Researchers' testing of aggregate, asphalt, and extraction yields primary data, whereas BPPJN VII, 2020 provides secondary data. Next, create test items with 2 samples of each having an asphalt content of 7%, 8%, and 9%. Based on the results of the study by adding plastic waste to the mixture, it was found that KPO was 4.7% with Stability 2133.67 kg, flow 3.67 mm, VFWA 83.48%, VMA 21.13%, VIM 3.49%, and MQ 499,76 kg/mm. The roughness value of 1.692 m/km was obtained, so that according to the road pavement condition indicators, the test object was in good condition. The addition of plastic waste increases the value of the Residual Strength Index (RSI) by 91.60% with an RSI specification of 80% of the normal stability value so that the mixture is declared durable. With the results of this study, a mixture of HRA with the addition of plastic waste can increase the strength and reduce the roughness of the pavement layer, as well as reduce the amount of plastic waste in Indonesia.

Key words : Durability, HRA, Marshall Properties, PET Plastic Waste, Roughness

1. PENDAHULUAN

Musthofa (2019) menjelaskan bahwa jalan merupakan suatu prasarana perhubungan darat yang digunakan untuk lalu lintas baik angkutan orang ataupun barang menuju tujuan tertentu. Salah satu upaya memperbaiki kerusakan jalan adalah dengan memanfaatkan / menggunakan teknologi daur ulang dan menambahkan bahan aditif terhadap material bekas lapis perkerasan atas yang ada (jalan lama). Lapis permukaan perkerasan jalan lama akan diolah kembali (didaur ulang) sebagai campuran yang baru dengan menambahkan limbah plastik sebagai bahan aditif. Menurut Suhardi, dkk (2016), *PET* adalah suatu resin polimer plastik termoplast dari kelompok poliester dan banyak diproduksi dalam industri kimia dan digunakan dalam serat sintesis, botol, minuman dan wadah makanan, aplikasi *thermo forming* dan dikombinasikan dengan serat kaca dalam resin teknik, rumus kimianya $(C_{10}H_8O_3)_n$ dibuat dari glikol (EG) dan *terephthalic acid* (TPA) atau dimethyl ester atau asam perephthalat (DMT). *PET* memiliki daya serap yang rendah terhadap air ataupun uap air. Hampir 52% dari limbah plastik dalam bentuk kemasan berakhir di sungai (Lapian, dkk. 2019)

Penelitian ini menggunakan campuran *Hot Rolled Asphalt (HRA)*. *HRA* adalah Campuran panas aspal – agregat bergradasi senjang, memiliki sifat tahan terhadap keausan, perubahan cuaca, serta lebih lentur (fleksibel), sehingga tidak akan mengalami *fatigue cracking*. Selain itu campuran *HRA* ini memiliki workabilitas yang tinggi, sehingga mudah dalam pengerjaannya. Jumlah fraksi agregat halus dan bahan tambah adalah salah satu kunci kekuatan campuran *HRA*. *HRA* memiliki perbedaan sifat dengan Beton Aspal atau *Asphalt Concrete (AC)*. Dalam beton aspal lebih mengandalkan karakter agregat kasar untuk saling mengunci (*interlocking*) butiran, sedangkan *HRA* lebih mengandalkan kekuatan ikatan antara aspal, agregat halus, dan *filler*. Menurut Perkasa (2012), berikut ini merupakan sifat-sifat umum *HRA* yaitu :

1. Memiliki tingkat keawetan tinggi
2. Lebih ekonomis

3. Tahan terhadap oksidasi
4. Fleksibel (lentur)
5. Tahan terhadap temperatur tinggi
6. Kedap air.

Teknologi daur ulang adalah proses mengubah bahan bekas menjadi bahan yang dapat dipergunakan kembali (seolah baru), daur ulang bertujuan mengolah material lama (sudah terpakai) menjadi sesuatu yang berguna. Salah satu teknologi daur ulang adalah implementasi menggunakan material daur ulang perkerasan lamarkerasan jalan lama akan digali dan dihancurkan, setelah itu diekstraksi untuk mengetahui kadar aspal yang digunakan. Selain itu, agregat yang masih bagus dari hasil ekstraksi juga akan digunakan kembali sepanjang masih memungkinkan dan memenuhi spesifikasi teknik dengan melalui perancangan ulang (penelitian).

Penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai KPO dalam campuran *HRA*, serta menganalisis nilai KPO ditinjau dari nilai *Properties Marshall*, Ketidakrataan, dan Durabilitas. Pada penelitian ini penulis menggunakan variasi bahan tambah limbah plastik terhadap KPO : 0%, 2%, 4%, dan 6%. Penggunaan bahan tambah yang bervariasi ini diharapkan dapat meningkatkan nilai *Properties Marshall* secara optimum, meningkatkan kekuatan lapisan perkerasan, mengurangi nilai ketidakrataan pada permukaan lapis perkerasan, serta memanfaatkan dan mengurangi jumlah limbah plastik yang ada.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di Laboraturium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta dengan metode eksperimen. Penelitian ini membuat masing-masing 2 benda uji per kadar aspal untuk mencari KAO, masing-masing 2 benda uji per kadar limbah plastik untuk mencari KPO dan membuat 2 benda uji berdasarkan nilai KPO untuk pengujian ketidakrataan dan durabilitas.

Data sekunder dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer adalah data dari hasil pemeriksaan material daur ulang dan hasil pemeriksaan aspal. Hasil

pemeriksaan material daur ulang meliputi ekstraksi, pemeriksaan agregat kasar, dan pemeriksaan agregat halus. Sedangkan hasil pemeriksaan aspal meliputi penetasi, daktilitas, berat jenis, titik lembek, titik nyala dan titik bakar. Data primer harus sesuai dengan spesifikasi sehingga selanjutnya dapat dilanjutkan dengan Langkah selanjutnya yaitu blending agregat.

Di sisi lain data sekunder meliputi hasil pemeriksaan agregat sesuai standar BBPJK VII dan hasil pemeriksaan aspal sesuai standar BBPJK VII. Hasil pemeriksaan agregat meliputi berat jenis, penyerapan, keausan, kelekatan agregat terhadap aspal, gradasi, analisa saringan.

Setelah menempuh proses blending agregat untuk kedua data tersebut, maka dapat diidentifikasi presentase CA dan FA. Langkah selanjutnya yaitu penentuan kadar aspal optimum. Untuk mendapatkan kadar aspa optimum pembuatan benda uji berdasarkan variasi kadar aspal (7%, 8%,9%). Dilanjutkan dengan pengujian Marshall dan Volumetric.

Tahapan selanjutnya adalah uji penentuan kadar plastik optimum, dimana tahapan tersebut terdiri atas pembuatan benda uji dengan variasi kadar air limbah pplastik (0%, 2%, 4% dan 6%), pengujian Marshall dan Volumetric. Tahapan tersebut diakhir dengan analisis kadar plastik optimum.

Langkah selanjutnya yaitu pembuatan benda uji yang sesuai dengan nilai KPO, maksudnya benda uji tersebut harus melalui uji ketidakrataan dan uji Marshall Immersion. Benda uji juga harus memenuhi sifat-sifat *HRA* (Tabel 1)

Tabel 1. Ketentuan sifat-sifat *HRA* (Lataston) (RSNI 03-1737-1989)

Sifat-sifat Campuran	Lataston	
	WC	Base
Jumlah tumbukan per bidang		75
Penyerapan aspal, %	maks.	1,7
Rongga dalam campuran (VIM), %	min.	3,0
	maks.	6,0

Rongga dalam agregat (VMA), %	min.	18	17
Rongga terisi aspal (VFWA), %	min.	68	
Stabilitas, kg	min.	800	
Pelelehan (<i>flow</i>), mm	min.	3	
Marshall quotient, kg/mm	min.	250	
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C pada VIM ±7%	min.	80	

Sand Patch Method merupakan metode yang digunakan untuk mengukur ketidakrataan suatu permukaan dengan menggunakan pasir yang memiliki gradasi seragam. Hasil pengujian *Sand Patch Method* ini dinamakan MTD (*Mean Texture Depth*) dengan satuan mm. *Mean Texture Depth* dihitung menggunakan Rumus 1 sebagai berikut.

$$MTD = \frac{4 \times V \times 1000}{\pi \times D^2} \tag{1}$$

dengan:

MTD = *Mean Texture Depth* (mm)

V = Volume pasir (cm³)

D = Diameter *sand patch*

Hasil *MTD* dikali dengan 1 km dibagi dengan diameter *sand patch* untuk diekivalikan ke nilai *IRI*. Berikut adalah indikator kualitas perkerasan jalan berdasarkan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Indikator Kualitas Perkerasan Jalan

No	Nilai <i>IRI</i> (m/km)	Kualitas Perkerasan
1	<4	Baik
2	4 – 8	Sedang
3	8 – 12	Rusak Ringan
4	>12	Rusak Berat

Untuk pengujian durabilitas menggunakan metode *Marshall Immersion*. *Marshall Immersion* merupakan pengujian dengan melakukan perendaman pada benda uji untuk mengetahui durabilitas pada campuran beraspal. Dari pengujian ini akan mendapatkan Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Untuk mendapatkan Indeks Kekuatan Sisa diperlukan dua kelompok benda uji. Kelompok pertama diuji stabilitas marshallnya dengan perendaman dalam air suhu 60°C selama

waktu T_1 dan kelompok kedua diuji dengan suhu yang sama selama T_2 (Wahjoedi, 2009). Kemudian ditentukan IKS Marshall dengan menggunakan Rumus 2 sebagai berikut:

$$IKS = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \tag{2}$$

dengan :

S_1 = nilai rata-rata stabilitas Marshall setelah perendaman selama T_1 menit (kg)

S_2 = nilai rata-rata stabilitas Marshall setelah perendaman selama T_2 menit (kg)

IKS = Indeks Kekuatan Sisa (%)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pemeriksaan Rekayasa *Blending* Agregat

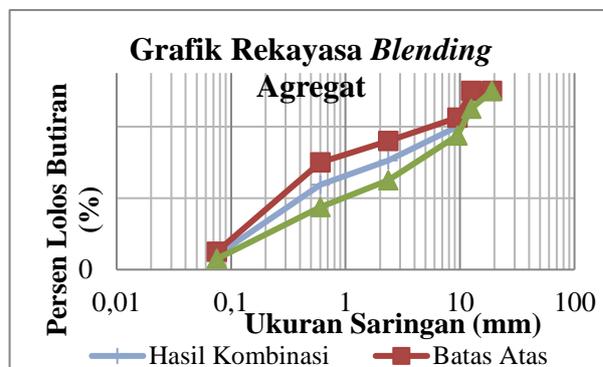
Pemeriksaan material ini bertujuan untuk mengetahui kualitas material yang akan digunakan. Campuran *HRA* yang digunakan ini memiliki gradasi senjang (*gap graded*). Penelitian ini menggunakan agregat baru sebagai data sekunder dan agregat daur ulang sebagai data primer. Untuk data sekunder sudah memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Hasil data primer setiap pengujian memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina marga Divisi 6 tahun 2018, sehingga material dapat digunakan. Apabila material tidak memenuhi spesifikasi, akan dilakukan rekayasa *blending* dengan penggabungan 2 fraksi yaitu *CA* dan *FA*. Penggabungan beberapa fraksi ini menggunakan cara *trial and error*.

Tabel 3. Hasil rekayasa *blending* gradasi agregat daur ulang (20 %) dan agregat baru (80 %)

Ukuran saringan mm	ASTM (inch)	Persen lolos				Persen Tertahan			
		Batas Atas	Batas Tengah	Batas Bawah	Lolos kumulatif	Lolos	Berat Total	Berat agregat daur ulang (20%)	Berat Agregat baru
		%	%	%	%	gr	gr	gr	
19	3/4	100	100	100	0	0	0	0	
12.5	1/2	1000	95	90	5	5	60	12	
9.5	3/8	85	80	75	20	15	180	36	
2.36	8	72	61	50	39	19	336	45.6	
0.6	30	60	47.5	35	52.5	13.5	162	32.4	
0.075	200	10	8	6	92	39.5	474	94.8	
pan		0	0	0	100	8	96	19.2	
Total						100	960	240	

Hasil pengujian analisa saringan akan digunakan untuk menentukan proporsi Kadar Aspal Optimum yang akan digunakan. Berikut ini hasil analisa saringan penggabungan fraksi agregat secara kuantitatif dapat dilihat pada Tabel 3 dan

Gambar 2 tentang batasan selimut spesifikasi agregat batas atas dan batas bawah selimut (secara grafis).



Gambar 2. Rekayasa *Blending* Agregat

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 2 material dapat digunakan dikarenakan hasil rekayasa *blending* agregat sudah sesuai dengan batas tengah gradasi yang ditentukan pada Spesifikasi Umum Bina Marga.

3.2. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Kadar Aspal Optimum digunakan untuk menentukan jumlah kadar aspal yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji. Proporsi agregat yang digunakan merupakan hasil rekayasa *blending* agregat *fresh* dan material daur ulang. Untuk variasi kadar yang digunakan yaitu 7%, 8%, dan 9% dari total campuran yaitu 1200 gram.

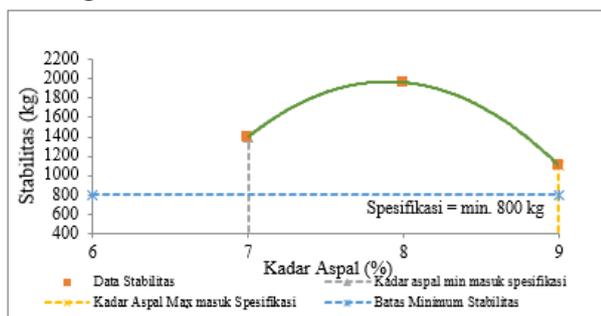
Tabel 4. Hasil pengujian Marshall untuk penentuan Kadar Aspal Optimum

Kadar Aspal %	Benda Uji -	Propertis Marshall					
		VIM %	VMA %	VFWA %	Stabilitas kg	Flow mm	MQ kg/mm
7	1	9.64	23.64	59.47	844.36	2.7	331.12
	2	10.24	24.15	57.6	1951.84	2.01	1006.1
	rata-rata	9.94	23.89	58.58	1398.1	2.25	668.61
8	1	6.52	22.71	71.3	1788.67	3.64	491.39
	2	2.73	19.58	86.05	2138.67	2.6	822.57
	rata-rata	4.26	21.15	78.67	1963.67	3.12	656.98
9	1	7.46	25.11	70.3	1120.32	3.8	294.82
	2	6.31	24.18	73.2	1083	3.8	285
	rata-rata	3-6	24.64	72.11	1101.66	3.8	289.91
Spesifikasi			≥ 18	≥ 68	≥ 800	≥ 3	≥ 250

Setelah menentukan jumlah proporsi fraksi dalam campuran yang akan digunakan, selanjutnya membuat benda uji yang kemudian diuji *Marshall* dan Volumetrik. Data hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran. Berikut ini merupakan data Hasil

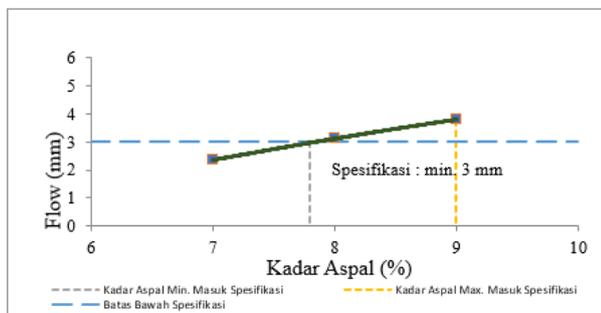
Analisa perhitungan *Properties Marshall* yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4 nilai *flow*, VFWA pada kadar 7% terbilang cukup rendah, sehingga tidak memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan, sedangkan untuk nilai VIM pada kadar aspal 7% dan 9% melebihi batasan spesifikasi maksimal yang dipersyaratkan 6%. Grafik hubungan kadar aspal dengan stabilitas dapat dilihat pada Gambar 3 sebagai berikut.

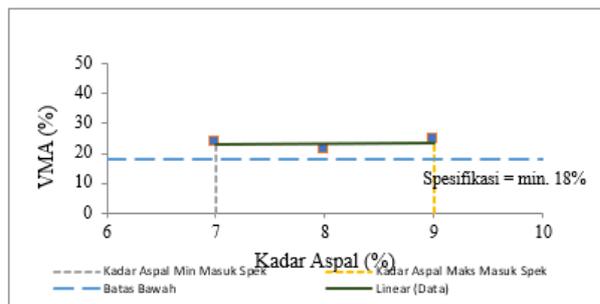


Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas

Berdasarkan pada Gambar 3 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 9%. Grafik hubungan kadar aspal dengan *flow* dapat dilihat pada Gambar 4 sebagai berikut. Berdasarkan pada Gambar 4 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7,8% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 9%. Grafik hubungan kadar aspal dengan *VMA* dapat dilihat pada Gambar 5 sebagai berikut.

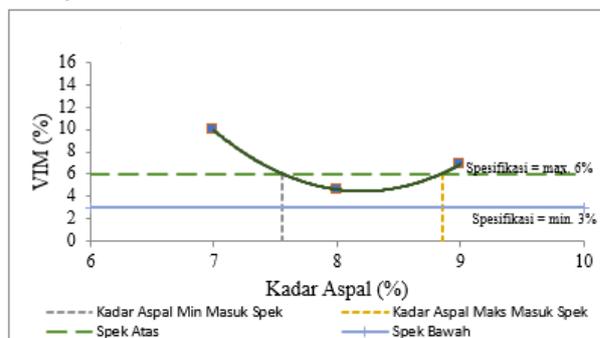


Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan *Flow*



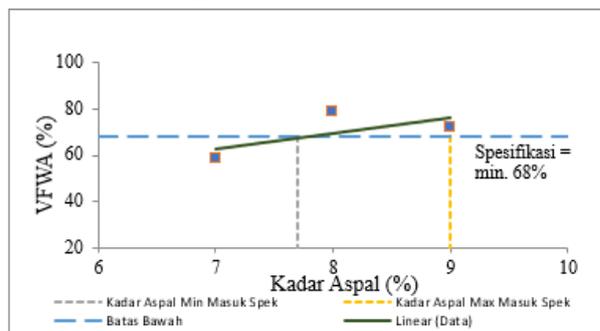
Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan *VMA*

Berdasarkan pada Gambar 5 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 9%. Grafik hubungan kadar aspal dengan *VIM* dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut.



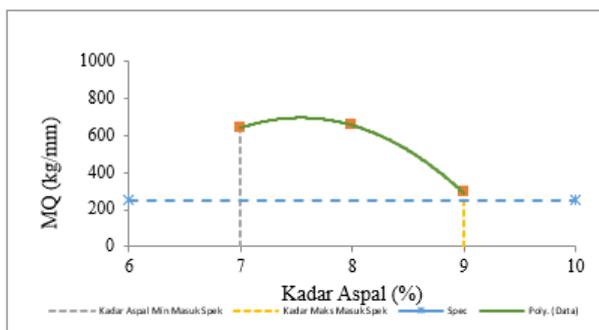
Gambar 6. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan *VIM*

Berdasarkan pada Gambar 6 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7,55% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 8,85%. Grafik hubungan kadar aspal dengan *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut.



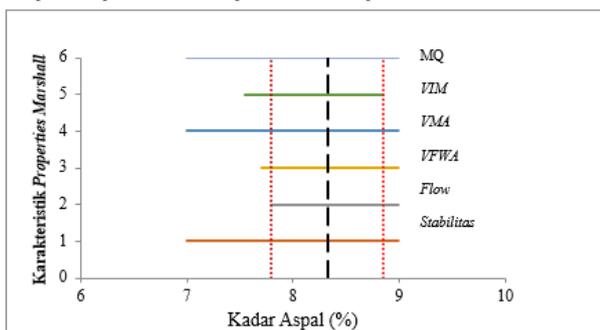
Gambar 7. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan *VFWA*

Berdasarkan pada Gambar 7 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7,7% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 9%. Grafik hubungan kadar aspal dengan MQ dapat dilihat pada Gambar 8 sebagai berikut.



Gambar 8. Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan MQ

Berdasarkan pada Gambar 8 kadar aspal minimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 7% dan kadar aspal maksimum yang memasuki batas spesifikasi yaitu 9%. Hasil data pengujian tersebut disesuaikan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga yang akan digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum. Setelah dilakukan analisis dan mendapatkan nilai *Properties Marshall*, maka nilai Kadar Aspal Optimum dapat ditentukan. Penentuan nilai Kadar Aspal Optimum dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan Gambar 9 didapatkan nilai kadar aspal minimum sebesar 7,8 % dan kadar aspal maksimum sebesar 8,85 %, sehingga didapatkan nilai KAO sebagai berikut:

$$KAO = \frac{(Kadar\ Aspal\ Minimum + Kadar\ Aspal\ Maksimum)}{2}$$

$$= \frac{(7,8 + 8,85)}{2} = 8,3 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai KAO sebesar 8,3%. Maka dari itu, pada penelitian ini benda uji akan diberi bahan aditif yang diharapkan dapat memperbaiki nilai *flow* serta meningkatkan nilai stabilitas benda uji.

3.3. Pembuatan Benda Uji dengan Bahan Aditif

Pada pengujian ini, aspal untuk benda uji akan diberi bahan aditif berupa limbah plastik. Kadar plastik yang digunakan yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6%. Untuk masing-masing kadar plastik dibuat 2 sampel. Prosentase jumlah agregat yang digunakan tetap sama. Kadar aspal yang digunakan untuk membuat campuran yaitu 8,3% dari jumlah total campuran atau dalam satuan berat 87,78 gram. Berikut ini merupakan variasi berat bahan aditif setiap kadar yang akan digunakan sebagai berikut:

- Berat Bahan Aditif Variasi 0% = 0 gram
- Berat Bahan Aditif Variasi 2% = 1,99 gram
- Berat Bahan Aditif Variasi 4% = 3,97 gram
- Berat Bahan Aditif Variasi 6% = 5,96 gram

3.4. Analisis *Properties Marshall*

Properties Marshall merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan kinerja campuran agregat - aspal. Hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain Stabilitas, *Flow*, *VIM*, *VFWA*, *VMA*, dan *Marshall Quotient*. Pengujian *Marshall* dilakukan pada campuran yang telah diberi bahan aditif limbah plastik PET. Berikut ini merupakan data Hasil Analisa perhitungan *Properties Marshall* untuk penentuan KPO yang dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan hasil perhitungan analisis pada Tabel 5 didapatkan hasil: setelah ditambahkan bahan aditif plastik PET, nilai *flow* dan *VIM* menjadi semakin menurun (semakin lebih baik / memenuhi spesifikasi). Penambahan aditif mampu menurunkan nilai *VIM* secara perlahan yang artinya rongga udara di dalam campuran HRA semakin rendah, artinya aditif plastik bersama komponen aspal mampu meningkatkan peran aspal dalam mengisi celah (rongga udara) di dalam campuran, sekaligus aditif plastik dapat

membraur homogen dengan komponen aspal secara merata pada temperatur panas (*mixing*) dan saat pemadatan HRA, sehingga kondisi ini (aspek temperatur dan pemadatan) mampu meningkatkan kemudahan Bergeraknya komponen aspal berdasarkan sifat termoplastis yang baik seiring dengan bertambahnya proporsi kandungan aditif plastik, serta menjadikan kadar *void*nya semakin menurun seiring meningkatnya proporsi kadar aditif plastik.

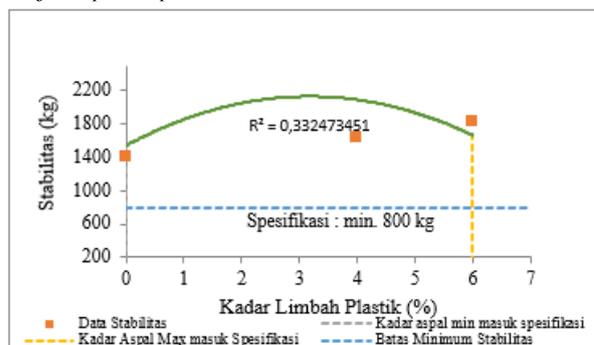
Tabel 5. Tabel rekapitulasi *Properties Marshall* Aspal Plastik

Kadar air	Benda uji	Properties Marshall					
		VIM	VMA	VFWA	Stabilitas	Flow	MQ
%	-	%	%	%	kg	mm	kg/mm
0	1	4.64	21.79	78.69	1381.93	1.42	973.19
	2	4.57	21.73	78.97	1403.13	1.54	911.12
	rata-rata	4.61	21.76	78.83	1392.53	1.48	942.16
2	1	4.51	21.83	79.33	2101.86	1.94	1083.43
	2	4.04	21.44	81.14	2912.15	2.2	1323.7
	rata-rata	4.29	21.64	80.24	2507	2.07	1203.57
4	1	3.38	21.08	83.99	1763.2	3.08	572.47
	2	3.6	21.26	83.08	1516.03	3.55	427.05
	rata-rata	3.49	21.26	83.53	1639.63	3.32	499.76
6	1	3.02	20.98	85.2	2002.1	5.1	392.57
	2	2.87	20.86	86.25	1630.54	3.67	444.29

Selain itu, penambahan bahan aditif plastik juga mampu meningkatkan daya kohesi aspal, hal ini akan berimplikasi pada meningkatnya daya ikatan (kohesi) yang lebih kuat pada material aspal, sehingga keberadaan aspal ini berkontribusi pada meningkatnya nilai stabilitas pada campuran HRA yang makin tinggi, sedang kajian perubahan penambahan aditif plastik terhadap nilai *flow* secara umum menunjukkan penambahan aditif berekses pada perubahan besarnya kelelahan

plastis material campuran dan indikasinya : semakin tinggi proporsi kadar aditif semakin tinggi nilai *flow* campuran, seiring dengan penambahan kadar aditif plastik juga sekaligus mempengaruhi besarnya nilai stabilitas campuran yang semakin lebih tinggi, fenomena ini terjadi karena nilai kohesi aspal yang berubah lebih tinggi akan berimplikasi pada meningkatnya nilai stabilitas material HRA. Untuk nilai *VMA* tidak mengalami banyak perubahan, karena aditif plastik implikasinya hanya pada material aspal (bukan sebagai material *filler*) dan wajar pengaruhnya tidak pada void material agregat campurannya, dengan demikian rongga udara antar agregatnya

(*VMA*) tentunya tidak banyak mengalami perubahan, sedangkan untuk fenomena nilai *VFWA* analisis pengaruhnya aditif tentunya akan berbanding terbalik dengan fenomena kajian yang terjadi pada parameter *VIM*.

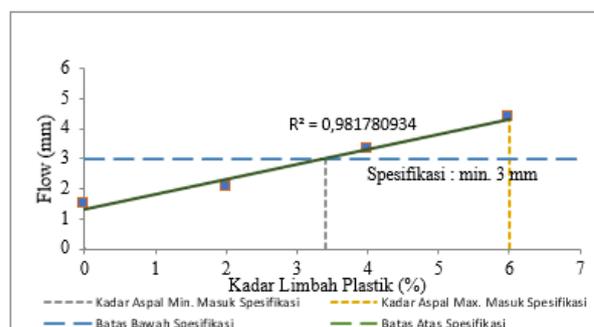


Gambar 10. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan Stabilitas

Untuk perubahan nilai *MQ* analisisnya identik dengan perubahan parameter nilai stabilitas secara umum seiring dengan penambahan kadar aditif akan berkontribusi meningkatnya nilai *MQ*.

Grafik pengaruh penambahan limbah plastik terhadap nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 10.

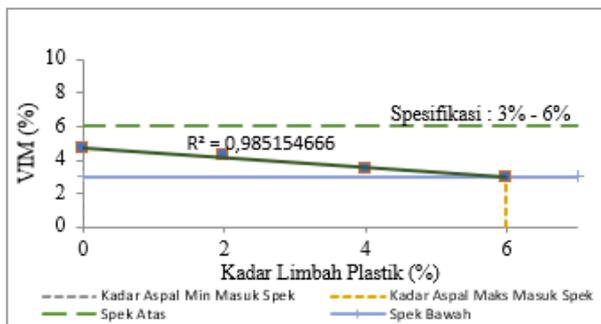
Berdasarkan Gambar 10 kurva grafik berbentuk parabola tertutup memiliki nilai $R^2 = 0,332473451$ yang berarti kadar limbah plastik memiliki pengaruh yang rendah terhadap hasil stabilitas karena hasil nilai determinansi tidak mendekati 1. Titik maksimum pada kadar limbah plastik sebesar 3,17 % dengan nilai stabilitas sebesar 2133,67 kg. Selain itu, seluruh variasi kadar limbah plastik yang digunakan memenuhi spesifikasi stabilitas sebesar 800 kg. Grafik hubungan kadar limbah plastik dengan nilai *flow* dapat dilihat pada Gambar 11.



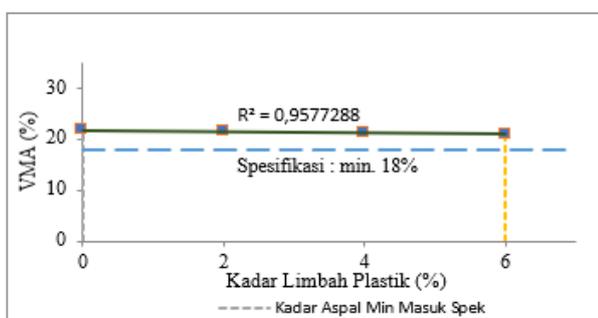
Gambar 11. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan *Flow*

Berdasarkan Gambar 11 grafik hubungan antara kadar limbah plastik dan *flow* membentuk garis linear dengan nilai $R^2 = 0,9812$ yang berarti penambahan limbah plastik memiliki pengaruh kuat terhadap hasil *flow* sebab nilai koef determinansi mendekati 1. Titik maksimum pada kadar limbah plastik 6% didapatkan nilai *flow* sebesar 4,39 mm. Perpotongan garis *trendline* dengan batas spesifikasi 3 mm terjadi pada kadar limbah plastik 3,38 %. Grafik hubungan kadar limbah plastik dengan nilai *VIM* dapat dilihat pada Gambar 12.

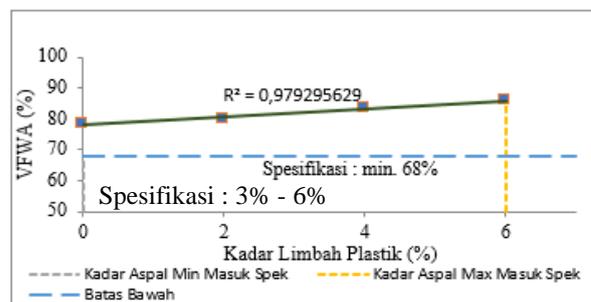
Berdasarkan Gambar 12 grafik hubungan antara kadar limbah plastik dan *VIM* membentuk garis linear dengan nilai $R^2 = 0,985154666$ yang berarti penambahan limbah plastik memiliki pengaruh kuat terhadap hasil *VIM* sebab nilai determinansi mendekati 1. Nilai *VIM* pada kadar limbah plastik 0% hingga 6% berada di atas garis spesifikasi sehingga memenuhi persyaratan spesifikasi bina marga. Grafik hubungan kadar limbah plastik dengan nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 12. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan *VIM*



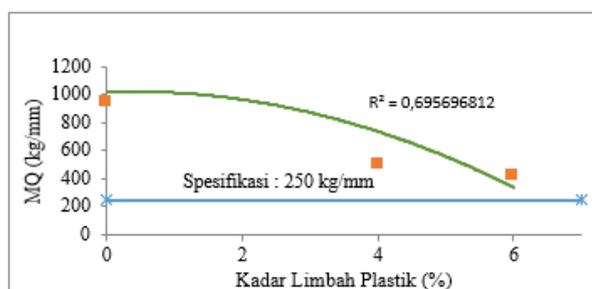
Gambar 13. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan *VMA*



Gambar 14. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan *VFWA*

Berdasarkan Gambar 13 grafik hubungan antara kadar limbah plastik dan *VMA* membentuk garis linear dengan nilai $R^2 = 0,9577288$ yang berarti penambahan limbah plastik memiliki pengaruh kuat terhadap hasil *VMA* sebab nilai determinansi mendekati 1. Nilai *VMA* pada kadar limbah plastik 0% hingga 6% berada di atas garis spesifikasi sehingga memenuhi persyaratan spesifikasi bina marga. Grafik hubungan kadar limbah plastik dengan nilai *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 14.

Berdasarkan Gambar 14 grafik hubungan antara kadar limbah plastik dan *VFWA* membentuk garis linear dengan nilai $R^2 = 0,979295629$ yang berarti penambahan limbah plastik memiliki pengaruh kuat terhadap hasil *VFWA* sebab nilai determinansi mendekati 1 (Paulus et al., 2022) . Nilai *VFWA* pada kadar limbah plastik 0% hingga 6% berada di atas garis spesifikasi yakni 68 % sehingga memenuhi persyaratan spesifikasi bina marga. Grafik hubungan kadar limbah plastik dengan nilai *Marshall Quotient (MQ)* dapat dilihat pada Gambar 15.



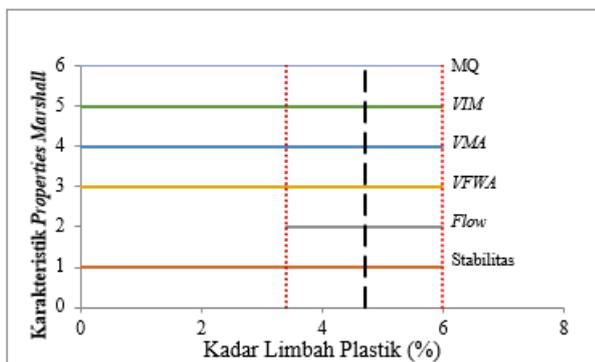
Gambar 15. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik dengan *MQ*

Berdasarkan Gambar 15 grafik hubungan kadar limbah plastik dengan *MQ* berbentuk parabola tertutup dengan nilai $R^2 = 0,695696812$ yang

berarti penambahan limbah plastik memiliki pengaruh kuat terhadap hasil *MQ* sebab nilai determinansi mendekati 1 (Warsito and Rahmawati, 2020). Nilai *MQ* pada kadar limbah plastik 0% hingga 6% berada di atas garis spesifikasi yakni 250 kg/mm sehingga memenuhi persyaratan spesifikasi bina marga. Dari analisis perhitungan *Properties Marshall* dan Volumetrik didapatkan bahwa seluruh kadar limbah plastik memenuhi spesifikasi pada aspek Stabilitas (Harnaeni et al., 2020), *VMA*, *VFWA*, dan *MQ*. Sedangkan untuk beberapa nilai pada *Flow* dan *VIM* ada beberapa variasi kadar yang tidak memenuhi spesifikasi.

3.5. Penentuan Kadar Plastik Optimum

Setelah menyelesaikan analisa perhitungan nilai *Properties Marshall* dan Volumetrik, maka didapatkan nilai Kadar Plastik Optimum yang dapat dilihat pada Gambar 16. sebagai berikut.



Gambar 16: Grafik Kadar Limbah Plastik Optimum

Berdasarkan Gambar 16 didapatkan nilai kadar limbah plastik minimum sebesar 2,4 % dan kadar limbah plastik maksimum sebesar 6 %, sehingga didapatkan nilai KPO sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{KPO} &= \frac{\text{Kadar Plastik Minimum} + \text{Kadar Plastik Maksimum}}{2} \\
 &= \frac{(2,4 + 6)}{2} \\
 &= 4,7 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan nilai KPO sebesar 4,7% sehingga dapat digunakan untuk melakukan pengujian ketidakrataan dan pengujian durabilitas.

3.6. Analisis Nilai Ketidakrataan

Sand Patch Method atau metode lingkaran pasir merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai *IRI*. Pasir yang digunakan untuk pengujian yaitu pasir Ottawa. Benda uji yang digunakan merupakan benda uji dengan KPO (Trimurtiningrum, 2018). Pengujian ini dilakukan pada dua sisi atas dan bawah benda uji agar mendapatkan hasil yang lebih akurat dan mengurangi angka koreksi pada pelaksanaan pengujian (Revisdah and Purnomo, 2019). Hasil pengujian Nilai Ketidakrataan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Nilai Ketidakrataan

KPO	Sampel	Sisi	Volume dari beberapa pedekatan			Kedalaman	IRI	IRI	IRI
			Berdasarkan Berat						
			Awal	Akhir	Volume				
%	buah	-	gr	gr	ml	cm	m/km	rata-rata sisi	rata-rata sampel
4.7	1	atas	44.69	44.4	0.19	0.002	1.66	1.5	1.692
		bawah	44.66	44.41	0.17	0.002	1.34		
	2	atas	44.64	44.21	0.28	0.004	1.72	1.88	
		bawah	44.53	44.06	0.31	0.004	2.05		

Berdasarkan Tabel 6. dapat dikatakan bahwa benda uji dinyatakan dalam kondisi **baik** karena memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan yaitu 4 m/km dengan nilai *IRI* yang didapatkan sebesar 1,692 m/km.

3.7. Analisis Nilai Durabilitas

Marshall Immersion merupakan metode yang digunakan untuk menentukan nilai durabilitas atau Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Benda uji yang digunakan merupakan benda uji dengan KPO yang telah ditentukan. Hasil Pengujian *Marshall Immersion* dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian *Marshall Immersion* Durasi Perendaman (60°C)

Paramater	Durasi Perendaman (60°C)	
	30 menit	24 jam
Nilai Stabilitas (kg)	1164.385	1066.589
Nilai IKS	100	91.6

Berdasarkan pada Tabel 7 didapatkan Indeks Kekuatan Sisa sebesar 91,60%. Nilai tersebut telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan yaitu 80%, sehingga campuran dapat dinyatakan *durabel*.

4. KESIMPULAN

- Berdasarkan hasil penelitian pada material daur ulang dengan memberikan aditif plastik

PET didapatkan kadar plastik optimum sebesar 4,7%.

2. Parameter *Properties Marshall* pada campuran HRA mengalami peningkatan akibat penambahan aditif limbah plastik terutama pada aspek Stabilitas, *VIM*, *VFWA*, dan *MQ*.
- 3 Dengan penambahan aditif limbah plastik PET pada material HRA memberikan implikasi pada nilai ketidakrataan secara umum baik *IRI* yang didapatkan sebesar 1,692 m/km dan memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan, yaitu 4 m/km
4. Penambahan aditif limbah plastik dalam campuran HRA dapat meningkatkan Indeks Kekuatan Sisa sebesar 91,60% > IKS spesifikasi 80% nilai stabilitas normal sehingga campuran dinyatakan *durabel*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum 2018. Yogyakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Haris. (2019). Analisis Pengujian Stabilitas dan Durabilitas Campuran Aspal dengan Tes Perendaman. *Jurnal LINEARS*, 33-47.
- Harnaeni, S.R., Pramesti, F.P., Budiarto, A., Setyawan, A., Khan, M.I. and Sutanto, M.H. (2020). Study on structural performance of asphalt concrete and hot rolled sheet through viscoelastic characterization. *Materials*, 13(5), p.1133.
- Lapian, F., Ramli, M., Pasra, M., & Arsyad, A. (2019). Pengaruh Limbah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) Terhadap Nilai Kadar Aspal Optimum Campuran AC-WC. *Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS) X 2019*, 139-149.
- Musthofa, H. (2019). Analisa Kerusakan dan Perbaikan Jalan Aspa (Studi Kasus : Jalan Bangilan - Tapelan Kec. Kapas Kab. Bojonegoro). *D'Teksi*, 13-24.
- Paulus, J. M., Supit, S. & Mantiri, H. (2022). Karakteristik Mekanik Campuran Panel Dinding Berbahan Dasar Metakaolin dan Serat Bambu. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 4, 1-10.
- Perkasa, G. (2012). Pengaruh Suhu Pematatan Terhadap Indeks Workalibitas Campuran HRA (Hot Rolled Asphalt) Menggunakan Filler Abu Vulkanik Gunung Merapi. Surakarta: Jurusan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret.
- Revisdah, R. and Purnomo, R.H. (2019). Design Hot Mix Formula Hrs-Wc Dengan Menggunakan Gradasi Asphalt Institute. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 6(1), pp.36-39.
- RSNI 03-1737. (1989). Tata Cara Pelaksanaan Lapis Tipis Beton Aspal Untuk Jalan Raya. Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum.
- Suhardi, Pratomo, P., & Ali, H. (2016). Studi Karakteristik Marshall pada Campuran Aspal dengan Penambahan Limbah Botol Plastik. *JRSDD*, 284-293.
- Trimurtiningrum, R. (2018). Pengaruh Penambahan Serat Bambu Terhadap Kuat Tarik dan Kuat Tekan Beton. *JHP17: Jurnal Hasil Penelitian*, 3.
- Sukirman, S. (1999). Perkerasan Lentur Jalan Raya. Bandung: Nova.
- Wahjoedi. (2009). Karakteristik Marshall dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) pada Campuran Butonite Mastic Asphalt (BMA). *Teknik Sipil & Perencanaan*, 121-130.
- Warsito, W. & Rahmawati, A. (2020). Variasi Abu Ampas Tebu dan Serat Bambu sebagai Bahan Campuran Pembuatan Beton Ramah Lingkungan. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 4, 109-117.
- Yuliani, A., Bahri, S., & Afrizal, Y. (2018). Analisis Tingkat Ketidakrataan Jalan Nasional dengan Menggunakan Alat NAASRA (Studi Kasus Jalan Nasional Daerah Betungan-Padang Serai). *Jurnal Inersia*, 13-20.