

# **PENGARUH PENGKONDISIAN TERHADAP KINERJA CAMPURAN BERASPAL PANAS DAUR ULANG DENGAN KADAR RAP TINGGI (THE EFFECT OF CONDITIONING ON THE PERFORMANCE OF HOT MIX ASPHALT RECYCLING WITH HIGH RAP PROPORTION)**

**Dani Hamdani<sup>1)</sup>, Nono<sup>2)</sup>**

<sup>1), 2)</sup>Balai Bahan Jalan, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan

<sup>1), 2)</sup>Jl. A.H. Nasution No.264, Bandung 40294

e-mail: <sup>1)</sup>dani.hamdani@pusjatan.go.id, <sup>2)</sup>nono.bbpbj@pusjatan.go.id

Diterima: 1 September 2020; direvisi: 14 November 2020; disetujui: 17 Desember 2020.

## **ABSTRAK**

*Kinerja campuran beraspal panas daur ulang (ACWCRAP) yang diuji yaitu pengujian parameter Marshall, ketahanan terhadap deformasi, dan ketahanan terhadap retak lelah (fatik). Terdapat dua jenis benda uji pengujian yaitu yang telah dikondisikan di dalam oven pemanas (STOA) sesuai AASHTO R30-02 (2010) dan yang tidak dikondisikan/standar sesuai ASTM D6926-10. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji pengaruh pengkondisian terhadap kinerja campuran beraspal panas daur ulang dengan kadar RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) tinggi, yaitu sebesar 60%, 80% dan 100%. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh kesimpulan semua kinerja campuran beraspal memenuhi persyaratan. Nilai stabilitas Marshall ACWCPolimer setara dengan ACWC dengan 100% RAP, namun untuk nilai stabilitas Marshall dengan benda uji dikondisikan diperoleh stabilitas Marshall ACWC dengan 100% RAP lebih tinggi. Stabilitas Marshall ACWC dengan 60% RAP dan 80% RAP lebih rendah dari stabilitas Marshall ACWCPolimer. Untuk benda uji STOA, stabilitas Marshall ACWCPolimer setara dengan ACWC dengan 80% RAP dan lebih tinggi dari ACWC dengan 60% RAP. Semua campuran memiliki nilai stabilitas dinamis yang memenuhi persyaratan, baik untuk benda uji fresh maupun STOA. Ketahanan deformasi ACWC dengan 100% RAP lebih tinggi dibanding ketahanan deformasi ACWCPolimer, namun untuk benda uji STOA ketahanan deformasi ACWCPolimer lebih tinggi daripada campuran beraspal lainnya. Berdasarkan fakta tersebut, kinerja ketahanan deformasi ACWCPolimer lebih baik dibanding ACWCRAP. Mengacu terhadap regangan tarik izin campuran beraspal sebesar 100  $\mu\epsilon$ , semua campuran ACWCRAP untuk benda uji yang fresh dan STOA lebih tahan fatik daripada ACWCPolimer. ACWCRAP yang menggunakan 100% RAP memiliki ketahanan fatik yang paling tinggi.*

**Kata kunci:** *campuran beraspal panas daur ulang, pengkondisian, kinerja, RAP, ketahanan deformasi, ketahanan fatik*

## **ABSTRACT**

*The performance hot mix asphalt recycling (ACWCRAP) tested was Marshall properties, deformation resistance, and fatigue resistance. There are two types of test objects, specimen that have been conditioned in a heating oven according to AASHTO R30-02 (2010) and standar specimen according to ASTM D6926-10. The purpose of this study was to examine the effect of conditioning on the performance of hot mix asphalt recycling mixtures with high Reclaimed Asphalt Pavement (60%, 80% and 100% RAP). Based on the test results, it is concluded that all the performance of the asphalt mixture meets the requirements. ACWCPolymer Marshall stability value is equivalent to ACWC with 100% RAP, but for Marshall stability with conditioned specimen, Marshall ACWC stability 100% RAP is higher. The Marshall stability ACWC with 60% RAP and 80% RAP is lower than the stability of Marshall ACWCPolymer. For STOA specimens, ACWCPolymer Marshall stability is equivalent to that of ACWC with 80% RAP and higher than ACWC with 60% RAP. All mixtures have meet the requirements for dynamic stability values. The deformation resistance of ACWC with 100% RAP is higher than the deformation resistance of ACWCPolymer, but for STOA specimens the deformation resistance of ACWCPolymer is higher than other asphalt mixtures. Based on these facts, the deformation resistance performance of ACWCPolymer is better than ACWCRAP. Referring to the tensile strain permit for asphalt mixtures is 100  $\mu\epsilon$ , all ACWCRAP mixtures for fresh and STOA specimens are more fatigue resistant than ACWCPolymer. ACWCRAP which uses 100% RAP has the highest fatigue resistance.*

**Keywords:** *hot mix asphalt recycling, conditioning, performance, RAP, deformation resistance, fatiq resistance*

## PENDAHULUAN

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dalam Visium Tahun 2030 khususnya bidang Bina Marga memiliki rencana jangka panjang terkait penggunaan bahan daur ulang (*recycling*), yaitu jalan 99% mantap dengan memanfaatkan sebanyak-banyaknya material lokal dan menggunakan teknologi recycle yang terintegrasi antar moda. Untuk mendukung terwujudnya visium kementerian PUPR tahun 2030 terkait penggunaan teknologi *recycle*, maka Direktorat Jendral Bina Marga pada tahun 2019 telah membuat Spesifikasi Khusus Interim Campuran Beraspal Panas Daur Ulang Pencampuran di Init Produksi Campuran Aspal (Skh-1.6.27). Campuran beraspal panas daur ulang tersebut terdiri dari agregat baru, bahan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), bahan aspal dan bahan peremaja, yang dicampur secara panas di unit produksi campuran aspal, serta dihampar dan dipadatkan di atas lapis fondasi atau permukaan jalan lama beraspal yang telah disiapkan.

Brett, Williams, and Copeland (2018) menyebutkan bahwa industri campuran beraspal daur ulang di Amerika Serikat terus menerus mencari cara untuk meningkatkan kualitas campuran beraspal daur ulang dan memanfaatkan proporsi bahan RAP yang lebih tinggi. Saat ini penggunaan proporsi bahan RAP di Amerika Serikat sudah sangat tinggi, hal ini dicapai dengan cara mendaur ulang 99% bahan perkerasan lama dan menggunakannya kembali menjadi perkerasan jalan baru.

Menurut NAPA (2019), dalam pembangunan dan rehabilitasi perkerasan beraspal, sejumlah besar sumber daya alam digunakan, khususnya agregat dan bahan pengikat. Sumber daya alam ini terbatas dan oleh karena itu penggabungan dan penggunaan kembali perkerasan aspal lama yang mengalami kerusakan sangat penting dan cocok untuk mengatasi masalah lingkungan. Berdasarkan hasil survei pada industri perkerasan beraspal untuk musim konstruksi 2018 menunjukkan bahwa produsen campuran beraspal memiliki catatan kuat dalam menerapkan praktik berkelanjutan dan terus meningkatkan penggunaan bahan daur ulang dan campuran beraspal hangat (WMA). Penggunaan

bahan daur ulang, khususnya perkerasan beraspal direklamasi (RAP) dan *reclaimed asphalt shingles* (RAS), menghemat bahan baku dan mengurangi biaya campuran aspal secara keseluruhan. Hal demikian, memungkinkan pemilik jalan untuk mencapai lebih banyak capaian dalam pemeliharaan jalan dan kegiatan konstruksi/pembangunan.

Metode pengkondisian jangka pendek (*short term oven aging*) campuran beraspal yang saat ini umum digunakan di Indonesia sesuai AASHTO R30-02 (2010) yaitu *Standar Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt* (HMA) dan yang tidak dikondisikan/standar sesuai ASTM D6926-10 yaitu *Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus*. Perancangan campuran beraspal panas saat ini sebaiknya menambahkan tahapan pengkondisian jangka pendek karena tahapan ini akan menggambarkan simulasi penuaan yang terjadi selama tahap konstruksi. Tahapan pengujian pengkondisian jangka pendek akan menggambarkan sifat fisik campuran beraspal panas yaitu selama proses pencampuran campuran beraspal panas di unit pencampur aspal (AMP), penyimpanan dan transportasi di dalam dump truk pada saat menuju lokasi pekerjaan serta saat pemadatan di lapangan.

Penelitian yang dilakukan oleh Hamdani dan Nono (2017) mengkaji tentang pengaruh pengkondisian campuran beraspal panas terhadap ketahanan alur dan fatik, menyimpulkan bahwa campuran beraspal panas yang mengalami pengkondisian di laboratorium akan mengalami penuaan dan meningkatkan kekakuan campuran beraspal sehingga mempengaruhi kinerja campuran tersebut. Peningkatan kekakuan ini dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen dan kemampuan untuk menyebarkan beban yang diterima, tetapi dilain pihak menyebabkan campuran beraspal menjadi lebih getas dan cepat retak, sehingga semakin lama proses penuaan terjadi maka durabilitas campuran beraspal semakin berkurang dibandingkan dengan benda uji yang standar.

Pengkajian membandingkan antara tanpa dan dengan pengkondisian pada campuran beraspal panas memberikan manfaat seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Hamdani dan

Nono (2017), dimana perancangan campuran beraspal panas yang tidak dikondisikan/standar sesuai ASTM D6926-10 menggambarkan tahap perancangan di laboratorium. Sedangkan campuran beraspal panas yang dikondisikan menggambarkan keadaan sebenarnya di lapangan dimulai dari tahap pencampuran bahan di AMP sampai dengan tahap pemadatan di lapangan.

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji pengaruh pengkondisian terhadap kinerja campuran beraspal panas daur ulang dengan RAP tinggi. Yang dimaksud dengan penggunaan RAP tinggi adalah penggunaan bahan RAP dalam campuran beraspal panas daur ulang dengan 3 variasi penggunaan bahan RAP sebesar (60%, 80% dan 100%).

## KAJIAN PUSTAKA

### Manfaat Penggunaan Bahan RAP

Salah satu manfaat penggunaan bahan daur ulang campuran beraspal (RAP) adalah dalam bidang ekonomi dimana berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Willis et al. (2012), dengan menggunakan material RAP untuk campuran beraspal pada lapis permukaan dan lapisan antara, dapat membuat konstruksi perkerasan menjadi sangat ekonomis dimana bahan pengikat aspal yang *fresh* akan diganti dengan pengikat yang lebih murah dari RAP. Konsumsi agregat alami juga akan dikurangi dengan menggunakan agregat yang diperoleh dari RAP. Ini juga akan menghasilkan penghematan ekonomi yang sangat besar mempertimbangkan pengurangan kebutuhan agregat dan biaya pengangkutan material. Meski ada biaya tambahan terkait dengan kegiatan penggarukan aspal lama dan penggunaan bahan peremaja. Dimana biaya dapat dikurangi hingga 35% dengan menggunakan bahan RAP sebesar 50% dalam campuran beraspal panas. Sedangkan West et al. (2011) menyebutkan bahwa perancangan dan pelaksanaan campuran beraspal panas daur ulang akan dikatakan sukses apabila dibuktikan dengan kinerja campuran beraspal yang baik di laboratorium dan lapangan. Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan RAP sebesar 30% dalam campuran beraspal daur ulang akan menghasilkan kinerja yang sama dengan campuran beraspal

konvensional menggunakan bahan pengikat aspal *fresh*.

Manfaat lainnya dari penggunaan bahan daur ulang adalah manfaat penyelamatan lingkungan, berdasarkan Rathore, Zaumanis, and Haritonovs (2019), daur ulang bahan perkerasan aspal lama adalah pilihan untuk pembangunan jalan yang berkelanjutan yang dapat mengakibatkan penurunan konsumsi sumber daya alam yang cukup besar. Serta akan menangani masalah lahan tempat penyimpanan/ stockpile bahan RAP dan dengan demikian menghemat ruang penyimpanan bahan RAP yang sangat besar. Keunggulan lainnya adalah sinergi antara material RAP dan campuran beraspal hangat, yang dapat memberikan kombinasi manfaat lingkungan.

Penggunaan bahan daur ulang jalan akan berpengaruh secara signifikan terhadap karakteristik campuran beraspal. Campuran beraspal panas daur ulang akan menggunakan bahan pengikat berupa aspal yang lebih lunak, dimana campuran beraspal akan menunjukkan peningkatan kekuatan yang tinggi pada periode awal akan tetapi seiring waktu peningkatan kekakuan akan menurun seiring dengan terjadinya proses penuaan campuran beraspal daur ulang dibandingkan dengan campuran beraspal konvensional. Sensitifitas penuaan yang besar dikarenakan faktor banyaknya prosentase bahan pengikat aspal *fresh* dalam campuran yang memiliki keterbaruan oksigen (oxygen diffusivity) yang tinggi dan lebih rentan terhadap penuaan dibandingkan terhadap bahan pengikat daur ulang (Yin et al. 2018)

### Penuaan Campuran Beraspal Panas

Penuaan bahan pengikat aspal atau campuran beraspal adalah perubahan dalam sifat rheologi aspal atau campuran beraspal karena perubahan komposisi kimianya selama konstruksi sampai dengan akhir umur pelayanan jalan. Tahap pertama penuaan yang terjadi sangat cepat adalah ketika campuran beraspal di produksi di AMP pada temperatur tinggi. Tahapan ini sering disebut penuaan jangka pendek (short term aging). Selama tahapan ini tebal film aspal yang sangat tipis terkena udara pada temperatur tinggi, yang menyebabkan perubahan yang signifikan pada bahan pengikat aspal dan akan meningkatkan

kekakuannya. Tahap kedua penuaan aspal adalah saat aspal terkena pengaruh lingkungan pada saat masa pelayanan lalu lintas (*long term aging*). Tingkat kekerasan aspal tergantung banyaknya rongga udara pada campuran beraspal dan kondisi lingkungan sekitarnya. Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap penuaan aspal, antara lain: tipe AMP, temperatur pencampuran, lamanya pencampuran di pugmill, dan kondisi di lapangan, seperti temperatur udara, sinar ultraviolet, dan curah hujan (Sirin, Paul, and Emad 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Morian, Hajj, and Sebaaly (2013) menyebutkan bahwa kadar aspal efektif dalam campuran beraspal adalah indikator terkuat dalam penuaan campuran beraspal, terlepas dari apapun jenis agregat yang digunakan. Omranian et al. (2020) menjelaskan bahwa meskipun penuaan adalah fenomena yang terdokumentasi dengan baik dalam hal perubahan sifat reologis bahan pengikat aspal, hambatan muncul ketika menyangkut struktur mikro dan komposisi kimianya yang kompleks. Hal tersebut menimbulkan tantangan untuk menghubungkan antara karakteristik bahan pengikat dengan perilaku campuran beraspal. Dimana efek ini akhirnya dapat menyebabkan kerusakan bahan pengikat. Hal ini menunjukkan bahwa penuaan membuat bahan pengikat menjadi kaku dan secara negatif mempengaruhi viskositasnya, yang membuat perkerasan jalan menjadi lebih rentan terhadap kerusakan seperti retak dan pelepasan butiran

#### **Pengkondisian jangka pendek (*short term oven aging*) sesuai AASHTO R 30-02 (2010)**

Pengkondisian jangka pendek di dalam oven pemanas (STOA) untuk bahan campuran beraspal panas yang tidak dipadatkan adalah simulasi penuaan yang terjadi sampai dengan tahap pemadatan, yaitu pada saat konstruksi pekerjaan jalan. Simulasi penuaan yang terjadi selama tahap konstruksi yaitu selama proses pencampuran campuran beraspal panas di unit pencampur aspal (AMP), penyimpanan dan transportasi di dalam dump truk pada saat menuju lokasi pekerjaan serta saat pemadatan di lapangan.

Prosedur pengujian penuaan jangka pendek di laboratorium adalah sebagai berikut:

1. Bahan campuran beraspal disiapkan sesuai ASTM D6926-10 yaitu prosedur persiapan bahan campuran beraspal menggunakan metode Marsall. Metode ini juga digunakan untuk persiapan benda uji yang tidak dikondisikan/standar.
2. Setelah bahan campuran beraspal panas dicampur pada suhu pencampuran sesuai dengan viskositas aspalnya. Bahan campuran beraspal panas selanjutnya dilakukan pengkondisian sebelum dilakukan pemadatan. Pengkondisian dilakukan didalam oven pemanas selama 4 jam  $\pm$  5 menit pada suhu yang setara temperatur pemadatan campuran beraspal panas di lapangan, yaitu pada suhu  $135 \pm 3$  °C.

#### **Pengujian Ketahanan Deformasi**

Prosedur pengujian ketahanan deformasi sesuai dengan Manual for Design and Construction of Asphalt Pavement – Japan Road Association, JRA (2005) adapun langkah-langkah pengujiannya menggunakan alat Wheel Tracking Machine (WTM) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 adalah sebagai berikut:

1. Pelaksanaan pengujian dilakukan di laboratorium dalam ruang dengan temperatur pengujian dilakukan pada temperatur tinggi kritis, yaitu pada  $60 \pm 1$  °C. Agar temperatur benda uji seragam maka sebelum pengujian WTM dilakukan, campuran beraspal yang telah dipadatkan, dikondisikan terlebih dahulu dalam ruang pengkondisian (*chamber*) selama 6 jam.
2. Pengujian dilakukan dengan tekanan ban sebesar  $6,4 \pm 0,15$  kg/cm, yang setara dengan beban sumbu tunggal roda ganda 8,16 ton. Masing masing benda uji diuji dengan 1.260 siklus roda dalam 60 menit, yaitu dengan 21 siklus (42 lintasan) per menit.
3. Pembebanan pada pengujian ketahanan deformasi menggunakan alat WTM ini dilakukan melalui roda karet bergerak maju mundur.
4. Kedalaman alur (*deformasi*) tercatat melalui sensor yang ada pada tungkai roda pembebanan yang dihubungkan dengan alat kontrol dan data yang dihasilkan berupa waktu pembebanan, jumlah lintasan, kedalaman alur, kecepatan deformasi, dan stabilitas dinamis. Rumus

perhitungan stabilitas dinamis dan kecepatan deformasi disajikan pada persamaan (1) dan persamaan (2):

$$SD = 42 \times (t_2 - t_1) / (d_2 - d_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$KD = (d_2 - d_1) / (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

SD = Stabilitas Dinamis (lintasan/mm)

KD= Kecepatan Deformasi (mm/menit)

d1= Kedalaman alur pada waktu 45 menit

d2= Kedalaman alur pada waktu 60 menit

t1= waktu pengujian 45 menit

t2= waktu pengujian 60 menit



**Gambar 1.** Alat pengujian ketahanan deformasi.

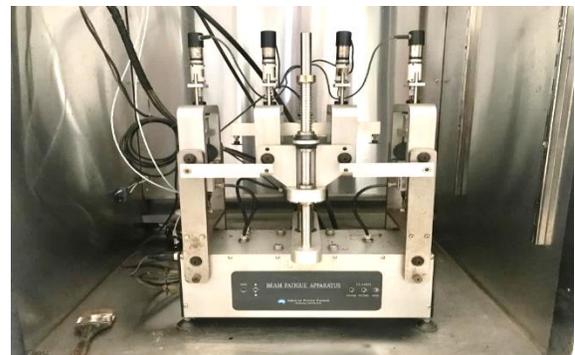
**Pengujian Ketahanan Terhadap Retak Lelah (Fatik)**

Rowe, Blankenship, and Bennert (2012) menyebutkan bahwa Selama uji ketahanan terhadap retak lelah (fatik), kerusakan yang terjadi akan terakumulasi dan sifat karakteristik material campuran beraspal akan berubah. Perubahan ini biasanya dinyatakan sebagai perubahan modulus, dan ketika telah mencapai beberapa nilai kritis, pengujian dihentikan. Hal ini menghasilkan definisi kegagalan yang berbeda untuk dua jenis pengujian, yaitu kontrol tegangan dan regangan, serta menghasilkan definisi kegagalan (failure) dan hubungan kelelahan yang berbeda.

Navarro et al. (2018) menyebutkan bahwa kekakuan campuran beraspal akan meningkat seiring dengan durasi pengkondisian campuran beraspal serta selama kondisi pelayanan jalan di lapangan. Peningkatan kekakuan ini akan mempengaruhi ketahanan terhadap retak lelah dan durabilitas campuran beraspal dan akan semakin bertambah seiring dengan peningkatan temperatur perkerasan jalan.

Pengujian ketahanan terhadap retak lelah (fatik) pada campuran perkerasan beraspal panas berdasarkan AASHTO T 321-14, Standard Method of Test Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. Pengujian menggunakan alat Beam Fatigue Apparatus (BFA), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pengujian kelelahan dilakukan pada temperatur rendah kritis, yaitu (20±1)°C, dimana benda uji yang telah disiapkan dikondisikan dalam ruang pengkondisian (chamber) pada temperatur yang ditentukan selama 4 jam ± 5 menit sampai temperatur yang direncanakan tercapai.

Konsep pengujian ketahanan terhadap retak lelah ini menggunakan pembebanan 4 titik. Pengujian menggunakan kontrol regangan, dengan regangan yang direkomendasikan antara (250-750)µε. Kondisi dimana nilai modulus kekakuan lentur (flexural stiffness) telah berkurang sebesar 50% dari nilai awal, maka kondisi ini dianggap sebagai kondisi kegagalan (failure). Pengulangan pembebanan (siklus) sampai kondisi failure disebut sebagai umur kelelahan.



**Gambar 2.** Alat pengujian ketahanan terhadap retak lelah (fatik).

**HIPOTESIS**

Campuran beraspal panas daur ulang yang mengalami pengkondisian di laboratorium memiliki kinerja yang berbeda bila dibandingkan dengan kinerja campuran beraspal dengan agregat baru dan bahan pengikat aspal polimer yang umum digunakan sehingga perlu perbaikan metoda uji saat ini.



## HASIL DAN ANALISIS

### Hasil pengujian bahan

#### - Mutu RAP

RAP yang digunakan merupakan hasil pengupasan perkerasan jalan lama yang sudah mengalami kerusakan dan dipecah menjadi 2 fraksi, yaitu fraksi kasar lolos saringan 19 mm dan fraksi halus lolos saringan 9,5 mm. Sifat kedua fraksi RAP tersebut seperti disajikan pada Tabel 1.

#### - Mutu Agregat Baru

Agregat baru yang digunakan terdiri atas 3 fraksi, yaitu fraksi kasar, menengah dan fraksi halus. Sifat agregat baru ketiga fraksi tersebut seperti disajikan pada Tabel 2.

#### - Blending Agregat Baru dengan Agregat RAP

Dalam upaya mengevaluasi sifat campuran beraspal daur ulang, dibuat 3 variasi campuran beraspal yang menggunakan RAP (60%, 80% dan 100%) dengan bahan pengikat campuran aspal Pen 60 dengan bahan peremaja dan dibuat juga campuran menggunakan agregat baru saja dengan bahan pengikat aspal polimer (sebagai pembanding). Jenis campuran beraspal yang digunakan adalah campuran beraspal panas lapis permukaan (ACWC) dengan gradasi rencana dengan komposisi bahan sesuai Tabel 3 adalah disajikan pada Gambar 4

**Tabel 1.** Sifat RAP

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian						
		RAP Kasar			RAP Halus			
		43,04	% berat		56,96	% berat		
		1	2	Rata2	1	2	Rata2	
1	Kadar aspal; %		3,37	3,32	3,35	5,34	5,30	5,32
2	Penetrasi aspal dari RAP; 0,1 mm		-	-	8,0	-	-	8,0
3	Kadar air; %		1,4			2,0		
4	Analisa saringan; % lolos							
	· Ukuran saringan 1"	25,00						
	· Ukuran saringan 3/4"	19,00	100,00	100	100			
	· Ukuran saringan 1/2"	12,50	95,50	96,28	95,89			
	· Ukuran saringan 3/8"	9,50	81,98	81,78	81,88	100,00	100	100
	· Ukuran saringan No. 4	4,75	42,54	42,20	42,37	100,00	99,87	99,94
	· Ukuran saringan No. 8	2,36	28,40	27,91	28,15	78,90	78,06	78,48
	· Ukuran saringan No. 16	1,18	22,00	21,70	21,85	58,88	58,09	58,48
	· Ukuran saringan No. 30	0,60	17,60	17,33	17,46	44,03	43,34	43,68
	· Ukuran saringan No. 50	0,30	13,93	13,72	13,82	33,03	32,35	32,69
	· Ukuran saringan No. 100	0,15	10,71	10,53	10,62	24,41	23,67	24,04
	· Ukuran saringan No. 200	0,075	7,96	7,82	7,89	17,82	17,12	17,47
5	Berat Jenis							
	- Bulk				2,619			2,617
	- SSd				2,658			2,664
	- Aparent				2,726			2,745
	- Penyerapan				1,50			1,77

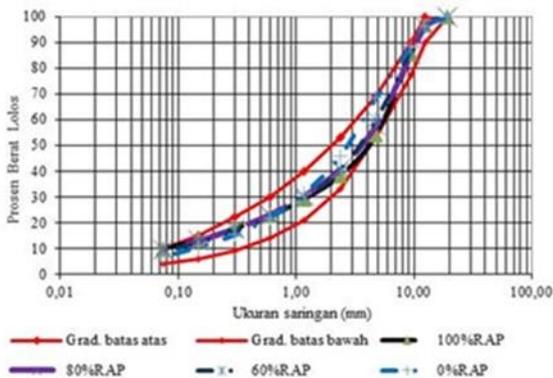
**Tabel 2.** Sifat agregat baru

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian Agregat		
		Kasar	Sedang	Halus
1	Abrasi; %	16,59	-	-
2	Berat Jenis			
	Bulk	2,64	2,62	2,62
	SSD	2,69	2,68	2,67
	Aparent	2,77	2,77	2,75
3	Penyerapan; %	1,7	2,0	1,8
4	Setara Pasir; %			61,46
5	Anggularitas; %	100/100	100/100	44,35
6	Kelekatan; %	95,0	-	-
7	Pipih dan Lonjong; %	6,0	-	-
8	Pelapukan; %	0,24	0,09	1,09
9	Gumpalan Lempung;	1,61	0,00	0,04

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian Agregat		
		Kasar	Sedang	Halus
10	Analisa saringan; % lolos			
	· Ukuran saringan 1"			
	· Ukuran saringan 3/4"	100		
	· Ukuran saringan 1/2"	78,10	100	
	· Ukuran saringan 3/8"	34,03	99,35	
	· Ukuran saringan No. 4	2,76	39,25	100
	· Ukuran saringan No. 8	1,83	5,97	74,56
	· Ukuran saringan No. 16	1,61	4,75	49,87
	· Ukuran saringan No. 30	1,50	3,52	33,20
	· Ukuran saringan No. 50	1,40	4,15	21,15
	· Ukuran saringan No. 100	1,24	3,60	13,12
	· Ukuran saringan No. 200	1,01	2,95	7,31

**Tabel 3.** Komposisi bahan campuran untuk variasi penggunaan RAP

Jenis Bahan	Komposisi Bahan untuk Gradasi Campuran Beraspal Panas Daur Ulang dengan:			
	0%	60%	80%	100%
	RAP	RAP	RAP	RAP
Agregat Kasar; % berat	17	10	6	-
Agregat Sedang; % berat	25	18	5	-
Agregat Abu Batu; % berat	56	12	9	-
Filler Semen; % berat	2	-	-	-
Agregat RAP Kasar; % berat	-	34	58	80
Agregat RAP Halus; % berat	-	26	22	20
Jumlah	100,0	100,0	100,0	100,0



**Gambar 4.** Gambar gradasi agregat campuran rencana untuk variasi penggunaan RAP

**Tabel 4.** Sifat aspal Pen 60/70

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Persyaratan Aspal Tipe I A
1	Penetrasi pada 25°C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm	63	60-70
2	Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s	234	160-240
3	Viskositas kinematis pada 135°C; cSt	-	≥ 300
4	Titik lembek; °C	49,2	≥ 48
5	Daktilitas pada 25°C, 5 cm/menit; cm	> 140	≥ 100
6	Titik nyala (COC); °C	324	≥ 232
7	Kelarutan dalam C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> ; %	99,3	≥ 99
8	Berat jenis	1,038	≥ 1,0
<b>Pengujian Residu Hasil TFOT pada 163°C, 5 jam</b>			
9	Kehilangan berat (TFOT); %	0,006	≤ 0,8
10	Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s	297,7	≤ 800
11	Penetrasi pada 25°C, 100 g, 5 detik; %	42	≥ 54
12	Daktilitas pada 25°C, 5 cm/menit; cm	> 140	≥ 100
13	Titik lembek LOH; °C	51,4	-
14	Perkiraan suhu pencampuran; °C	150-156	-
15	Perkiraan suhu pemadatan; °C	138-144	-

- **Mutu Aspal Pen 60/70**

Aspal Pen 60/70 akan digunakan untuk bahan pengikat campuran beraspal panas daur ulang dan sifat fisik aspal Pen 60/70 memenuhi persyaratan sesuai Tabel 4.

- **Mutu Aspal Polimer**

Aspal Polimer digunakan untuk bahan pengikat campuran beraspal panas dengan agregat baru tanpa RAP dan sifat fisik aspal Polimer memenuhi persyaratan sesuai Tabel 5.

- **Mutu Bahan Peremaja**

Pada campuran beraspal panas daur ulang bahan pengikat yang digunakan adalah aspal Pen 60/70 dengan bahan peremaja. Adapun sifat fisik bahan peremaja memenuhi persyaratan sesuai Tabel 6.

- **Sifat Aspal Pen 60/70 dengan Variasi Proporsi Peremaja**

Bahan pengikat yang diperlukan untuk campuran beraspal panas daur ulang adalah berupa aspal baru. Aspal baru tersebut berupa campuran antara aspal Pen 60/70 dengan bahan peremaja. Proporsi dan komposisi aspal baru yang diperlukan tergantung dari proporsi dan penetrasi aspal dari RAP, dan target penetrasi aspal gabungan. Sifat variasi komposisi aspal baru tersebut disajikan pada Tabel 7. Pada Tabel 7 terlihat bahwa nilai penetrasi aspal baru semakin tinggi sejalan dengan meningkatnya penggunaan bahan peremaja.

**Tabel 5.** Sifat aspal polimer

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Persyaratan Aspal Tipe II B
1	Penetrasi pada 25°C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm	52	≥ 40
2	Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s	470,4	320 – 480
3	Viskositas pada 135°C; cSt	786	≤ 3000
4	Titik lembek; °C	55,0	≥ 54
5	Daktilitas pada 25°C, 5 cm/menit; cm	>140	≥ 100
6	Titik nyala (COC); °C	326	≥ 232
7	Kelarutan dalam C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> ; %	99,8	≥ 99
8	Berat jenis	1.038	≥ 1,0
9	Perbedaan titik lembek setelah stabilitas penyimpanan; °C	0,2	≤ 2,2

**Tabel 6.** Sifat bahan peremaja

No	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Persyaratan
1	Viskositas Kinematis pada 60°C dengan Saybolt Furol, cSt	36	Maks. 1000
2	Titik Nyala, °C	267	Min. 232
3	Berat Jenis	0,943	Min. 0,90
4	Kehilangan Berat (TFOT), %	0,745	Maks. 1,5
5	Viskositas 60°C dengan Saybolt Furol setelah TFOT, cSt	41,2	
6	Rasio Viskositas	1,15	Maks. 2,0

### - Perkiraan temperatur pencampuran dan pematatan

Aspal baru memiliki viskositas atau kekentalan yang lebih rendah dari viskositas Aspal Pen 60. Penggunaan bahan peremaja semakin banyak maka aspal baru semakin rendah lagi viskositasnya. Untuk itu, semakin banyak penggunaan bahan peremaja maka memiliki temperatur pencampuran dan pematatan semakin rendah. Pada Tabel 8 disajikan perkiraan temperature pencampuran untuk aspal baru dan aspal polimer.

**Tabel 7.** Sifat aspal baru untuk variasi komposisi

No	Komposisi Aspal Baru	Hasil Pengujian Sifat Aspal Baru (Aspal Pen 60 + Peremaja)				
		Penetrasi (0,1 mm)	Titik Lembek (°C)	Berat yang hilang/TFOT (%)	Penetrasi setelah TFOT (0,1 mm)	Titik Lembek setelah TFOT (°C)
1	100 % Pen 60 : 0 % Peremaja	61	50,0	0,015	50	53,9
2	99 % Pen 60 : 1 % Peremaja	76	47,5	0,110	57	52,1
3	97 % Pen 60 : 3 % Peremaja	110	45,7	0,117	79	48,6
4	95 % Pen 60 : 5 % Peremaja	159	41,6	0,107	102	45,9
5	93 % Pen 60 : 7 % Peremaja	221	38,2	0,152	169	42,6
6	91 % Pen 60 : 9 % Peremaja	334	36,8	0,170	211	39,0

### - Kinerja Campuran Beraspal Panas Daur Ulang

Dalam menganalisis kinerja campuran beraspal panas lapis permukaan daur ulang maka untuk pengujian Marshall, uji ketahanan deformasi dan uji ketahanan retak (fatik) masing-masing benda ujinya dibuat dalam 2 kondisi. Yaitu pertama benda uji dibuat tanpa pengondisian dan yang kedua benda ujinya dikondisikan/diagingkan sesuai dengan kondisi *short term oven aging* (STOA) sesuai AASHTO

R30. Maksud dari pengondisian agar kondisi aging aspal sesuai dengan pengaruh pencampuran di AMP sampai dengan penghamparan di lapangan. Cara pengondisian adalah benda uji campuran beraspal panas sebelum dilakukan pengujian benda ujinya di oven selama 4 jam pada temperature 135°C. Hasil pengujian Marshall, volumetric campuran, ketahanan deformasi dan ketahanan terhadap fatik diuraikan berikut ini.

**- Parameter Marshall**

Hasil pengujian Marshall dan volumetrik campuran beraspal panas  $ACWC_{Polimer}$  dan  $ACWC_{RAP}$  disajikan pada Tabel 9. Pada Tabel 9 semua sifat campuran beraspal memenuhi persyaratan. Namun bilamana memperhatikan besaran parameter Marshall untuk nilai stabilitas  $ACWC_{Polimer}$  adalah setara dengan ACWC dengan 100% RAP, namun untuk nilai stabilitas dengan benda uji dikondisikan (STOA) maka diperoleh stabilitas ACWC dengan 100% RAP lebih tinggi. Stabilitas ACWC dengan 60% RAP dan 80% RAP bila dibandingkan dengan stabilitas  $ACWC_{Polimer}$  adalah kedua-duanya lebih rendah, sedangkan untuk stabilitas dengan benda uji dikondisikan (STOA) diperoleh nilai stabilitas ACWC dengan 80% RAP setara dengan stabilitas

$ACWC_{Polimer}$  dan untuk ACWC dengan 60% RAP masih lebih rendah dari stabilitas  $ACWC_{Polimer}$ .

**- Ketahanan terhadap deformasi**

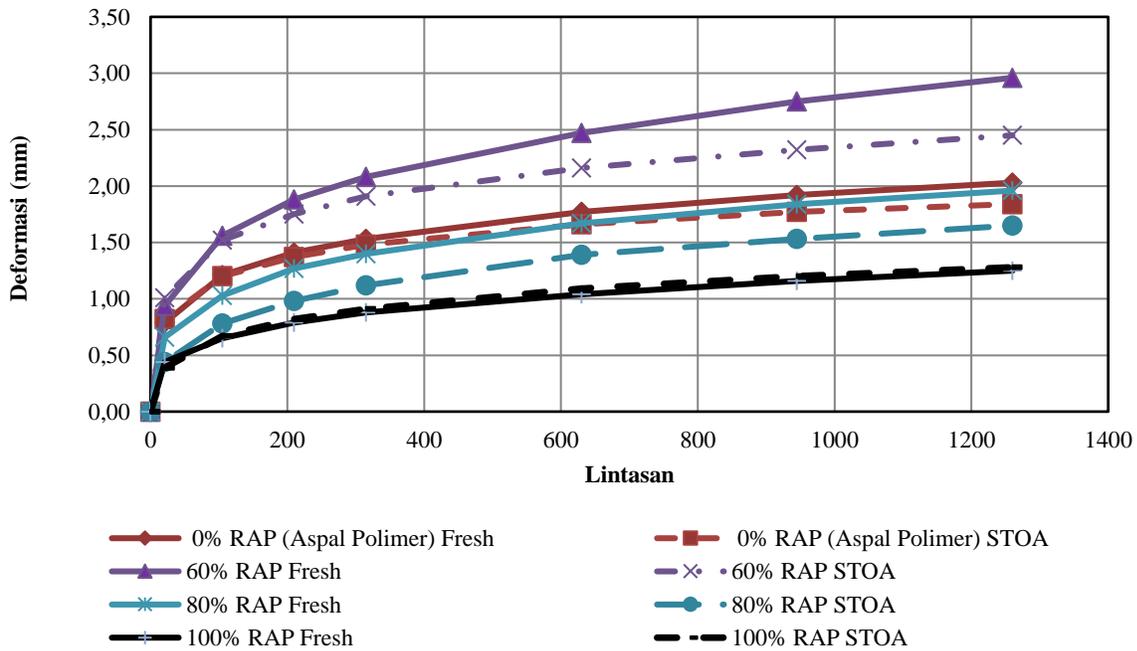
Upaya untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi dapat dengan melakukan pengujian menggunakan alat *Wheel Tracking Machine* (WTM). Pengujian dengan alat WTM merupakan simulasi dari pembebanan roda kendaraan pada lapisan perkerasan beraspal, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas di atas benda uji berupa lapisan perkerasan beraspal. Ketahanan suatu campuran beraspal panas terhadap deformasi permanen berupa alur, dapat dievaluasi setelah benda uji dilalui sejumlah lintasan atau kecepatan deformasi.

**Tabel 9.** Sifat campuran beraspal panas polimer dan daur ulang

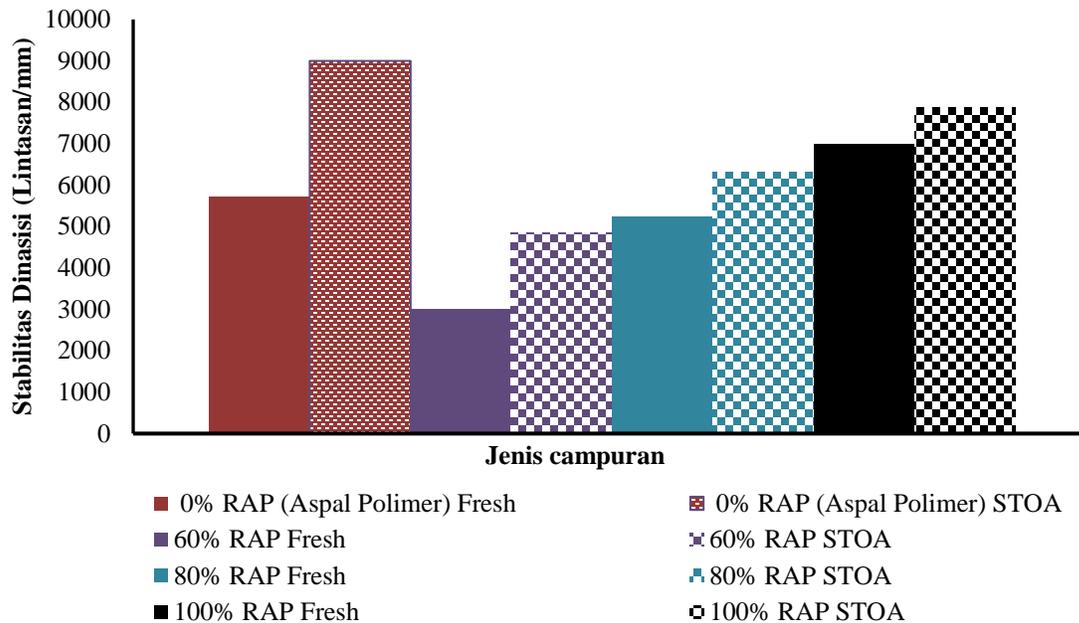
Parameter	Hasil Pengujian				Persyaratan
	$ACWC_{Polimer}$ (0% RAP)	$ACWC_{RAP}$			
		60% RAP	80% RAP	100% RAP	
Kadar Aspal Optimum, %	<b>5,70</b>	<b>5,50</b>	<b>5,60</b>	<b>5,80</b>	
- Aspal Polimer, %	5,70	0,00	0,00	0,00	
- Aspal Pen 60, %	0,00	3,91	3,00	1,71	
- Bahan Peremaja, %	0,00	0,12	0,18	0,43	
Kepadatan, gr/cm <sup>3</sup>	2,287	2,356	2,362	2,343	
Void Filled Bitumen (VFB), %	74,05	77,55	79,60	74,82	Min. 65
VIM-Marshall, %	4,67	3,40	3,08	4,00	3 - 5
Void Mineral Aggregate (VMA), %	18,0	15,1	15,0	15,8	Min. 14
Stabilitas Marshall, kg	1143	1030	1093	1193	Min. 1000
Kelelehan, mm	3,00	3,90	3,96	3,74	2 - 4
Stabilitas Marshall Sisa, %	90,00	92,00	92,66	90,30	Min. 90
Stabilitas STOA	1168	1083	1148	1333	

**Tabel 10.** Ketahanan deformasi campuran beraspal panas  $ACWC_{Polimer}$  dan  $ACWC_{RAP}$

Waktu	Lintasan	Hasil Pengujian untuk Benda Uji:							
		0% RAP (Aspal Polimer)		60% RAP		80% RAP		100% RAP	
		<i>Fresh</i>	STOA	<i>Fresh</i>	STOA	<i>Fresh</i>	STOA	<i>Fresh</i>	STOA
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	21	0,79	0,82	0,94	1,01	0,66	0,44	0,44	0,39
5	105	1,21	1,20	1,56	1,52	1,03	0,78	0,65	0,67
10	210	1,41	1,37	1,88	1,75	1,27	0,98	0,79	0,82
15	315	1,53	1,48	2,08	1,91	1,40	1,12	0,88	0,91
30	630	1,77	1,66	2,47	2,16	1,67	1,39	1,04	1,09
45	945	1,92	1,77	2,75	2,32	1,84	1,53	1,16	1,20
60	1260	2,03	1,84	2,96	2,45	1,96	1,65	1,25	1,28
DO = RenDeformasi Awal, mm		0,650	0,750	0,700	0,850	0,600	0,350	0,400	0,300
RD = Kecepatan Deformasi, mm/menit		0,260	0,217	0,543	0,379	0,240	0,168	0,097	0,102
DS = Dinamis Stabilitas, lintasan/mm		5727	9000	3000	4846	5250	6300	7000	7875



**Gambar 5.** Hubungan kedalaman alur/deformasi dengan jumlah lintasan



**Gambar 6.** Ketahanan deformasi

Hasil pengujian dengan alat WTM pada campuran beraspal panas  $ACWC_{Polimer}$  dan  $ACWC_{RAP}$  disajikan pada Tabel 10, Gambar 5 dan Gambar 3. Pada Tabel 10, Gambar 5 dan Gambar 6 terlihat bahwa semakin banyak RAP yang digunakan pada campuran beraspal panas daur ulang maka makin tahan terhadap deformasi, baik untuk benda uji *fresh* maupun yang STOA. Namun demikian, bila membandingkan dengan ketahanan deformasi  $ACWC_{Polimer}$  maka terlihat bahwa untuk benda uji yang *fresh*  $ACWC$  dengan 100% RAP ketahanan deformasinya lebih tinggi dari ketahanan deformasi  $ACWC_{Polimer}$ , namun untuk benda uji yang STOA maka ketahanan deformasi  $ACWC_{Polimer}$  lebih tinggi dibandingkan ketahanan deformasi  $ACWC_{RAP}$ . Berdasarkan

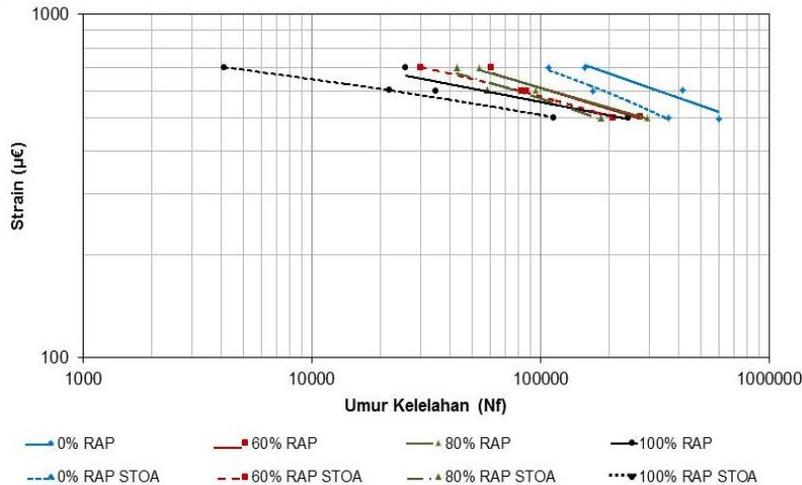
fakta tersebut, untuk kinerja ketahanan terhadap deformasi  $ACWC_{Polimer}$  lebih baik dibandingkan  $ACWC_{RAP}$ .

#### - Ketahanan terhadap retak leleh (fatik)

Hasil pengujian fatik campuran beraspal panas  $ACWC_{Polimer}$  dan  $ACWC_{RAP}$  disajikan pada Tabel 11 dan Gambar 7. Memperlihatkan Gambar 7 apabila regangan tarik izin adalah sebesar 100  $\mu\epsilon$  untuk campuran beraspal maka campuran beraspal panas polimer ( $ACWC_{Polimer}$ ) lebih tahan fatik dibandingkan dengan ketahanan fatik campuran beraspal panas daur ulang ( $ACWC_{RAP}$ ), baik untuk benda uji yang *fresh* maupun yang STOA.

**Tabel 11.** Ketahanan terhadap retak leleh (fatik)

No	0% RAP		60% RAP		80% RAP		100% RAP	
	Siklus	Strain	Siklus	Strain	Siklus	Strain	Siklus	Strain
1.	Tanpa Pengkondisian ( <i>Fresh</i> )							
	600250	498	272500	504	292470	501	242850	500
	419890	602	86540	600	95460	605	34830	599
2.	Dengan Pengkondisian ( <i>Short Term Oven Aging, STOA</i> )							
	156700	701	61000	701	53660	700	25730	702
	364470	501	206990	501	184450	500	114690	502
	168950	598	82800	599	58410	605	21940	601
	108900	700	29900	703	43060	699	4130	702



**Gambar 7.** Hubungan antara regangan dengan umur kelelahan

## PEMBAHASAN

Campuran beraspal panas lapis permukaan daur ulang ( $ACWC_{RAP}$ ) dibuat dengan bahan pengikat campuran aspal Pen 60 dengan bahan peremaja serta 3 (tiga) variasi campuran yang menggunakan RAP (60%, 80% dan 100%), dan dibuat juga campuran menggunakan agregat baru dengan bahan pengikat aspal polimer ( $ACWC_{Polimer}$ ) sebagai pembandingan.

Berdasarkan hasil pengujian bahan sebagaimana diuraikan sebelumnya, kadar aspal gabungan antara RAP kasar dan Rap halus adalah sebesar 4,47% dengan proporsi berat (43,04% : 56,96%), nilai penetrasi aspal dari RAP, nilai dari pengujian sifat agregat baru, sifat aspal pen 60/70 sifat bahan peremaja dan gradasi gabungan antara agregat baru dan agregat dari RAP, untuk variasi penggunaan RAP (0%, 60%, 80% dan 100%) memenuhi persyaratan sesuai yang ditetapkan berdasarkan spesifikasi khusus interim Bina Marga (SKh-1.6.27 tahun 2019). Sifat fisik aspal Polimer memenuhi persyaratan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2010 revisi 3 (2014).

Hasil pengujian Marshall, volumetrik dan stabilitas dinamis campuran beraspal panas daur ulang sampai dengan penggunaan 100% RAP masih memenuhi persyaratan berdasarkan spesifikasi khusus interim Bina Marga (SKh-1.6.27 tahun 2019) seperti yang terlihat pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Hasil pengujian ketahanan deformasi dengan alat WTM yang ditunjukkan dengan nilai stabilitas dinamis adalah dengan semakin banyak RAP yang digunakan pada campuran beraspal panas daur ulang maka makin tahan terhadap deformasi, baik untuk benda uji *fresh* maupun benda uji STOA. Apabila dibandingkan dengan kinerja ketahanan terhadap deformasi  $ACWC_{Polimer}$ , ketahanan terhadap deformasi  $ACWC_{Polimer}$  lebih baik dibandingkan  $ACWC_{RAP}$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan nilai kecepatan deformasinya pada Gambar 5 maka campuran beraspal panas daur ulang dengan 100% RAP baik untuk benda uji *fresh* maupun benda uji STOA akan mengalami kerusakan alur atau deformasi permanen yang paling lambat dibandingkan dengan yang lainnya. Semakin kecil nilai kecepatan deformasinya adalah akibat perkerasan semakin padat, dimana rongga yang ada didalam campuran beraspal panas daur ulang semakin berkurang sehingga nilai kecepatan deformasi akan semakin kecil.

Apabila membandingkan nilai stabilitas dinamis untuk benda uji *fresh* maupun benda uji STOA campuran beraspal panas  $ACWC_{RAP}$  dan  $ACWC_{Polimer}$  yang mengalami pengkondisian di laboratorium akan mengalami *aging* dan selanjutnya akan meningkatkan kekakuan campuran beraspal dan berbanding lurus dengan

peningkatan ketahanan campuran terhadap deformasi.

Hasil pengujian ketahanan retak leleh pada campuran beraspal panas  $ACWC_{RAP}$  dan  $ACWC_{Polimer}$  menggunakan alat *Beam Fatigue Apparatus* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 11 dan Gambar 7, dilakukan dengan menggunakan kontrol terhadap regangan sesuai dengan ketentuan AASHTO T 321-14, memperlihatkan bahwa pengujian STOA pada campuran beraspal panas  $ACWC_{RAP}$  dan  $ACWC_{Polimer}$  akan membuat aspal menjadi semakin keras atau getas sehingga campuran beraspal panas yang dikondisikan menjadi mudah retak. Apabila regangan tarik izin campuran beraspal adalah  $100 \mu\epsilon$  maka campuran  $ACWC_{RAP}$ , baik untuk benda uji yang *fresh* maupun yang STOA lebih tahan fatik daripada  $ACWC_{Polimer}$ . Membandingkan antara ketiga  $ACWC_{RAP}$  (60%, 80% dan 100%) yang menggunakan 100% RAP yang paling tahan terhadap fatik daripada  $ACWC_{RAP}$  lainnya.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pada skala laboratorium dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu: Semua bahan yang digunakan, yaitu agregat baru, RAP, aspal polimer aspal Pen 60/70 dan bahan peremaja memenuhi persyaratan.

Semua sifat campuran beraspal memenuhi persyaratan. Nilai stabilitas  $ACWC_{Polimer}$  adalah setara dengan ACWC dengan 100% RAP, namun untuk nilai stabilitas dengan benda uji dikondisikan (STOA) diperoleh stabilitas ACWC dengan 100% RAP lebih tinggi. Stabilitas ACWC dengan 60% RAP dan 80% RAP lebih rendah dari stabilitas  $ACWC_{Polimer}$ . Stabilitas dengan benda uji STOA  $ACWC_{Polimer}$  setara dengan ACWC dengan 80% RAP, sedangkan untuk ACWC dengan 60% RAP masih lebih rendah dari stabilitas  $ACWC_{Polimer}$ .

Semua campuran memiliki nilai stabilitas dinamis  $> 2500$  lintasan/mm atau memenuhi persyaratan.  $ACWC_{RAP}$  dengan penggunaan RAP makin banyak maka lebih tahan terhadap deformasi, baik untuk benda uji *fresh* maupun yang STOA. ACWC dengan 100% RAP lebih tinggi dari ketahanan deformasi  $ACWC_{Polimer}$ , namun untuk benda uji yang STOA maka

ketahanan deformasi  $ACWC_{Polimer}$  lebih tinggi daripada campuran beraspal lainnya. Berdasarkan fakta tersebut, untuk kinerja ketahanan terhadap deformasi  $ACWC_{Polimer}$  lebih baik dibandingkan  $ACWC_{RAP}$ . Dengan mengacu terhadap regangan tarik izin campuran beraspal sebesar  $100 \mu\epsilon$  maka campuran  $ACWC_{RAP}$ , baik untuk benda uji yang *fresh* maupun yang STOA lebih tahan fatik daripada  $ACWC_{Polimer}$ . Membandingkan antara ketiga  $ACWC_{RAP}$  yang menggunakan 100% RAP yang paling tahan terhadap fatik daripada  $ACWC_{RAP}$  lainnya.

Pengondisian dan penuaan jangka pendek (*short term aging*) berpengaruh pada ketahanan alur dan fatik campuran beraspal panas daur ulang, sehingga hasil penelitian ini disarankan dipakai sebagai bahan penyempurnaan pedoman perancangan campuran beraspal panas daur ulang.

### Saran

Untuk membuktikan pengondisian jangka pendek berpengaruh pada ketahanan alur dan fatik campuran beraspal panas daur ulang, sehingga disarankan perlu diambil contoh blok di lapangan sesaat setelah proses pemadatan campuran beraspal panas selesai dilakukan selanjutnya dilakukan pengujian sifat fisik campurannya, apakah sifat fisik campuran beraspal panas sama dengan proses pengondisian jangka pendek di laboratorium.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Direktur Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kepala Balai Bahan Jalan dan Kepala Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan yang telah mendukung sehingga makalah ini dapat terwujud.

### DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2012. "Standard Method of Test Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending". AASHTO T 321-14. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing 32<sup>nd</sup> Edition*. Part 2B Tests. Washington, D.C.: AASHTO.

- \_\_\_\_\_. 2014. "Standar Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)". AASHTO R 30-02, 2010. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing 34<sup>th</sup> Edition. Part 1B Specification*. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Society for Testing and Material. 2014. "Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus". ASTM D6926-2010. *Annual Book of ASTM Standards, section 04, volume 04.03. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement System*. West Conshohocken: ASTM International.
- Brett T.C.R, Williams A, and Copeland A. 2018. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017*. Natioanl Asphalt Pavement Association Information Series., vol. 8th, no. 138 (8th edition). Lanham, Maryland.
- Euro Asphalt Pavement Association (EAPA). 2018. *Asphalt in Figures 2017*. Euro Asphalt Pavement Association. Brussels: Belgium
- Hamdani, D dan Nono. 2017. Pengaruh Pengkondisian Campuran Beraspal Panas Terhadap Ketahanan Alur dan Fatik. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 34(2): 103-113.
- Indonesia. 2014. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi 3*. Jakarta: Ditjen Bina Marga Kementerian PU.
- \_\_\_\_\_. 2019. *Spesifikasi Khusus Interim Campuran Beraspal Panas Daur Ulang Pencampuran di Unit Pencampuran di Inis Produksi Campuran Aspal (Skh-1.6.27)*. Jakarta: Ditjen Bina Marga Kementerian PUPR.
- Japan Road Association (JRA). 2005. *Technical Guideline for Pavement Design and Construction*. JRA.
- Morian, N., Hajj, E., and Sebaaly P. 2013. *Significance of mixture on binder aging in HMA mixtures*. Proceedings of 92nd Annual Meeting of Transportation Research Record, Washington, DC: USA.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). 2019. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2018*. Natioanl Asphalt Pavement Association-Information Series 138 (9th edition). NAPA: Maryland.
- Navarro, M., Sanchez, S., Trave, G., and Gamez, M. 2018. Fatigue cracking in asphalt mixtures: The effects of ageing and temperature. *Journal Road Materials and Pavement Design* 19(3): 561–57. DOI: 10.1080/14680629.2018.1418717
- Omranian, S., Hamzah, M., Pipintakos, G., Van Den Bergh W., Vuye, C., Hasan, M., and Rosli M. 2020. Effects of Short-Term Aging on the Compactibility and Volumetric Properties of Asphalt Mixtures Using the Response Surface Method. *MDPI Journal Sustainability*. 12 (15), 6181.
- Rathore M, Zaumanis M, and Haritonovs V. 2019. *Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 660. 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2019). Riga: Latvia. doi:10.1088/1757-899X/660/1/012046
- Rowe, G., Blankenship, P., and Bennert, T. 2012. *Fatigue Assessment of Conventional and Highly Modified Asphalt Materials with ASTM and AASHTO Standard Specifications*. 3rd 4PBB Conference. 113-122. DOI: 10.1201/b12767-14.
- Sirin, O., Paul, D.K., and Emad K. 2018. State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives. *Advances in Civil Engineering*. DOI: 10.1155/2018/3428961
- West R.C, Michael J, Turochy R, and Maghsoodloo S. 2011. Use of Data from Specific Pavement Studies Experiment 5 in the Long-Term Pavement Performance Program to Compare Virgin and Recycled Asphalt Pavements. *Journal of the Transportation Research Board* No. 2208 (82–89). DOI:10.3141/2208-11
- Willis, J. R., Turner P., Julian G., Taylor A. J, Tran N and Padula F. 2012. *Effect of Changing Virgin Binder Grade and Content on RAP Mixture Properties*. National Center for Asphalt Technology Report No. 12-03. Alabama:USA.
- Yin F, Martin E, Mercado A, and Newcomb D. 2018. *Short-Term Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures*. Transportation Research Circular No E-C234: 21-33. Transportation Research Board. Washington DC: USA.