

CAMPURAN BERASPAL MENGGUNAKAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DAN AGREGAT SLAG BAJA

Rindu Twidi Bethary
Program Doktor
Fakultas Teknik Sipil dan
Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha No. 10
Bandung 40132
rindutwidibethary@gmail.com

Bambang Sugeng Subagio
Program Doktor
Fakultas Teknik Sipil dan
Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha No. 10
Bandung 40132
bsugengs@si.itb.ac.id

Harmein Rahman
Program Doktor
Fakultas Teknik Sipil dan
Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha No. 10
Bandung 40132
rahman@trans.si.itb.ac.id

Abstract

Material constraints and increasing demand for road construction materials have resulted in high construction costs and road rehabilitation, so alternative materials are needed, such as recycled asphalt and potential waste utilization, such as steel slags. This study is a literature study, with the aim of evaluating and controlling the performance of asphalt mixtures using Reclaimed Asphalt Pavement and steel slag, as a substitute for aggregate. The Reclaimed Asphalt Pavement material generally has aging which causes an increase in stiffness during the structural life and reduced adhesion to asphalt. This can be prevented by steel slag material, which has a rough surface and texture, so as to prevent cracks due to internal friction of the mixture. The overall use of Reclaimed Asphalt Pavement materials and steel slag can improve mixture performance and resistance to fatigue.

Keywords: asphalt mixture, reclaimed asphalt pavement, steel slag, flexible pavement

Abstrak

Keterbatasan material dan meningkatnya permintaan material konstruksi jalan menyebabkan tingginya biaya pembangunan maupun rehabilitasi jalan, sehingga diperlukan material alternatif, seperti daur ulang aspal dan pemanfaatan potensi limbah, seperti slag baja. Penelitian ini merupakan suatu kajian literatur, dengan tujuan melakukan evaluasi dan pengendalian kinerja campuran beraspal yang menggunakan *Reclaimed Pavement Asphalt* (RAP) dan slag baja sebagai bahan pengganti agregat. Material RAP umumnya telah mengalami penuaan yang menyebabkan peningkatan kekakuan selama umur struktur dan sifat adhesi terhadap aspal berkurang. Hal ini dapat dicegah oleh material slag baja, yang memiliki permukaan dan tekstur yang kasar, sehingga dapat mencegah terjadinya retak akibat gesekan internal campuran. Penggunaan material RAP dan slag baja secara keseluruhan dapat meningkatkan kinerja campuran dan ketahanan terhadap kelelahan.

Kata-kata kunci: campuran beraspal, *reclaimed pavement asphalt*, slag baja, perkerasan lentur

PENDAHULUAN

Penggunaan produk sampingan kegiatan industri dan sektor konstruksi menjadi suatu bahan baku alternatif pembangunan jalan menjadi isu yang penting dalam beberapa tahun terakhir. Kegiatan pembangunan dan pemeliharaan jalan beraspal di Indonesia memerlukan aspal sekitar 1,3 juta ton per tahun (Affandi dan Kusnianti, 2013). Indonesia sendiri saat ini hanya mampu menghasilkan aspal sebanyak 900.000 ton per tahun,

sehingga masih harus mengimpor aspal memenuhi kekurangan aspal tersebut (Illyin, 2012).

Keterbatasan material bahan jalan mendorong penggunaan bahan daur ulang perkerasan. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) merupakan bahan alternatif yang berguna untuk digunakan sebagai bahan perkerasan jalan karena mengurangi penggunaan agregat alam dan bahan pengikat aspal baru, yang diperlukan untuk membuat campuran beraspal (Copeland, 2011). RAP juga dapat merehabilitasi dan/atau mengganti struktur perkerasan yang mengalami deformasi permanen dan kerusakan secara struktural (Valdes et al., 2011). Selain agregat yang terdapat dalam RAP, salah satu agregat buatan yang juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan jalan adalah limbah slag baja.

Penggunaan slag baja sebagai agregat dalam konstruksi jalan dapat menghasilkan umur kelelahan yang lebih baik. Hal tersebut disebabkan tingginya kekurusan agregat slag baja yang mencegah terjadinya retak akibat gesekan internal pada campuran. Tingginya adhesi antara aspal dan slag baja memperlambat retak yang berpotensi terjadi dan meningkatkan ketahanan campuran terhadap kelelahan (Kavussi et al., 2015).

Penggunaan RAP dan slag baja pada campuran beraspal panas dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan. Berdasarkan model evaluasi kerusakan linier dan didukung dengan kriteria keruntuhan, terjadi kerusakan yang lebih rendah pada campuran yang mengandung RAP dan slag dibandingkan dengan campuran. Sedangkan campuran beraspal dengan kadar 35% slag baja dan 20% RAP, tanpa menggunakan aditif khusus untuk meremajakan RAP, secara keseluruhan dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal tersebut (Rapseiras et al., 2016).

Meskipun teknologi dengan memanfaatkan RAP dan slag baja sudah memiliki banyak manfaat, di Indonesia teknologi ini belum banyak dikenal. Pada makalah ini dilakukan kajian pustaka terhadap penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yang meliputi ketahanan campuran RAP dan slag baja terhadap deformasi permanen dan kinerja campuran apabila RAP yang digunakan diberi bahan aditif khusus. Tujuan yang ingin dicapai adalah tersedianya informasi yang lengkap tentang potensi penggunaan RAP dan slag baja sebagai material untuk membuat beton aspal yang akan digunakan sebagai lapisan-lapisan pada perkerasan lentur.

Lapis beton aspal (Laston) adalah lapisan penutup konstruksi perkerasan jalan yang mempunyai nilai struktural. Beton aspal (*Asphalt Concrete*, AC) ini mula-mula dikembangkan oleh Asphalt Institute di Amerika Serikat. Menurut Bina Marga, campuran beton aspal terdiri atas agregat bergradasi menerus dan aspal keras, yang dicampur, dihamparkan, dan dipadatkan dalam keadaan panas pada temperatur tertentu. Temperatur pencampuran ditentukan berdasarkan jenis dan karakteristik aspal yang digunakan. Sedangkan yang dimaksud gradasi menerus adalah komposisi yang menunjukkan pembagian butir yang merata mulai dari ukuran yang terbesar sampai dengan ukuran yang terkecil.

Terdapat 3 jenis lapisan beton aspal (Laston atau Lapis AC), yaitu Laston Lapis Aus (*Asphalt Concrete-Wearing Course* atau AC-WC), Laston Lapis Permukaan Antara (*Asphalt Concrete-Binder Course* atau AC-BC), dan Laston Lapis Pondasi (*Asphalt*

Concrete-Base atau AC-Base). Lapis AC-BC merupakan lapisan yang terletak di antara lapis pondasi dengan lapis aus, yang umumnya digunakan untuk jalan dengan beban lalu lintas yang berat. Fungsi lapis AC-BC adalah untuk mengurangi tegangan dan menahan beban yang berasal dari beban lalu lintas, sehingga harus mempunyai kekuatan yang cukup.

Material Daur Ulang

Secara umum perkerasan daur ulang memanfaatkan kembali material (agregat dan aspal) perkerasan lama untuk dijadikan perkerasan baru, dengan penambahan agregat baru dan/atau bahan peremaja. Untuk mencapai hasil yang memadai, aspal dan agregat lama perlu diperbarui, baik sifat-sifat maupun gradasinya (Novita et al., 2011). Aspal RAP secara signifikan telah mengalami penuaan pada saat diproduksi, saat memberi pelayanan terhadap beban kendaraan, dan akibat pengaruh lingkungan saat menjadi lapisan atau struktur perkerasan. Karena aspal telah teroksidasi dan mengalami kelelahan, aspal pada RAP menjadi lebih keras (O'Sullivan, 2011).

Material RAP umumnya dicampur dengan berbagai kadar agregat dan aspal baru untuk menghasilkan campuran beraspal baru. Campuran RAP dapat digunakan pada lapisan perkerasan yang lebih rendah, seperti lapis permukaan antara (*Asphalt Concrete-Binder Course* atau AC-BC), untuk memberikan peningkatan kekuatan terhadap beban lalu lintas (Al-Qadi et al., 2012). Menurut Asphalt Institute (1993), penggunaan RAP dalam campuran beraspal panas adalah sekitar 10%-35%, untuk unit produksi jenis takaran, dan sekitar 10%-50%, untuk unit produksi jenis drum, dengan rentang penggunaan dalam campuran adalah 40% RAP.

Slag Baja

Slag baja adalah batuan kasar berbentuk kubikal tidak teratur, yang terbentuk dari mineral-mineral yang digunakan sebagai pemurnian baja dari dapur tinggi. Batuan slag baja mempunyai kekerasan yang tinggi dan permukaan yang kasar (Hartati, 2009). Slag baja memiliki permukaan dengan tekstur yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat biasa. Karena porositas permukaan slag baja yang tinggi, lebih banyak aspal yang dapat diserap oleh slag baja ini.

Dari hasil pengujian diketahui bahwa slag baja mengandung aluminium oksida bersama-sama dengan unsur logam lainnya, yang dalam slag baja merupakan kontributor perlawanan abrasif tinggi. Unsur CaO dan SiO₂ menyiratkan bahwa slag baja secara substansial bersifat basa, dan hal ini tentu akan memberikan sifat adhesi slag baja di campuran beraspal (Kavussi et al., 2015).

Beberapa negara sudah banyak memproduksi slag baja untuk digunakan dalam campuran beraspal. Satu di antara negara-negara tersebut adalah Australia. Di negara ini material slag baja ini telah mempunyai kualitas yang seragam dan memenuhi standar ISO 9000. Terdapat beberapa jenis slag baja beserta kegunaannya, seperti: (i) untuk agregat campuran semen serta bahan stabilisasi tanah dan pondasi; (ii) untuk bahan lapis pondasi,

agregat penutup, dan agregat campuran beraspal; dan (iii) untuk campuran beraspal, pondasi, dan timbunan.

Parameter Mekanistik Campuran Beraspal

Pendekatan mekanistik berusaha untuk menjelaskan suatu fenomena hanya dengan mengacu pada penyebab fisik. Dalam desain perkerasan, fenomena tersebut adalah tegangan, regangan, dan lendutan pada struktur perkerasan, sedangkan penyebab fisik adalah beban dan sifat material struktur perkerasan.

Hubungan antara fenomena dan penyebab fisik biasanya dijelaskan dengan menggunakan model matematika. Seiring dengan pendekatan mekanistik, unsur empiris digunakan untuk mengetahui pengaruh tegangan, regangan, dan lendutan terhadap kegagalan perkerasan. Menurut Yamin (2004), beberapa parameter yang diperlukan dalam metode mekanistik, baik untuk perancangan maupun untuk melakukan evaluasi struktural campuran beraspal, adalah: (1) modulus kekakuan aspal; (2) modulus kekakuan campuran beraspal; (3) Angka Poisson aspal dan campuran beraspal; (4) ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi permanen; dan (5) ketahanan campuran beraspal terhadap beban berulang (*fatigue*).

PEMBAHASAN

Pemilihan Material RAP dan Slag Baja

Secara umum lebih dari 90% dari seluruh panjang jalan di Indonesia menggunakan teknologi perkerasan lentur atau perkerasan beraspal. Setiap tahun pembangunan dan pemeliharaan perkerasan beraspal ini selalu memerlukan aspal yang berasal dari impor. Salah satu alternatif untuk mengatasi kendala kekurangan aspal adalah pemanfaatan RAP, khususnya untuk pekerjaan pemeliharaan perkerasan beraspal, dengan menggunakan metode *cut and fill* (Nono, 2015). Metode ini merupakan suatu *green technology* karena memanfaatkan limbah yang berasal dari perkerasan jalan lama.

RAP yang digunakan pada campuran beraspal cenderung mengalami peningkatan. Pada tahun 2009 penggunaan RAP adalah 15,6%, yang meningkat sampai 20,4% pada tahun 2014, dengan perkiraan berat RAP yang digunakan di campuran beraspal adalah 71.900.000 ton. Dengan asumsi kandungan aspal pada RAP sekitar 5%, berat RAP pada tahun 2014 mewakili sekitar 3,6 juta ton aspal dan 68 juta ton agregat alami. Kombinasi ini dapat menghemat campuran beraspal, sehingga biaya membuat campuran untuk perkerasan beraspal lebih kompetitif (Hansen dan Copeland, 2014).

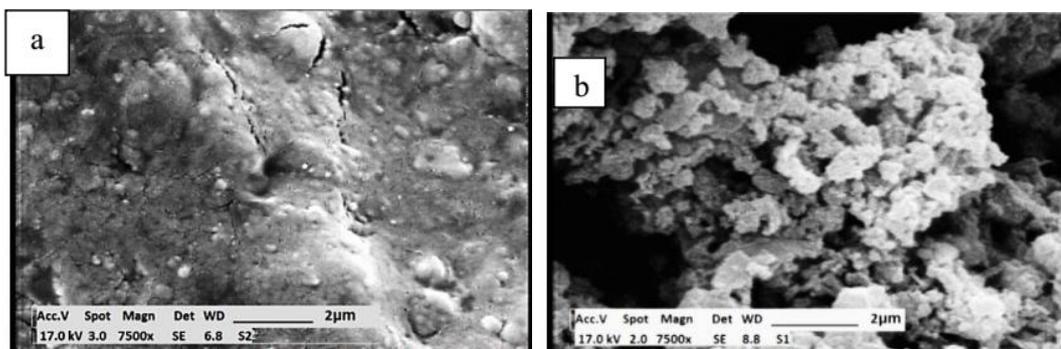
Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja optimum campuran yang menggunakan RAP terjadi pada campuran yang dengan kadar RAP sekitar 30%. Campuran dengan RAP ini mempunyai ketahanan yang baik terhadap kerusakan *creep* dan memiliki resistensi terhadap kelembapan. Sedangkan campuran dengan RAP lebih besar dari 50% mempunyai kinerja yang kurang baik, karena terjadi penurunan pada sifat kohesi (Ayman

et al., 2015). Material RAP ini telah mengalami penurunan sifat fisik akibat beban lalu lintas selama masa layannya, sehingga sifat-sifat aspal tersebut perlu dipulihkan. Karena itu, aspal yang terkandung dalam RAP, yang sudah mengalami penuaan, harus ditambah bahan peremaja yang mengandung senyawa aromatik ringan untuk menggantikan senyawa aromatik ringan yang menguap atau teroksidasi pada RAP.

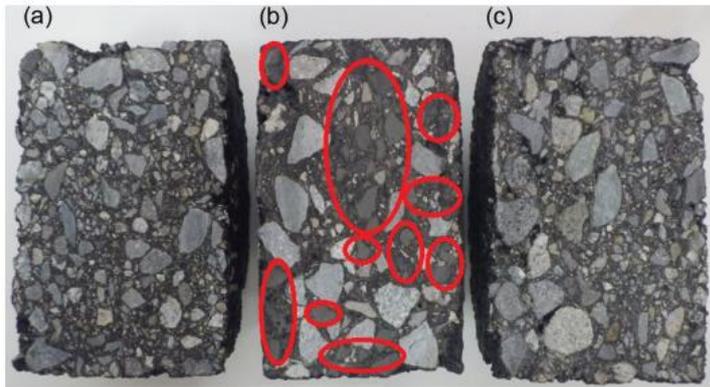
Aspal RAP telah mengalami penuaan secara signifikan pada saat diproduksi, pada saat memberikan pelayanan, dan akibat pengaruh lingkungan saat menjadi lapisan atau struktur perkerasan. Penuaan tersebut menyebabkan berkurangnya sifat adhesi, sehingga ikatan yang terjadi antara agregat dengan aspal akan berkurang. Sifat adhesi ini dapat dikembalikan dengan menggunakan slag baja sebagai pengganti agregat. Dilihat dari berbagai studi mengenai slag baja, penggunaan slag baja sebagai agregat dalam campuran beraspal akan menghasilkan ketahanan terhadap kelelahan yang lebih baik. Peningkatan tersebut disebabkan tingginya kekurusan agregat slag baja yang dapat mencegah terjadinya retak yang disebabkan gesekan internal pada campuran. Tingginya adhesi antara aspal dan slag baja juga meningkatkan umur kelelahan campuran dengan memperlambat retak.

Slag baja memiliki permukaan yang kasar dan tekstur yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat alami (terlihat pada Gambar 1). Porositas permukaan slag baja yang tinggi menyebabkan aspal dapat lebih banyak terserap, sehingga adhesi dengan aspal akan lebih kuat (Kavussi et al., 2015).

Penggunaan agregat slag baja ditambah dengan RAP dalam campuran beraspal dapat meningkatkan nilai stabilitas Marshal dan Marshall Quotient (MQ). Penggunaan 35% slag baja dan 20% RAP memberikan kinerja yang optimum. Sedangkan karakteristik fisik slag baja dan karakteristik fisik RAP tidak menunjukkan perbedaan yang besar dan tetap berada dalam kisaran normal mendekati karakteristik agregat biasa. Namun slag baja menunjukkan kepadatan yang lebih tinggi karena kandungan oksida dan penyerapan air yang rendah, karena struktur kristalnya sehingga memiliki abrasi yang lebih baik dibandingkan dengan agregat lain. Gambar 2 yang menunjukkan kepadatan campuran dengan berbagai tipe agregat.



Gambar 1 Karakteristik Morfologi Berdasarkan SEM: a) agregat; b) slag (Kavussi et al., 2015)



Gambar 2 Perbedaan Agregat dalam Campuran: a) 100% Agregat Alami; b) 45% Agregat-20% RAP-35% Slag; c) 80% agregat-20% RAP (Raposeiras et al., 2016)

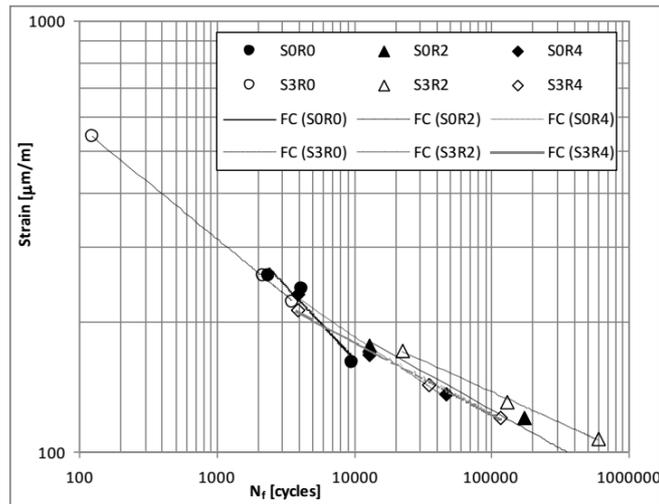
Rancangan Campuran Beraspal Panas

Pembuatan rancangan campuran beraspal panas dimulai dari pengujian karakteristik aspal dengan penetrasi 60/70, agregat baru, RAP, dan slag baja. Gradasi yang digunakan sebagai acuan adalah gradasi Laston Lapis Permukaan Antara (AC-BC), yang ditentukan dalam Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Direktorat Jenderal Bina Marga Tahun 2010 Revisi 3. Demikian juga dengan acuan standar campuran yang digunakan, yang juga mengacu pada ketentuan sifat-sifat campuran Laston Lapis Permukaan Antara (AC-BC) Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Bina Marga Tahun 2010 Revisi 3. Sedangkan untuk pengujian slag baja didasarkan pada Pedoman Penggunaan Agregat Slag Untuk Campuran Beraspal Panas Pd T-04-2005-B.

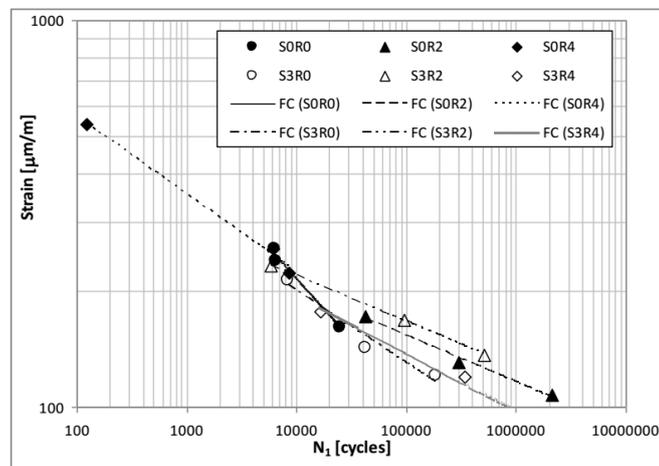
Sebelum membuat rancangan campuran, harus ditentukan gradasi agregat yang akan digunakan. Pada penelitian ini jenis gradasi campuran mengacu kepada amplop gradasi agregat gabungan untuk campuran beraspal AC Lapis Permukaan Antara (AC-BC). Gradasi yang digunakan pada penelitian ini adalah gradasi tengah, yang merupakan nilai tengah rentang gradasi. Sedangkan penentuan variasi campuran material RAP dan slag baja didasarkan pada hasil studi literatur penelitian-penelitian sebelumnya.

Kinerja campuran beraspal menggunakan material RAP dan slag baja dapat menyebabkan ketahanan lelah dan nilai modulus yang paling besar pada campuran 30% slag dan 20% RAP. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Sedangkan Raposeiras et al. (2016) menyatakan bahwa rancangan campuran panas yang menggunakan material *copperslag* (cs) dengan kadar 25% memiliki nilai stabilitas yang hampir sebanding dengan nilai stabilitas campuran kontrol. Terdapat perbedaan sekitar 10% pada nilai MQ, tetapi kekuatan tarik tidak mengalami peningkatan yang signifikan, karena peningkatan yang terjadi hanya sekitar 8%. Sedangkan untuk campuran dengan 35% *copperslag* mengalami peningkatan nilai kinerja campuran tetapi juga mengalami penurunan nilai daktilitas. Sementara itu kombinasi penggunaan campuran 35% slag baja dengan 20% RAP mengalami peningkatan kinerja campuran beraspal secara keseluruhan, walaupun RAP digunakan tanpa tambahan aditif khusus untuk meremajakan.



Gambar 3 Fatigue Life N_f versus Initial Strain



Gambar 4 Fatigue Life N_1 versus Initial Strain

Untuk memperoleh campuran beraspal dengan menggunakan RAP dan slag baja, dilakukan subtahapan sebagai berikut:

- 1) Subtahap I; perancangan campuran beraspal panas konvensional, dengan tujuan untuk mendapatkan kinerja campuran panas sebagai kontrol terhadap campuran beraspal yang menggunakan RAP dan slag baja.
- 2) Subtahap 2; perancangan campuran dengan menggunakan RAP dan bahan peremaja, dengan tujuan mengetahui pengaruh bahan peremaja terhadap karakteristik aspal, mengetahui kadar optimum bahan peremaja yang ditambahkan kepada aspal terkait dengan karakteristik aspal dalam hal penetrasi dan titik lembek, dan mengetahui persentase RAP optimum dalam campuran.
- 3) Subtahap 3; perancangan campuran dengan menggunakan RAP, bahan peremaja, dan slag baja, dengan tujuan mengetahui pengaruh slag baja yang digunakan sebagai bahan pengganti agregat terhadap kinerja campuran beraspal dan mengetahui kadar slag baja optimum yang ditambahkan ke campuran beraspal panas.

- 4) Subtahap 4; perancangan campuran dengan menggunakan RAP, bahan peremaja, dan slag baja, dengan tujuan mengetahui pengaruh kombasi RAP dan slag baja yang digunakan sebagai bahan pengganti agregat terhadap kinerja campuran beraspal dan mengetahui kadar slag baja optimum ketika dikombinasikan dengan menggunakan RAP yang ditambahkan ke campuran beraspal panas.

Setelah diketahui kadar aspal optimum pada masing-masing variasi campuran beraspal, dilakukan rancangan campuran beraspal dengan Kadar Aspal Optimum (KAO). Campuran ini selanjutnya diuji lebih lanjut dengan peralatan yang sesuai, untuk mengetahui karakteristik campuran. Sebagai contoh, untuk mendapatkan modulus resilien benda uji dapat digunakan alat UMMATA, untuk mendapatkan ketahanan terhadap deformasi digunakan Universal Testing Machine (UTM), dan untuk mendapatkan ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*) digunakan metode Four Point Bending.

KESIMPULAN

Penggunaan material RAP merupakan suatu *green technology* dalam konstruksi jalan, dengan cara memanfaatkan limbah jalan. Selain itu, penggunaan RAP menghemat material aspal dan agregat yang digunakan dalam konstruksi jalan.

Penggunaan slag baja sebagai material pengganti agregat diharapkan dapat menghemat material yang digunakan dalam konstruksi jalan. Hal ini juga berpotensi mengurangi limbah yang dihasilkan oleh produksi baja.

Material yang terkandung dalam RAP sudah mengalami penuaan, yang mengakibatkan berkurangnya sifat adhesi, dan perubahan pada gradasi agregat. Sedangkan slag baja memiliki permukaan yang kasar, sehingga dapat mencegah potensi terjadinya retak yang disebabkan oleh gesekan internal campuran. Sifat inilah yang diharapkan dapat menutupi kekurangan material RAP.

Penggunaan material RAP dan slag baja mencapai optimum pada kadar RAP (20-25)% dan kadar slag baja (25-35)%. Secara keseluruhan pada kondisi optimum ini terjadi peningkatan kinerja campuran beraspal dan ketahanan terhadap kelelahan.

Teknologi campuran beraspal panas menggunakan material alternatif pemanfaatan hasil daur ulang perkerasan lama (RAP), sebagai material perkerasan, dan slag baja, sebagai bahan pengganti agregat, merupakan suatu teknologi yang relatif baru. Karakteristik yang terdapat pada kedua material ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal, yang dinyatakan dalam parameter Marshall dan ketahanan terhadap kelelahan.

DAFTAR PUSTAKA

Affandi, F. dan Kusnianti, N. 2013. *Kinerja Perkerasan Campuran Beraspal Hangat yang Mendukung Pembangunan Berwawasan Lingkungan*. Konferensi Regional Teknik Jalan (KRTJ) 12. Bandung.

- Al-Qadi, I.L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S.H., Pine, W.J., dan Trepanier, J. 2012. *Impact of High RAP Contents on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures*. Research Report FHWA-ICT-12-002. Illinois Center for Transportation. Urbana-Champaign, IL: University of Illinois.
- Asphalt Institute. 1993. *Mix Design Method for Asphaltic Concrete and Other Hot Mix Types*. Manual Series No. 2. Lexington, KY.
- Ayman A., Mawjoud, A. dan Ismaeel, N.A. 2015. *Effects of Level of Reclamation on the Properties of Hot Mix Asphalt Concrete*. International Journal of Scientific Research in Knowledge, 3 (6): 162-171.
- Copeland, A. 2011. *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Report No. FHWA-HRT-11-021. McLean, VA.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2014. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi 3*. Jakarta.
- Hansen, K.R. dan Copeland, A. 2014. *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm Mix Asphalt Usage: 2009-2013*. Final Report. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.
- Hartati, F.Y.M. 2009. *Studi Pengaruh Steel Slag Sebagai Bahan Pengganti Agregat Kasar pada Campuran beraspal Beton terhadap Workabilitas dan Durabilitas*. Rekayasa Sipil, 5 (1): 20-28.
- Ilyin, A.B. 2012. *Produksi Aspal dari Asbuton dengan Ekstraksi Menggunakan Asam Asetat*. Skripsi tidak diterbitkan. Depok: Universitas Indonesia.
- Kavussi, A., Qazizadeh, M.J., dan Hassani, A. 2015. *Fatigue Behavior Analysis of Asphalt Mixes Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 3 (1): 74-86.
- Nono. 2015. *Pengaruh Bahan Peremaja Terhadap Kinerja Campuran Beraspal Panas Bergradasi Menerus Menggunakan Daur Ulang Perkerasan Beraspal*. Jurnal Jalan-Jembatan, 33 (1): 27-42.
- Novita, P., Subagio, B.S. dan Rahman, H. 2011. *Kinerja Kelelahan Campuran Beton Aspal*. Jurnal Transportasi, 11 (3): 163-172.
- O'Sullivan, K.A. 2011. *Rejuvenation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Hot Mix Asphalt Recycling with High RAP Content*. Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute.
- Raposeiras, A.C., Cerón, A.V., Quesada, D.M., dan Fresno, D.C. 2016. *Effect of Copper Slag Addition on Mechanical Behavior of Asphalt Mixes Containing Reclaimed Asphalt Pavement*. Construction and Building Materials, 119: 268-276.
- Valdes, G., Jimenez, F.P., Miro, R., Martinez, A. dan Botella, R. 2011. *Experimental Study of Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, 25 (3): 1289-1297.

Yamin, A. 2004. *Model Mekanistik Cement Treated Asphalt Mixture dan Kinerjanya pada Iklim Tropis Indonesia*. Disertasi Program Doktor (tidak diterbitkan). Bandung: Institut Teknologi Bandung.