



Analisis Karakteristik Campuran Laston Menggunakan Material Perkerasan Jalan Lama Dengan Peremaja Limbah Minyak Goreng

*I Nyoman Arya Thanaya, I Made Agus Ariawan, I Putu Chandra Wibawa

Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana

*aryathanaya@unud.ac.id

Received: 6 Agustus 2022 Revised: 16 Januari 2023 Accepted: 18 Januari 2023

Abstract

One alternative way to reduce the use of natural aggregate and asphalt is the use of recycled materials of old road pavement or Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The asphalt within the RAP generally had become stiffer due to ageing, therefore it needs to be mixed with a rejuvenating agent. An alternative organic oil-based refining agent that can be used for rejuvenating rigid asphalt is Waste Cooking Oil (WCO). The purpose of this study is to analyze the characteristics of asphalt mixtures at Optimum Bitumen Content (OBC) and at best WCO content. The asphalt mixture manufacturing method used was Marshall Method. The variation of RAP materials was 25% and 50%, with added aggregate material to meet the ideal mid gradation. For each variation of RAP content, was produced mixtures with variation of of 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% (by weight of total asphalt) where for each of those variation of RAP with variations of WCO rejuvenating materials, were made asphalt content variation of 5%; 5.5%; 6%; 6.5%; and 7%, then the OBC was determined. For the mixture with 50% RAP, the OBC was 6.3%, with best result on 8% WCO. On mixture with 25% RAP the OBC was 6.2%, with best result on 4% WCO. The Marshall characteristics met the specifications. The mixture of 50% RAP with 8% WCO has lower stiffness and deformation resistance, however the performance of this mixture was good enough on fatigue test.

Keywords: RAP, WCO, marshall, ITSM, creep, ITFT

Abstrak

Salah satu alternatif cara mengurangi penggunaan agregat alam dan aspal adalah penggunaan material daur ulang seperti material perkerasan jalan lama atau RAP. Aspal dalam RAP umumnya lebih kaku karena proses penuaan, sehingga perlu dicampur dengan bahan peremaja. Alternatif bahan peremaja berbasis minyak organik yang dapat digunakan untuk peremajaan aspal yang bersifat kaku adalah limbah minyak goreng/ Waste Cooking Oil (WCO). Tujuan penelitian ini menganalisis karakteristik campuran beraspal pada Kadar Aspal Optimum (KAO) dan kadar WCO terbaik. Metode pembuatan campuran beraspal yang digunakan Metode Marshall. Variasi material RAP adalah 25% dan 50%, dengan tambahan agregat untuk memperoleh gradasi ideal. Pada setiap variasi penggunaan material RAP dibuat variasi campuran dengan peremaja WCO 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% (berat aspal total), dimana untuk setiap variasi RAP dengan variasi bahan peremaja WCO, dibuat variasi kadar aspal 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; serta 7%. Kemudian nilai KAOnya ditentukan. Pada campuran dengan 50% RAP diperoleh KAO 6,3%, dan hasil terbaik pada peremaja WCO 8%. KAO pada campuran dengan 25% RAP adalah 6,2%, dengan pilihan peremaja 4% WCO. Karakteristik Marshall campuran memenuhi spesifikasi. Campuran dari 50% RAP dengan 8% WCO memiliki kekakuan dan ketahanan deformasi lebih rendah, namun demikian kinerja campuran ini cukup baik pada uji kelelahan.

Kata kunci: RAP, WCO, marshall, ITSM, rangkai, ITFT

Pendahuluan

Kebutuhan material agregat dan aspal untuk pekerjaan konstruksi perkerasan jalan meningkat

seiring peningkatan jalan dan pemeliharaan jalan. Ketersediaan agregat dan aspal akan sulit diperoleh karena keterbatasan sumber agregat di alam akibat penggunaan agregat dari alam secara terus menerus

untuk pekerjaan konstruksi bangunan. Salah satu cara untuk mengurangi penggunaan material agregat dan aspal dari alam yaitu menggunakan kembali material perkerasan jalan lama/*Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Menurut Nono (2016) aspal dari material RAP bersifat kaku, sehingga untuk dapat digunakan kembali perlu ditambah bahan peremaja (*rejuvenator*). Bahan peremaja yaitu suatu bahan tambahan yang berfungsi untuk mengembalikan sifat-sifat aspal lama akibat penuaan aspal (Mohammadafzali *et al.*, 2017). Menurut Ahmed dan Hossain (2020) bahan peremaja dapat digunakan untuk melunakkan dan mengembalikan sifat kekentalan aspal pada RAP. Bahan peremaja aspal biasanya produk berbasis minyak bumi, berbasis minyak organik, berbasis aspal dengan tingkatan lebih lunak dari standar, atau rekayasa yang bertujuan untuk memulihkan sifat aspal yang buruk seperti sifat kaku dan kurang lunak (Zaumanis *et al.*, 2014; Borghi *et al.*, 2017).

Perlu diupayakan penggunaan bahan peremaja berbasis organik atau bahan peremaja yang dapat diperbaharui dan juga ramah terhadap lingkungan. Salah satu alternatif bahan peremaja berbasis minyak organik yang dapat digunakan untuk peremajaan aspal tua adalah WCO (Zagar *et al.*, 2012; Asli *et al.*, 2012; Taherkhani dan Noorian, 2019). Penambahan WCO ke bahan pengikat aspal dapat meningkatkan ketahanan kelelahan dan sifat retak campuran akibat suhu rendah, namun dapat mengurangi ketahanan terhadap deformasi. Penambahan WCO sebagai bahan peremaja dapat mengurangi ketahanan terhadap deformasi karena campuran akan menjadi lunak, sehingga diperlukan pada dosis yang cukup. Penggunaan persentase peremaja disesuaikan dengan banyaknya persentase aspal tua untuk campuran pengikat aspal atau banyaknya material RAP digunakan untuk campuran beraspal karena berpengaruh terhadap sifat kekakuan, ketahanan terhadap deformasi, maupun ketahanan retak akibat kelelahan (*fatigue*) atau retak akibat suhu rendah.

Penelitian ini berfokus pada campuran beraspal menggunakan material RAP dengan WCO. Peremaja yang akan digunakan untuk campuran beraspal menggunakan material RAP adalah peremaja berbasis minyak organik WCO bersumber dari restoran siap saji. WCO dari restoran siap saji dipilih karena tingkat homogenitas lebih baik dibandingkan dari hasil limbah pedagang kaki lima maupun limbah rumah tangga yang digunakan untuk menggoreng. Campuran beraspal yang akan dibuat adalah campuran jenis Laston/*Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) dengan gradasi sesuai spesifikasi Dep. PU (2020), selain itu material RAP yang digunakan bersumber dari lapisan permukaan jalan yang merupakan jenis

campuran Laston dari hasil ekstraksi RAP mendekati gradasi agregat AC-WC.

Campuran beraspal yang dibuat menggunakan material RAP yang bersifat kaku, maka perlu untuk mengetahui sifat kekakuan, sifat deformasi, serta sifat ketahanan terhadap retak akibat kelelahan. Sifat kekakuan campuran diteliti untuk menganalisis kekakuan campuran beraspal karena dipengaruhi oleh material RAP dan bahan peremaja yang digunakan. Sifat ketahanan terhadap deformasi diteliti untuk menganalisis ketahanan deformasi campuran beraspal karena dipengaruhi oleh bahan peremaja sebagai pelunak aspal RAP yang digunakan. Sifat ketahanan retak akibat kelelahan diteliti untuk menganalisis ketahanan terhadap kelelahan karena campuran dibuat menggunakan material RAP bersifat kaku dan bersumber dari lapisan perkerasan jalan terdahulu dalam masa pelayanan mengalami kelelahan akibat pengaruh pemuatan beban kendaraan serta pengaruh kondisi lingkungan, dimana tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik campuran beraspal pada Kadar Aspal Optimal (KAO) dan kadar WCO terendah (untuk mengurangi deformasi) yang memenuhi spesifikasi (Taherkhani dan Noorian, 2019).

Campuran beraspal menggunakan RAP dengan tambahan peremaja (*rejuvenator*)

Daur ulang campuran beraspal menggunakan RAP umumnya menggunakan 10%-20% material RAP dalam perencanaan campuran beraspal pada lapisan permukaan jalan untuk aplikasi bernilai rendah (Swiertz *et al.*, 2011; Mogawer *et al.*, 2012; Zaumanis dan Malick, 2015). Seiring waktu masa pelayanan jalan usia perkerasan jalan bertambah, pengikat aspal kehilangan komponen *votail* yaitu *maltenes* menjadi komponen yang kurang mudah menguap yaitu *asphaltenses* yang membuat material perkerasan jalan lebih kaku, getas, dan rentan terhadap retak (Rahmani *et al.*, 2017). Peningkatan persentase penggunaan RAP untuk campuran beraspal dapat mengurangi kemampuan perkerasan untuk tahan terhadap retak akibat kelelahan dan retak suhu rendah serta meningkatkan kekakuan campuran beraspal, merupakan rintangan dalam pemanfaatan material RAP (Xinxin *et al.*, 2018). Cara mengatasi masalah sifat kekakuan pada material RAP untuk campuran beraspal yaitu dengan menambahkan agen daur ulang yang dikenal sebagai bahan peremaja untuk mengembalikan sifat asli aspal material RAP (Elkashef dan Williams, 2017).

Bahan peremaja merupakan suatu bahan tambahan yang berfungsi untuk mengembalikan sifat-sifat aspal lama akibat penuaan aspal (Mohammadafzali

et al., 2017; Ahmed dan Hossain, 2020). Bahan peremaja aspal biasanya produk berbasis minyak bumi, berbasis minyak organik, berbasis aspal dengan tingkatan lebih lunak dari standar, atau rekayasa yang bertujuan untuk memulihkan sifat aspal yang buruk seperti sifat kaku dan kurang lunak (Zaumanis *et al.*, 2014; Borghi *et al.*, 2017).

Peremaja berbasis olahan minyak bumi, diantaranya: *oil and wax*, oli, maupun minyak yang mengandung *maltenes*. Salah satu peremaja dari olahan minyak bumi adalah *oil and fischer tropsch wax* (Carrion *et al.*, 2015). Bahan peremaja berbasis aspal penetrasi tinggi atau tingkatan kelunakan aspal tinggi seperti penetrasi 80/100 (Widyatmoko, 2008). Bahan peremaja berbasis minyak organik, diantaranya meliputi: minyak nabati/minyak sayur, WCO, minyak jarak, dan sebagainya bahan yang berasal dari minyak organik (Zaumanis *et al.*, 2014; Borghi *et al.*, 2017).

Reclaimed asphalt pavement (RAP)

RAP atau hasil galian perkerasan jalan lama merupakan material dari garukan perkerasan jalan lentur lama yang terdiri dari agregat dan aspal. Penggunaan material RAP memiliki keunggulan yaitu: manfaat ekonomi melalui pengurangan biaya konstruksi dan kelestarian lingkungan (Hong *et al.*, 2014; Ahmed dan Hossain, 2020). Manfaat ekonomi diperoleh melalui pengurangan biaya konstruksi yaitu menggunakan material RAP sehingga mengurangi biaya material agregat dan aspal (Hong *et al.*, 2014; Zaumanis *et al.*, 2014; Ahmed dan Hossain, 2020).

Manfaat penggunaan material RAP terhadap kelestarian lingkungan yaitu pengurangan penggunaan material yang tidak dapat diperbahai dan diperoleh dari alam seperti agregat melalui proses penambangan di alam dan aspal dari hasil olahan minyak bumi. Beberapa aspek perlu dipertimbangkan untuk penggunaan material RAP dalam campuran beraspal, yaitu: sifat pengikat sudah tua dalam RAP yang kaku dan getas dapat menyebabkan potensi retak, tingkat pencampuran campuran beraspal dan difusi yang terjadi antara material perawan dan pengikat RAP, serta sifat agregat RAP (Zaumanis dan Malick, 2015; Ahmed dan Hossain, 2020).

Cara mengatasi masalah sifat kekakuan pada material RAP untuk campuran beraspal yaitu dengan menambahkan agen daur ulang yang dikenal sebagai bahan peremaja untuk mengembalikan sifat asli aspal material RAP (Nono, 2016; Elkashef dan Williams, 2017). Bahan peremaja dapat melunakkan bahan pengikat aspal untuk campuran beraspal dan mengantisipasi

pengaruh sifat kaku akibat penuaan pada material RAP (Nono, 2016; Yu *et al.*, 2016).

Waste cooking oil (WCO)

WCO/ limbah minyak goreng umumnya dihasilkan setelah dimasak dan kegiatan menggoreng, dapat digunakan sebagai peremaja yang baik karena memiliki komponen minyak ringan yang serupa dari aspal. Penggunaan WCO merupakan salah satu solusi ramah lingkungan dan mengandung komponen minyak ringan yang serupa dengan bahan pengikat aspal baru (*virgin bitumen*) (Ahmed dan Hossain, 2020). Penambahan WCO ke bahan pengikat aspal dapat meningkatkan ketahanan kelelahan dan sifat retak campuran akibat suhu rendah, namun mengurangi ketahanan terhadap deformasi yang dapat menyebabkan alur. WCO dapat digunakan sebagai bahan peremaja untuk campuran beraspal yang menggunakan material RAP (Zaumanis *et al.*, 2014; Taherkhani dan Noorian, 2019). Penggunaan persentase bahan peremaja disesuaikan dengan banyaknya persentase aspal tua untuk campuran Antara pengikat aspal atau banyaknya material RAP digunakan untuk campuran beraspal.

Berdasarkan dari beberapa penelitian penggunaan WCO dapat digunakan sebagai bahan tambahan untuk melunakkan bahan pengikat aspal Asli *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2012; Eriskin *et al.*, 2017; Al-Omari *et al.*, 2017; Xinxin *et al.*, 2018) serta sebagai bahan peremaja untuk mengembalikan sifat-sifat pengikat aspal menyerupai aspal baru (Zagar *et al.*, 2012; Asli *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019). WCO dapat digunakan sebagai bahan peremaja untuk campuran beraspal yang menggunakan material RAP (Zaumanis *et al.*, 2014; Mamun dan Wahhab, 2018; Taherkhani dan Noorian, 2019).

Chen *et al.* (2014) menyatakan penambahan WCO dapat secara efektif melunakkan aspal tua dan meningkatkan daya tahan kelelahan serta mengurangi reak lelah. Sun *et al.* (2016) menyatakan penambahan WCO dapat mengurangi kekakuan aspal karena mengurangi titik lunak dan kekentalan aspal. Taherkhani dan Noorian (2019) menyatakan nilai kekakuan campuran beraspal meningkat seiring penambahan material RAP dalam campuran beraspal dan nilai kekakuan menurun dengan penambahan WCO, selain itu penambahan WCO berpengaruh pada sifat ketahanan terhadap deformasi.

Karakteristik kekakuan

Kekakuan (*stiffness*) menunjukkan campuran beraspal padat untuk menahan dan menyebarkan beban dinyatakan dengan modulus elastis.

Kekakuan campuran beraspal meningkat karena beberapa faktor, yaitu: kemampuan ikatan aspal dan agregat, kekakuan material pengikat aspal, serta durasi campuran beraspal dalam usia pelayanan. Nilai kekakuan campuran beraspal juga karena dipengaruhi oleh temperatur, semakin tinggi temperatur mengakibatkan sifat bahan pengikat aspal lebih lunak. Nilai kekakuan dalam ITSM pada pengujian modulus kuat tarik tidak langsung/*Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM) dihitung menggunakan persamaan dalam BS EN 12697-26: 2012.

Karakteristik ketahanan deformasi

Ketahanan deformasi menunjukkan campuran beraspal padat untuk menahan beban selama siklus pembebanan tertentu. Ketahanan terhadap deformasi berhubungan dengan kekakuan campuran beraspal dan dipengaruhi oleh temperatur serta waktu pembebanan. Ketahanan deformasi dipengaruhi beberapa faktor, yaitu: tingkat penetrasi aspal, jenis gradasi agregat, bentuk serta tekstur agregat, sifat penguncian agregat, dan tingkat pemadatan. Nilai regangan, tegangan, dan kekakuan rangkai dalam ketahanan deformasi pada pengujian rangkai (*creep test*) dihitung menggunakan persamaan dalam BS EN 12697-25: 2005. Kemiringan rangkai pengujian rangkai dinamis digambarkan pada grafik hubungan regangan dengan siklus pembebanan. Tipe kemiringan rangkai dinamis berdasarkan jenis beban lalu lintas dirangkum pada Tabel 1.

Karakteristik kelelahan

Kelelahan (*fatigue*) menunjukkan keretakan akibat beban berulang dengan nilai tegangan yang tidak dapat menahan beban berulang. Retak yang terkait dengan pembebanan merupakan gangguan yang terjadi pada perkerasan jalan ketika pembebanan berulang terhadap campuran beraspal karena disebabkan beban kendaraan pada lalu lintas jalan.

Pembebanan berulang menyebabkan regangan tarik berkembang yang pada akhirnya melebihi kekuatan tarik campuran, sehingga menyebabkan timbul retak. Retak akibat kelelahan umumnya diuji dengan pengujian kelelahan tarik tidak langsung/*Indirect Tensile Fatigue Test* (ITFT)

dihitung menggunakan persamaan dalam BS EN 12697-24: 2012.

Material dan Metode

RAP yang digunakan berasal dari pekerjaan pemeliharaan Ruas Jalan Antosari, Kabupaten Tabanan-Bali, yang merupakan hasil garukan campuran AC-WC. Agregat tambahan yang digunakan yaitu agregat batu pecah dari PT. Prohicindo dan aspal yang digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70. Peremaja yang digunakan yaitu peremaja WCO dari hasil olahan restoran siap saji. Pembuatan rancangan campuran beraspal mengikuti rujukan metode RSNI M-01-2003 dan pengujian karakteristik Marshall menggunakan acuan metode RSNI M-01-2003. Karakteristik kekakuan dengan pengujian ITSM menggunakan metode BS EN 12697-26: 2012. Karakteristik ketahanan terhadap deformasi dengan pengujian rangkai menggunakan metode BS EN 12697-25: 2005. Karakteristik kelelahan dengan pengujian ITFT menggunakan metode BS EN 12697-24: 2012.

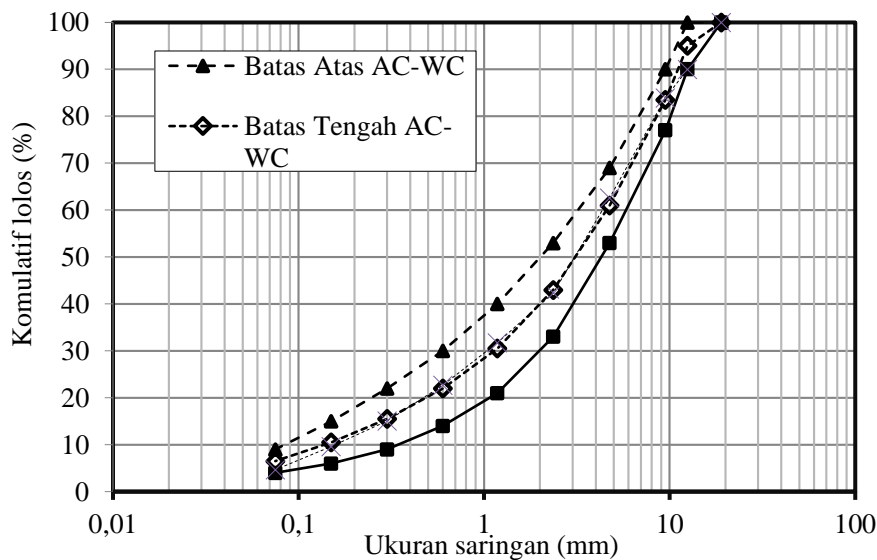
Metode pembuatan campuran beraspal

Pembuatan campuran menggunakan metode Marshall berdasarkan gradasi rencana dengan memproporsikan bahan utama antara agregat dan aspal serta material RAP dan bahan peremaja WCO. Gradasi agregat yang digunakan yaitu mengikuti gradasi batas tengah campuran AC-WC sebagai target gradasi yang digunakan seperti grafik Gambar 1, dimana gradasi RAP memerlukan sedikit penyesuaian dibagian patikel yang berukuran 0,15 mm kebawah dan diatas 9,75mm. Proporsi agregat kasar 39%, proporsi agregat halus 54,5%, dan proporsi *filler* 6,5% sesuai gradasi target, gradasi batas tengah AC-WC. Persentase agregat tambahan disesuaikan dengan persentase RAP agar memenuhi gradasi batas tengah. Variasi material RAP yang dibuat untuk campuran beraspal yaitu campuran dengan menggunakan 25% RAP dan campuran dengan 50% material RAP. Untuk setiap variasi penggunaan material RAP dibuat variasi bahan peremaja, sehingga pada setiap variasi RAP dan setiap variasi bahan peremaja WCO dicari nilai Kadar Aspal Optimum (KAO).

Tabel 1. Tipe kemiringan rangkai dinamis

Temperatur tahunan rata-rata perkerasan jalan (°C)	Beban lalu lintas berat >10 ⁶ ESA	Beban lalu lintas sedang 5x10 ⁵ - 10 ⁶ ESA	Beban lalu lintas ringan <5x10 ⁵ ESA
> 30	< 0,5	0,5 - 3	> 3 - 6
20 - 30	< 1	1 - 6	> 6 - 10
10 - 20	< 2	2 - 10	-

Sumber: Aderson (1995)



Gambar 1. Gradasi agregat rencana

Persentase variasi bahan peremaja yang digunakan untuk campuran beraspal pada setiap variasi kadar aspal adalah: 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% berdasarkan berat aspal total (terdiri dari jumlah aspal RAP dan aspal baru sebagai tambahan). Persentase variasi bahan peremaja WCO yang digunakan berdasarkan hasil penelitian Taherkhani dan Noorian (2019). Peremaja WCO yang digunakan adalah WCO yang lolos saringan No.20 (0,85 mm) yang bertujuan untuk menjaga WCO bebas dari partikel benda asing dan endapan. Variasi kadar aspal pada setiap variasi WCO: 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; dan 7% berdasarkan berat total campuran. Kekentalan WCO diuji dengan alat *Saybolt universal*, dimana waktu alir dari 60 ml WCO, dicatat dan dikorelasikan dengan nilai Viskositas sesuai SNI 06-6721-2002 (BSN, 2002).

Agregat dan material RAP diproporsikan sesuai komposisi rencana campuran. Aspal penetrasi 60/70 dipanaskan pada temperatur $\pm 155^{\circ}\text{C}$, kemudian agregat dipanaskan pada tempat pencampuran, dicampur aspal penetrasi 60/70 sesuai proporsi, sampai agregat terselimuti aspal secara rata (campuran 1). Secara terpisah RAP dipanaskan pada temperatur $\pm 155^{\circ}\text{C}$ sampai material RAP terurai terlihat seperti campuran gembur, kemudian ditambahkan WCO, dan diaduk secara merata (campuran 2). Kedua campuran kemudian diaduk rata dan selanjutnya dipadatkan pada temperatur $\pm 145^{\circ}\text{C}$.

KAO, pengujian Marshall, pengujian ITSM, pengujian rangkak, dan pengujian ITFT

Berdasarkan RSNI M-01-2003 tentang pembuatan rancangan campuran beraspal, parameter Marshall yang disyaratkan sesuai Dep. PU (2020) dan

digunakan untuk menentukan KAO, meliputi: stabilitas, kelelahan plastis, VIM, VIM PRD, VMA, dan VFB. Penentuan KAO dengan RSNI M-01-2003 dilakukan dengan menggambarkan nilai yang memenuhi spesifikasi dalam diagram batang. Nilai parameter penentuan KAO meliputi: VIM, VIM PRD, VMA, VFB, stabilitas, kelelahan plastis/flow, dan *Marshall Quotient*. KAO ditentukan berdasarkan batas tengah rentang kadar aspal yang memenuhi spesifikasi, pada kadar WCO terendah, yang masih memberi karakteristik memenuhi spesifikasi (Taherkhani dan Noorian, 2019). Pengujian ITSM, pengujian rangkak/deformasi (*creep*), serta pengujian ITFT dilakukan dengan alat *Dynapave* UTM 30 pada temperatur 20°C . Kekakuan campuran diuji dengan pengujian ITSM, dimana dilakukan dengan pengujian terhadap modulus kekuatan tarik campuran beraspal. Pengujian ITSM dilakukan dengan acuan metode BS EN 12697-26: 2012.

Ketahanan deformasi campuran diuji dengan pengujian rangkak dinamis dilakukan pada temperatur 40°C , diaplikasikan dengan pembebanan dinamis serta aplikasi pembebanan berlangsung selama satu detik dengan periode pembebanan yaitu jarak satu pembebanan dengan pembebanan berikutnya selama dua detik. Pengujian rangkak dilakukan dengan acuan metode BS EN 12697-25: 2005. Kelelahan campuran diuji dengan pengujian ITFT pada temperatur 20°C , pembebanan yang diaplikasikan saat pengujian dengan didasarkan pada tegangan yang ditetapkan. Pengujian ITFT dilakukan dengan acuan metode BS EN 12697-24: 2012. Hasil penelitian pengujian ITSM, pengujian rangkak, serta pengujian ITFT akan dibandingkan dengan penelitian Thanaya dan Nugraha (2016) serta Putra (2017).

Tabel 2. Hasil pemeriksaan agregat

Jenis pemeriksaan	Agg. batu pecah	Agg. RAP	Spesifikasi
B.J. dan penyerapan Agg. kasar			
- B.J. <i>bulk</i>	2,542	2,430	-
- B.J. SSD	2,587	2,491	-
- B.J. <i>apparent</i>	2,662	2,588	-
- Penyerapan air	1,767%	2,510%	3%
B.J. dan penyerapan Agg. halus			
- B.J. <i>bulk</i>	2,569	2,458	-
- B.J. SSD	2,618	2,523	-
- B.J. <i>apparent</i>	2,701	2,629	-
- Penyerapan air	1,906%	2,648%	3%
B.J. <i>filler</i>	2,540	2,444	-
Keausan Agg. kasar	28,479%	34,703%	Maks 40%
- Agg. kasar	0,729%	-	
- Agg. halus	0,964%	-	Maks 1%
Angularitas Agg. kasar	100/98,2	100/97,1	Min 95/90
Kadar rongga Agg. halus	49,884%	47,988%	Min 45%
Nilai setara pasir Agg. halus	88,117%	-	Min 50%
Sifat kekekalan			
- Agg. kasar	6,740%	9,743%	Maks 12%
- Agg. halus	5,817%	8,362%	
Kelekatan Agg. terhadap aspal	97%	96,5%	Min 95%
Partikel pipih Agg. kasar	9,179%	8,224%	Maks 10%

Tabel 3. Hasil pemeriksaan aspal

Jenis pemeriksaan	Aspal pen. 60/70	Aspal RAP	Spesifikasi
Penetrasi aspal	64,5	49,9	60-70
Titik lembek aspal	48,5 °C	51 °C	≥48 °C
Daktilitas aspal	145 cm	94,7 cm	≥100 cm
Titik nyala aspal	248 °C	283 °C	≥232 °C
Kelarutan dalam <i>trichloroethylene</i>	99,6%	99,8%	≥99%
Berat jenis aspal	1,029	1,042	≥1,0
Kehilangan berat aspal/TFOT	0,648%	-	≥0,8%
Penetrasi setelah TFOT	61	-	≥54
Daktilitas setelah TFOT	124 cm	-	≥100 cm

Hasil Pemeriksaan Material

Hasil pemeriksaan agregat batu pecah Tabel 2. memenuhi syarat agregat untuk campuran beraspal berdasarkan spesifikasi Dep. PU (2020). Jika dibandingkan syarat spesifikasi, hasil pemeriksaan agregat dari ekstraksi RAP pada memenuhi syarat spesifikasi. Hasil pemeriksaan aspal penetrasi 60/70 (Tabel 3), memenuhi syarat aspal untuk campuran beraspal berdasarkan spesifikasi Dep. PU (2020). Jika dibandingkan syarat spesifikasi, hasil pemeriksaan aspal dari ekstraksi RAP pada pengujian penetrasi dan daktilitas tidak memenuhi spesifikasi Dep. PU (2020). Hasil uji WCO disajikan pada Tabel 4.

Nilai KAO dan karakteristik Marshall

Untuk memperjelas lagi, bahwa KAO ditentukan pada penggunaan material 25% RAP dan 50% RAP, dimana masing-masing diberi variasi WCO. Pada

setiap variasi WCO dilakukan variasi kadar aspal. Ada dua pilihan pada campuran 25% RAP untuk memilih komposisi campuran yang optimal yaitu: campuran dengan tambahan WCO 4% memiliki KAO 6,2% dan campuran dengan tambahan WCO 6% memiliki KAO 6,15%. Kadar tambahan WCO 4% dengan kadar aspal 6,2% dipilih sebagai komposisi campuran optimal untuk campuran 25% RAP karena persentase penggunaan peremaja minimal dan rentang batas tengah kadar aspal yang memenuhi spesifikasi disetiap parameter campuran beraspal. Peremaja WCO minimal dipilih mempertimbangkan pengaruh ketahanan terhadap deformasi yang dapat mengakibatkan campuran beraspal mudah berdeformasi jika persentase WCO yang tinggi (Taherkhani dan Noorian, 2019).

KAO pada campuran 50% RAP, dengan kadar tambahan WCO 8% adalah 6,3%. Hanya ada satu pilihan untuk persentase tambahan peremaja WCO pada kadar aspal yang memenuhi spesifikasi pada

campuran beraspal menggunakan 50% RAP. Jadi pada campuran menggunakan 25% RAP dipilih peremaja WCO sebesar 4% dengan nilai KAO 6,2% dan campuran menggunakan 50% RAP dipilih peremaja WCO sebesar 8% dengan nilai KAO 6,3%. Karakteristik Marshall campuran 25% RAP dan 50% RAP dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil pemeriksaan peremaja WCO

Jenis pemeriksaan	Hasil
Berat jenis	0,926
Titik nyala	288 °C
Kekentalan pada suhu 135°C	25,03 cSt
Kekentalan pada suhu 145°C	23,82 cSt
Kekentalan pada suhu 155°C	23,12 cSt
Kadar air	0,70%

Hasil rangkuman Tabel 5. Tentang karakteristik Marshall campuran 50% RAP dengan 8% WCO dan campuran 25% RAP dengan 4% WCO pada KAO memenuhi spesifikasi Dep. PU (2020). Persentase WCO dan kadar aspal tinggi menyebabkan campuran menjadi lebih lunak dan lentur sehingga nilai stabilitas campuran 50% RAP lebih rendah dari campuran 25% RAP dan juga menyebabkan nilai *flow* campuran 50% RAP lebih tinggi dari campuran 25% RAP. Kepadatan campuran 25% RAP lebih tinggi dibandingkan kepadatan campuran yang mengandung 50% RAP karena komposisi agregat RAP lebih rendah dibandingkan campuran 50% RAP dan berat jenis agregat RAP lebih rendah dari agregat batu pecah.

Kekakuan campuran beraspal pada KAO

Pengujian ITSM dapat digunakan untuk mengukur tegangan tarik pada campuran beraspal. Pembebanan yang diberikan melalui pembebanan dinamis/hentak yang diaplikasikan melalui dua strip metal pada pengujian ITSM alat uji *Dynapave* UTM 30 di laboratorium. Nilai ITSM untuk campuran beraspal 50% RAP dengan 8% WCO dan campuran 25% RAP dengan 4% WCO dirangkum pada

Tabel 6. Nilai ITSM campuran beraspal 50% RAP dengan 8% WCO lebih rendah dari campuran 25% RAP dengan 4% WCO. Nilai ITSM campuran yang mengandung 50% RAP dengan 8% WCO bernilai 3.253,3 MPa dan campuran yang mengandung 25% RAP dengan 4% WCO bernilai 4.933 MPa. Campuran beraspal yang mengandung WCO dan kadar aspal yang lebih tinggi menyebabkan kekakuan campuran berkurang karena aspal dalam campuran menjadi lebih lentur dan lunak.

Jika dibandingkan dengan campuran beraspal menggunakan agregat batu pecah dan aspal penetrasi 60/70 serta campuran beraspal 40% RAP dan aspal penetrasi 80/100, maka campuran 50% RAP dengan 8% WCO dan campuran 25% RAP dengan 4% WCO memiliki kekakuan yang lebih rendah karena pengaruh WCO yang menyebabkan aspal dalam campuran menjadi lebih lunak dan campuran menjadi lebih lentur. Campuran 50% RAP dengan 8% WCO lebih lunak dibandingkan dengan campuran 25% RAP dengan 4% WCO karena persentase WCO pada campuran 50% RAP lebih tinggi dibandingkan campuran 25% RAP.

Ketahanan terhadap deformasi campuran beraspal pada KAO

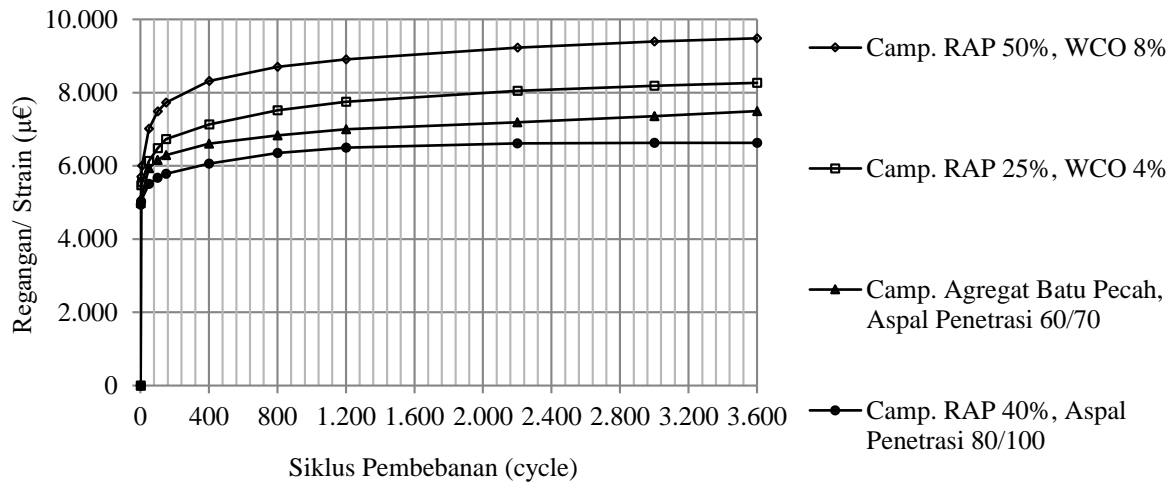
Pengujian rangkak yang digunakan adalah pengujian rangkak dinamis dengan pembebanan dinamis yang diaplikasikan pada pengujian campuran beraspal. Aplikasi pembebanan berlangsung selama satu detik dengan periode pembebanan yaitu jarak satu pembebanan dengan pembebanan berikutnya selama dua detik. Pengujian rangkak berlangsung selama 3.600 kali pembebanan (3.600 *cycle*), karena jarak pembebanan satu dengan pembebanan lainnya selama dua detik maka waktu pengujian yang dibutuhkan 7.200 detik. Berdasarkan dari pengujian rangkak dapat digambarkan hasil dari hubungan siklus pembebanan dengan regangan pada Gambar 2, dan nilai kemiringan rangkak pada Gambar 3.

Tabel 5. Karakteristik Marshall pada Kadar Aspal Optimum (KAO)

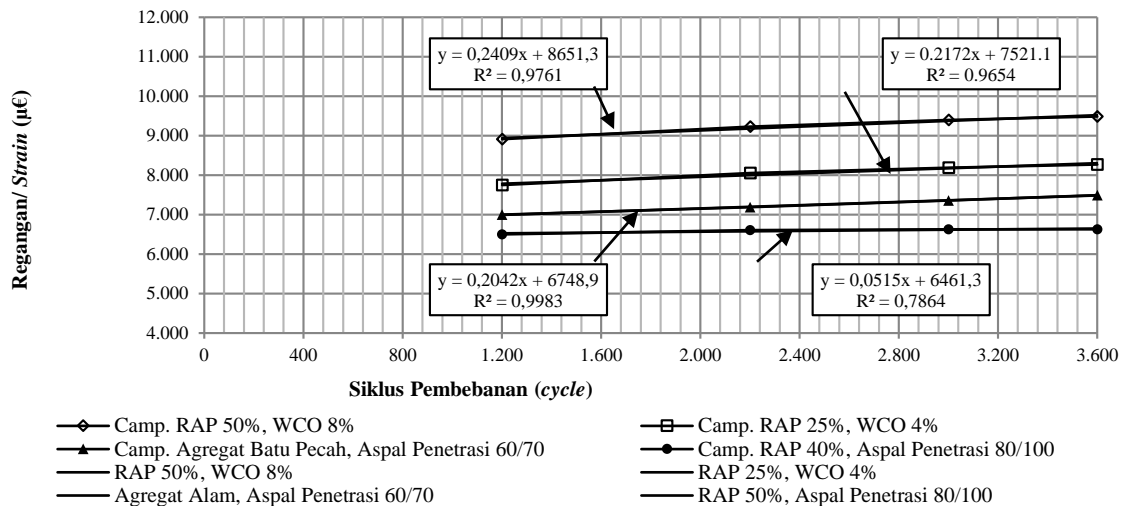
Karakteristik campuran	Camp. 50% RAP	Camp. 25% RAP	Spesifikasi campuran
	8% WCO	4% WCO	
Kepadatan (gr/cm ³)	2,220	2,247	-
Stabilitas (kg)	2.568,5	2.940,2	Min 800 kg
<i>Flow</i> (mm)	3,73	3,47	2 mm - 4 mm
VIM (%)	4,727	4,787	3% - 5%
VMA (%)	17,231	16,831	Min 15%
VFB (%)	72,570	71,565	Min 65%
<i>Marshall quotient</i> (kg/mm)	690,8	855,0	-
VIM PRD (%)	2,605	3,589	Min 2%
Stabilitas sisa (%)	91,7	92,8	Min 90%

Tabel 6. Hasil pengujian ITSM dan untuk perbandingan dengan hasil peneliti lain

Jenis Campuran	ITSM (MPa)
Campuran 50% RAP dengan 8% WCO	3.253,3
Campuran 25% RAP dengan 4% WCO	4.933,0
Campuran agregat batu pecah dan aspal penetrasi 60/70 (Thanaya & Nugraha, 2016)	5.022,0
Campuran 40% RAP dengan aspal penetrasi 80/100 (Putra, 2017)	7.933,0



Gambar 2. Hubungan siklus pembebanan dengan regangan



Gambar 3. Nilai kemiringan rangkak

Terlihat pada Gambar 2, pada fase pembebanan awal, terjadi deformasi yang besar. Campuran beraspal 50% RAP dengan WCO 8% dan campuran beraspal 25% RAP dengan WCO 4% menghasilkan regangan yang lebih/paling tinggi (karena aspalnya menjadi lebih lunak akibat kadar WCO yang lebih tinggi), bila dibandingkan campuran beraspal yang menggunakan agregat alam dengan aspal penetrasi 60/70 dan campuran dengan 40% RAP dengan aspal penetrasi 80/100.

Campuran beraspal 50% RAP dengan WCO 8% lebih lentur dibandingkan campuran lainnya, hal ini sesuai juga dengan nilai ITSM yang lebih rendah

karena kekakuan campuran yang rendah. Peremaja WCO melunakkan aspal dalam campuran dan menyebabkan regangan campuran lebih tinggi. Berdasarkan Gambar 2, dipilih titik-titik uji yang memberi hubungan linier antara siklus pembebanan dan regangan yang terjadi, seperti yang disajikan pada Gambar 3, dimana dipilih 4 titik uji terakhir dari Gambar 2. Koefisien variable x yang diperoleh dari regresi linier, adalah kemiringan rangkak dinamis (*dynamic creep slope*) campuran beraspal, yang nilai kemiringannya dianalisis sesuai Tabel 1. Secara umum, nilai kemiringan yang lebih kecil lebih mampu menahan deformasi akibat beban berulang.

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengujian rangkak (Gambar 3), didapat nilai kemiringan rangkak pada campuran beraspal menggunakan 50% RAP dengan 8% WCO bernilai 0,2409 dan campuran beraspal menggunakan 25% RAP dengan 4% WCO bernilai 0,2172. Nilai kemiringan rangkak campuran tersebut jika dibandingkan dengan tipe kemiringan rangkak pada Tabel 1 (< 0,5), termasuk tipe campuran beraspal yang dapat menahan lalu lintas berat. Nilai kemiringan rangkak campuran beraspal menggunakan 25% RAP dengan 4% WCO lebih mampu menahan beban berulang (dengan nilai kemiringan yang lebih kecil). Kedua campuran daur ulang memiliki kemiringan rangkak relatif setara dengan hotmix dengan aspal pen 60/70, namun lebih besar dari kemiringan Campuran RAP dan aspal pen 80/100.

Kelelahan campuran beraspal pada KAO

Pengujian ITFT menggunakan alat uji *Dynapave* UTM 30 dilakukan pada benda uji silinder dengan memberikan beban garis secara berulang diarah diameter vertikal, beban yang diberikan menyebabkan tegangan tarik tidak langsung diarah diameter horisontal. Sampel diuji pada tiga tegangan yang berbeda. Berdasarkan dari pengujian ITFT dapat digambarkan hasil dari hubungan jumlah pengulangan beban sampai runtuh dengan tegangan pada Gambar 4, dimana sudah umum grafik kelelahan dibuat dengan skala log-log dengan regresi *power trendline*. Berdasarkan Gambar 4, campuran beraspal 50% RAP dengan 8% WCO memiliki ketahanan kelelahan yang tidak jauh berbeda dibandingkan campuran beraspal 25% RAP dengan 8% WCO, dimana garis hasil uji sangat berdekatan. Terlihat bahwa pada suatu tegangan tertentu kedua campuran memberi data

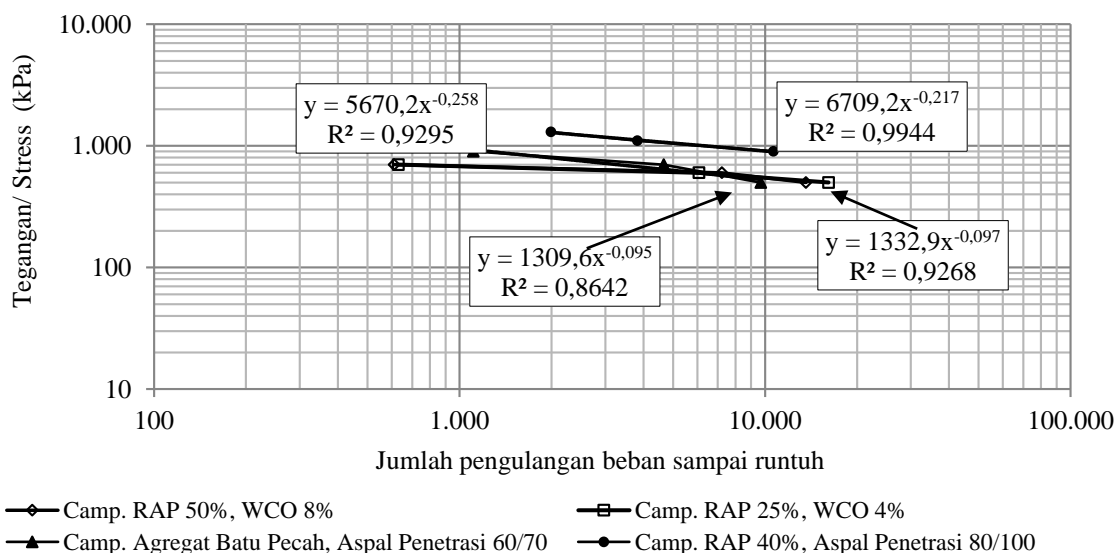
keruntuhan pada jumlah beban berulang yang tidak jauh berbeda. Hasil penelitian dibandingkan dengan campuran beraspal agregat batu pecah dengan aspal penetrasi 60/70 (Thanaya & Nugraha, 2016).

Setelah perpotongan antara sekitar 7.000 pengulangan beban dengan tegangan 600 kPa atau lebih rendah, campuran 50% RAP dengan 8% WCO memiliki ketahanan kelelahan lebih tinggi (lebih lama runtuh) karena campuran bersifat lebih lentur. Jika dilakukan ekstrapolasi pada kondisi jumlah pengulangan beban sampai 1.000.000 dengan persamaan pada Gambar 4, maka campuran beraspal 50% RAP dengan 8% WCO dapat menahan tegangan dengan jumlah pengulangan beban yang tinggi sampai runtuh pada nilai 352 kPa.

Dari Gambar 4, terlihat bahwa campuran beraspal 40% RAP dengan aspal penetrasi 80/100, memiliki ketahanan kelelahan yg terbaik (Putra, 2017). Hal ini menunjukkan penggunaan aspal yang lebih lunak (pen 80/100) untuk pekerjaan daur ulang RAP, memberi hasil yang lebih baik. Kinerja ini sejalan nilai ITSM pada Tabel 6, dimana campuran cukup kaku namun memiliki kelenturan yang baik.

Kesimpulan

Dari hasil dan analisis, dapat disimpulkan bahwa karakteristik marshall campuran 50% RAP dengan pilihan 8% WCO dan campuran 25% RAP dengan pilihan 4% WCO pada KAO memenuhi spesifikasi. Karakteristik kekakuan campuran beraspal yang mengandung WCO dan kadar aspal yang lebih tinggi menyebabkan kekakuan campuran berkurang karena campuran beraspal menjadi lebih lunak dan lentur.



Gambar 4. Hubungan jumlah pengulangan beban sampai runtuh dengan tegangan

Karakteristik ketahanan deformasi campuran 50% RAP dengan 8% WCO lebih rentan berdeformasi dibandingkan pada campuran 25% RAP dengan 4% WCO, disebabkan karena persentase peremaja WCO lebih tinggi dan membuat campuran menjadi lebih lunak dan lentur. Karakteristik ketahanan retak akibat kelelahan menunjukkan campuran 25% RAP dengan 4% WCO lebih cepat mengalami runtuh dibandingkan dengan campuran 50% RAP dengan 8% WCO karena campuran yang mengandung 25% RAP dengan 4% WCO memiliki nilai kekakuan yang lebih tinggi.

Daftar Pustaka

- Aderson, A. (1995). *Gyropac and Matta Training Cours*. Australia: Australian Road Research Bord Ltd.
- Ahmed, R. B., & Hossain, K. (2020). Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review. *Construction and building materials*, 230, 116985.
- Al-Omari, A. A., Khedaywi, T. S., & Khasawneh, M. A. (2017). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using Superpave specifications. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), 68-76.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M.R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil - Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Material*, 37, 398-405.
- Borghini, A., Jiménez del Barco Carrión, A., Lo Presti, D., & Giustozzi, F. (2017). Effects of laboratory aging on properties of biorejuvenated asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017149.
- BSI. (2005). BS EN 12697-25: 2005. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 25: Cyclic compression test*. UK: BSI Standards Publication.
- BSI. (2012a). BS EN 12697-24: 2012. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 24: Resistance to fatigue*. UK: BSI Standards Publication.
- BSI. (2012b). BS EN 12697-26: 2012. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 26: Stiffness*. UK: BSI Standards Publication.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI-06-6721-2002. *Metode Pengujian Kekentalan Aspal Emulsi Dengan Alat Saybolt*, Jakarta.
- Carrion, A. J. D. B. & Airey, G. D. (2015). Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses. *Road Materials and Pavement Design*, 16, 460-474.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y. (2014). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building materials*, 66, 286-298.
- Dep. PU. (2003). RSNI M-01-2003. *Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall*. Bandung: Departemen Pekerjaan Umum, Pusat Penelitian Jalan Dan Jembatan.
- Dep. PU. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Elkashaf, M., & Williams, R. C. (2017). Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 151, 345-352.
- Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S., & Saltan, M. (2017). Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), 863-870.
- Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. (2014). Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance. *Road materials and pavement design*, 15(4), 841-855.
- Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P., & Ma, Q. (2019). Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt. *Applied Sciences*, 9(9), 1767.
- Mamun, A. A. & Wahhab, H. I. A. (2018). Compative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(11), 1297-1308.
- Mohammadafzali, M., Ali, H., Musselman, J. A., Sholar, G. A., & Rilko, W. A. (2017). Aging of Rejuvenated Asphalt Binders. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-13.
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road materials and pavement design*, 13(sup1), 183-208.

- Nono. (2016). Pengaruh Bahan Peremaja Terhadap kinerja Campuran Beraspal Panas Bergradasi Menerus Menggunakan Daur Ulang Perkerasan Beraspal. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 33 (1), 27-42.
<https://garuda.ristekbrin.go.id/documents/detail/613023>
- Thanaya, I. N. A., Puranto, I. G. R., & Nugraha, I. N. S. (2016). Studi karakteristik campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) menggunakan aspal penetrasi 60/70 dengan penambahan lateks. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 22(2), 77-86.
- Putra, G. K. (2017). Kinerja Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) Dari Hasil Garukan Cold Milling Machine Dengan Perkat Aspal Pen. 80/100. *Thesis*, tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana, Denpasar.
- Rahmani, E., Darabi, M. K., Little, D. N., & Masad, E. A. (2017). Constitutive modeling of couple aging-viscoelastic response of asphalt concrete. *Construction and Building Material*, 131, 1-15.
- Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., & Guo, C. (2016). Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 66, 286-298.
- Swiertz, D., Mahmoud, E., & Bahia, H. (2011). Estimating the effect of recycled asphalt pavement and shingles on fresh binder, low-temperature properties without extraction and recovery. *Journal of the Transportation Research board*, 48-55.
- Taherkhani, H. & Noorian, F. (2019). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-11.
- Widyatmoko, I. (2018). Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling. *Construction and Building Material*, 22, 77-87.
- Xinxin, C., Xuejuan, C., Boming, T., Yuanyuan, W., & Xiaolong, L. (2018). Investigation of possibility of Waste Vegetable Oil rejuvenating Aged Asphalt. *Appl. Sci*, 1-18.
- Yu, B., Gu, X., Wu, M., & Ni, F. (2016). Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation. *Road Materials and Pavement Design*, 1-10.
- Zagar, M., Ahmadinia, E., Asli, H., & Karim, M. R.. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumes. *Journal of Hazardous Materials*, 254-258.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538-550.
- Zaumanis, M. & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (1), 39-55.