

MODIFIKASI ASPAL DENGAN GETAH PINUS DAN *FLY ASH* UNTUK MENGHASILKAN BIO-ASPAL

Ratna Yuniarti

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram

Kata kunci : Abstrak

bio-aspal, getah pinus, fly ash Aspal merupakan bahan pengikat pada konstruksi perkerasan jalan yang berasal dari sisa penyulingan minyak bumi. Karena minyak bumi merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, cadangannya semakin menipis sehingga mempengaruhi ketersediaan aspal. Di sisi lain, kebutuhan aspal untuk pembangunan dan pemeliharaan jalan terus mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan jumlah penduduk dan perkembangan perekonomian. Jika ketersediaan aspal tidak mencukupi jumlah permintaan, maka pada tahun-tahun yang akan datang akan terjadi kelangkaan aspal. Salah satu alternatif untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah penggunaan bahan-bahan yang dapat diperbaharui dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan memodifikasi aspal minyak untuk menghasilkan bio-aspal dan mengetahui kinerja campuran yang menggunakan bio-aspal sebagai bahan pengikat partikel-partikel agregat. Bio-aspal tersebut dibuat dari *fly ash*, getah pinus dan minyak nabati lainnya dengan kadar 21%, 23%, 25% dan 27%. Campuran yang dibuat adalah *asphalt concrete-wearing course* dengan distribusi ukuran partikel agregat sesuai ketentuan Bina Marga. Bio-aspal dan agregat dicampur pada suhu 155°C dan dipadatkan dengan penumbuk sebanyak 75 kali pada masing-masing sisinya. Hasil penelitian menunjukkan pada bio-aspal B-27 dengan kadar *fly ash*, getah pinus dan minyak nabati lainnya sebesar 27%, diperoleh nilai VMA 16,43%, VIM 4,53%, VFA 75,58%, stabilitas Marshall 2093,6 kg, *flow* 4,15 mm dan Marshall Quotient 507 kg/mm. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga, nilai VMA minimal 15%, VIM 3,5%-5,5%, VFA minimal 65%, stabilitas Marshall minimal 1000 kg, *flow* minimal 3,0 mm dan Marshall Quotient minimal 300 kg/mm. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa bio-aspal B-27 telah memenuhi standar yang berlaku sebagai campuran.

Key words : Abstract

bio-asphalt, pine resin, fly ash *Asphalt is a binder in pavement construction derived from distillation residue of crude oil at a refinery. Since crude oil is not a renewable natural resource, its dwindling reserves influence the availability of asphalt. On the other hand, the need of asphalt for the construction and maintenance of roads continues to increase because of population growth and economic development. If the availability of asphalt fails to meet the demands of increased traffic, there will be scarcity of asphalt in the future. One alternative to overcome these problems is to use asphalt pavement materials that are renewable and environmentally friendly. This study aims to modify asphalt cement to produce bio-asphalt and determine the performance of the mixture containing bio-asphalt as binder of particles aggregate. This bio-asphalt consists of fly ash, pine resin and other vegetable oils at 21%, 23%, 25% and 27%. Aggregate particle size distribution of the mixture referred to the mixture of asphalt-concrete wearing course based on specification of Bina Marga (a directorate of the Public Works Ministry of Indonesia). Bio-asphalt and aggregate were mixed at the temperature of 155°C and compaction of 75 blows was applied on each side. The result shows on the mixture containing bio-asphalt B-27 consisted of 27% fly ash, pine resin and other vegetable oils, the value of VMA was 16,43%, VIM was 4,53%, VFA was 75,58%, Marshall stability was 2093,6 kg, flow was 4,15 mm and Marshall Quotient was 507 kg/mm. According to Bina Marga, a minimum of VMA required at 15%, a range of VIM between 3,5%-5,5%, a minimum of VFA set at 65%, a minimum of Marshall stability required at 1000 kg, a minimum of flow set at 3,0 mm, and a minimum of Marshall Quotient required at 300 kg/mm. In conclusion, bio-asphalt B-27 has fulfilled the requirement in the mixture.*

2015 Universitas Mataram

✉ Alamat koresponden penulis: E-mail : ratna_yuniarti@yahoo.com

PENDAHULUAN

Aspal merupakan bahan pengikat agregat pada konstruksi perkerasan jalan yang memegang peranan sangat penting dalam menentukan kinerja perkerasan walaupun komposisinya sekitar 4-10% berdasarkan berat total campuran. Sebagai residu penyulingan minyak bumi, ketersediaan aspal jenis ini sangat tergantung dari cadangan minyak bumi yang jumlahnya semakin terbatas. Di sisi lain, kebutuhan pembangunan dan pemeliharaan jalan terus meningkat seiring dengan pertambahan jumlah penduduk dan semakin tingginya permintaan mobilitas barang dan jasa. Hal itu berarti, pada masa-masa yang akan datang, akan timbul permasalahan kelangkaan aspal minyak.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah mengurangi ketergantungan terhadap aspal minyak dengan mengembangkan *alternative binder*. Huang et al. (2012) menyebutkan bahwa observasi yang telah dilakukan menyimpulkan bahwa sebagian besar bahan pengikat dari tumbuhan mengandung komposisi yang mirip dengan bahan pengikat aspal konvensional (*hydrocarbons, aromatics, saturates, asphaltenes* dan sebagainya). Williams et al. (2012) melalui risetnya tentang penggunaan fraksi bio-oil sebagai bahan tambah pada aspal original dan aspal modifikasi polimer menyimpulkan bahwa sekitar 9% dari bio-oil dapat dicampurkan dengan aspal sehingga meningkatkan kinerja aspal modifikasi bio-oil secara signifikan. Disebutkan pula bahwa pengaruh bio-oil sangat tergantung dari karakteristik aspal, sumber bio-massa pembentuk bio-oil dan prosentase dari bio-oil yang dicampurkan pada aspal. Selanjutnya, Peralta et al. (2012) menyatakan bahwa sampai sejauh ini, belum ada penelitian yang menyebutkan penggunaan bio-oil sebagai bahan substitusi (menggantikan aspal 100%) pada industri bahan perkerasan jalan.

Mengingat bahwa bahan pengikat dari tumbuhan dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal, pada penelitian ini digunakan getah pinus, *fly ash* dan bahan nabati lainnya sebagai bahan pembentuk bio-aspal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik bio-aspal dan kinerja campuran yang menggunakan bio-aspal sebagai bahan pengikat partikel-partikel agregat. Dari berbagai komposisi yang diujicobakan, direkomendasikan bio-aspal pada

campuran perkerasan yang memiliki kinerja optimum dalam memikul beban lalu lintas.

Inovasi bahan peremaja aspal dengan menggunakan bahan-bahan alami yang ramah lingkungan telah dilakukan oleh sejumlah peneliti. Nigen-Chaidron and Porot (2008) dalam klaim paten nomor WO 200808414 20080717 pada *World Intellectual Property Organization* (WIPO), menyebutkan bahwa bahan peremaja dari minyak sawit cocok digunakan pada proses pengaspalan dengan teknik daur ulang di tempat (*in place recycling*) dan *central plant recycling* jenis *hotmix*. Bailey et al. (2010) dalam *United States Patent Application Publication* No. US 2010/0034586 A1 menyebutkan bahwa *waste vegetable oil* dapat digunakan untuk meremajakan aspal yang telah mengalami penurunan kualitas. *Waste vegetable oil* yang dapat digunakan adalah limbah minyak wijen, limbah minyak bunga matahari, limbah minyak kedelai, limbah minyak jagung, limbah minyak sawit atau limbah minyak kacang tanah. Wahyudi dan Yuniarti (2012) menyebutkan bahwa kinerja campuran daur ulang aspal dapat diperbaiki dengan pemberian minyak biji jarak sebesar 10% terhadap aspal bekas yang mempunyai kadar 6% terhadap berat total campuran. Dalam penelitian berikutnya, Yuniarti (2012) menyimpulkan bahwa penggunaan minyak biji nyamplung (*Calophyllum inophyllum* L) sebesar 3% terhadap kadar aspal dapat meremajakan aspal bekas sehingga dapat dipakai kembali pada konstruksi perkerasan jalan raya. Selanjutnya, Yuniarti (2015) menyebutkan bahwa penggunaan getah pinus sebagai bagian dari *modifier* asbuton menghasilkan campuran perkerasan beraspal yang dapat memikul beban lalu lintas berat.

Pohon pinus (*Pinus merkusii*) merupakan salah satu jenis pohon industri yang mempunyai nilai produksi tinggi dan cocok untuk reboisasi. Tinggi pohon pinus bisa mencapai 35 meter. Pohon pinus berperan penting dalam konservasi lahan, penghasil kayu dan getah. Produksi getah pinus di Indonesia cukup besar dan berpotensi untuk terus meningkat (Coppen and Hone, 1995). Pada tahun 2012, Perum Perhutani memproduksi 101.266 ton getah pinus dari total areal 163.150 hektar hutan pinus (Perhutani, 2012). Gambar 1 menunjukkan pohon pinus yang diambil getahnya.



Gambar 1. Pohon pinus

Adapun abu terbang (*fly ash*) merupakan abu hasil pembakaran batubara yang biasanya dihasilkan dari sektor pembangkit listrik. Penanganan *fly ash* umumnya ditumpuk begitu saja di dalam area industri atau di lahan kosong sebagai urugan. Penumpukan *fly ash* batubara ini menimbulkan permasalahan karena abu yang beterbangan di udara dan dapat terhisap oleh manusia dan hewan. Beterbangannya abu batubara ini juga dapat mempengaruhi kondisi air dan tanah di sekitarnya sehingga dapat mematikan tanaman. Akibat buruk terutama ditimbulkan oleh unsur-unsur Pb, Cr dan Cd yang biasanya terkonsentrasi pada fraksi butiran yang sangat halus (0,5-10 µm). Butiran tersebut mudah melayang dan terhisap oleh manusia dan hewan, sehingga terakumulasi dalam tubuh manusia dengan konsentrasi tertentu dapat memberikan akibat buruk bagi kesehatan.

Komponen utama dari *fly ash* batubara yang berasal dari pembangkit listrik adalah silika (SiO₂), alumina, (Al₂O₃), besi oksida (Fe₂O₃), kalsium (CaO) dan sisanya adalah magnesium, potasium, sodium, titanium dan belerang dalam jumlah yang sedikit (Putri, 2008). *Fly ash* terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel *fly ash* hasil pembakaran batubara lebih kecil dari 0,075mm. Kerapatan *fly ash* berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya antara 170 sampai 1000 m²/kg. (Pratama, dkk, 2007).

Fly ash memiliki kegunaan yang cukup beragam antara lain sebagai bahan bakusemen, aditif dalam pengolahan limbah, filler aspal, dan lain-lain. Karbon sisa pembakaran dalam *fly ash* memiliki kualitas setara karbon aktif sehingga investigasi mengenai pemisahan karbon sisa berpotensi meningkatkan nilai ekonomis dari *fly*

ash. Mengingat kegunaan dari *fly ash* antara lain sebagai filler aspal serta pentingnya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, penggunaan *fly ash* sebagai salah satu komponen bio-aspal ini diharapkan menghasilkan produk yang ramah lingkungan dan mengurangi ketergantungan terhadap aspal yang bersumber dari minyak bumi.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Transportasi dan Jalan Raya Fakultas Teknik Universitas Mataram dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Persiapan Bahan Pembentuk Bio-aspal
Bahan-bahan yang digunakan sebagai komponen bio-aspal adalah getah pinus, *fly ash*, dan bahan-bahan nabati lainnya serta aspal minyak.
2. Pemeriksaan Sifat-sifat Fisik Bio-aspal
Pemeriksaan sifat-sifat fisik bio-aspal terdiri dari uji penetrasi, titik lembek, titik nyala, daktilitas, kehilangan berat dan berat jenis. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik masing-masing jenis bio-aspal, yaitu bio-aspal B-21, B-23, B-25 dan B-27. Bio-aspal B-21, B-23, B-25 dan B-27 adalah bio-aspal dengan kadar getah pinus, *fly ash* dan minyak nabati lainnya sebesar 21%, 23%, 25% dan 27%.
3. Pemeriksaan Sifat-sifat Fisik Agregat
Pemeriksaan sifat-sifat fisik agregat ini terdiri dari uji analisa saringan, kadar air, keausan, berat jenis dan kelekatan terhadap aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan agregat yang memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.
4. Pembuatan Campuran Bio-aspal dan Agregat
Distribusi ukuran agregat yang digunakan sesuai dengan Tabel 1 berikut :

Tabel 1. Distribusi ukuran agregat

| Ukuran saringan | | Gradasi rencana (% lolos) | Spesifikasi (% lolos) | Daerah larangan (% lolos) |
|-----------------|-------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| ASTM | (mm) | | | |
| 3/4" | 19 | 100 | 100 | |
| 1/2" | 12,5 | 92 | 90 - 100 | |
| 3/8" | 9,5 | 76 | maks.100 | |
| No. 4 | 4,75 | 54 | 28 - 58 | |
| No. 8 | 2,36 | 38 | - | 39,1 |
| No. 16 | 1,18 | 23 | - | 25,5 - 31,6 |
| No. 30 | 0,60 | 18 | - | 19,1 - 23,1 |
| No. 50 | 0,30 | 12 | - | 15,5 |
| No. 200 | 0,075 | 5 | 4 - 10 | |

Campuran yang dibuat adalah jenis *asphalt concrete-wearing course (AC-WC)* dengan menggunakan kadar aspal sebagai berikut (Puslitbang PU, 2003) :

$$Pb = 0,035 (\% CA) + 0,045 (\% FA) + 0,18 (\% filler) + \text{konstanta} \dots\dots\dots (1)$$

Di mana :

Pb = kadar aspal.

CA = agregat kasar tertahan saringan nomor 8.

FA = agregat halus lolos saringan nomor 8 dan tertahan saringan nomor 200.

Filler = agregat halus lolos saringan nomor 200. Nilai konstanta berkisar 0,5- 1,0 (untuk Laston). Dalam penelitian ini dipakai konstanta sebesar 0,75.

Berdasarkan gradasi agregat sebagaimana yang tercantum pada Tabel 1, diperoleh *coarse aggregate* = 62%, *fine aggregate* = 33% dan *filler* sebesar 5%. Agregat dan bio-aspal dicampur secara panas (*hotmix*) pada suhu 155°C kemudian dipadatkan dengan pemadat Marshall sebanyak 75 kali pada masing-masing sisinya sesuai dengan SNI 06-2489-1991.

5. Pengujian Sifat-Sifat Volumetrik Campuran Bio-aspal dan Agregat
 Pengujian ini meliputi berat jenis, tebal lapisan aspal dan rongga udara baik rongga pori di antara mineral agregat maupun rongga pori yang terisi aspal.
6. Pengujian Stabilitas dan Kelelahan
 Pengujian stabilitas ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan campuran perkerasan menahan beban dan lalu lintassedangkan kelelahan (*flow*) merupakan indikator dari kelenturan. Pengujian stabilitas dan kelelahan dilakukan dengan alat uji Marshall.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bio-aspal yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari aspal minyak, getah pinus, *fly ash* dan minyak nabati lainnya dengan komposisi sebagai berikut :

Tabel 2. Komposisi bio-aspal

| Bio-aspal | B-21 | B-23 | B-25 | B-27 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Aspal minyak (%) | 79 | 77 | 75 | 73 |
| <i>Fly ash</i> (%) | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Getah pinus (%) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Minyak nabati lainnya (%) | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Jumlah (%) | 100 | 100 | 100 | 100 |

Pemeriksaan dan pengujian sampel mengacu kepada Standar Nasional Indonesia (SNI), yaitu tes penetrasi sesuai dengan SNI 06-

2456-1991, titik lembek sesuai dengan SNI 06-2434-1991, titik nyala mengacu pada SNI 06-2433-1991, daktilitas sesuai dengan SNI 06-2432-1991, berat jenis sesuai dengan SNI 06-2441-1991 dan kehilangan berat sesuai dengan SNI 06-2440-1991. Tabel berikut menunjukkan karakteristik bio-aspal.

Tabel 3. Hasil pengujian bio-aspal

| Bio-aspal | B-21 | B-23 | B-25 | B-27 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Penetrasi (0,1 mm) | 79,9 | 78,6 | 78,5 | 73,4 |
| Daktilitas (cm) | 100 | 117 | 91,1 | 85,7 |
| Titik lembek (°C) | 33,6 | 35 | 35,4 | 37,9 |
| Titik nyala (°C) | 225 | 230 | 237 | 225 |
| Berat jenis | 1,085 | 1,142 | 1,112 | 1,111 |
| Kehilangan berat (%) | 0,19 | 0,24 | 0,235 | 0,225 |

Penetrasi adalah tingkat kekerasan aspal di mana nilai penetrasi yang lebih tinggi menunjukkan konsistensi aspal yang lebih lunak. Dari Tabel 2 dan Tabel 3 terlihat bahwa nilai penetrasi bio-aspal dengan kandungan *flyash* yang semakin tinggi akan menurunkan nilai penetrasinya. Hal ini disebabkan karena aspal minyak merupakan material yang bersifat visco-elastis sehingga penambahan *fly ash* dalam bio-aspal tersebut akan memperbesar tingkat kekerasan aspal tersebut.

Pemeriksaan daktilitas bertujuan untuk mengetahui sifat kohesi dalam aspal yang dilakukan dengan mengukur jarak terpanjang yang dapat ditarik antara dua cetakan yang berisi aspal pada suhu dan kecepatan tarik tertentu. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengetahui elastisitas bahan aspal yang ditunjukkan oleh benang aspal yang ditarik hingga putus. Dari Tabel 2 dan Tabel 3 di atas terlihat bahwa nilai daktilitas bio-aspal cenderung lebih rendah dengan semakin banyaknya kandungan *fly ash* dalam bio-aspal. Hal ini disebabkan karena *fly ash* merupakan partikel-partikel halus yang tidak dapat dimulurkan tanpa penambahan aspal minyak sehingga jumlah *fly ash* yang semakin besar dalam bio-aspal akan mengurangi tingkat kemulurannya.

Titik lembek merupakan suhu pada saat aspal dalam cincin yang diletakkan dalam air/gliserin mulai lembek karena pembebanan bola baja 3,5 gram. Temperatur titik lembek dibaca pada saat bola baja menyentuh pelat dasar yang terletak di bawah cincin pada tinggi 25,4 mm. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengetahui kepekaan aspal terhadap temperatur atau untuk menentukan suhu kelelahan dari aspal. Dari Tabel 2 dan Tabel 3, terlihat bahwa semakin besar kandungan *fly ash* dalam bio-aspal, semakin tinggi titik lembek aspal tersebut.

Titik lembek mempunyai keterkaitan yang erat dengan nilai penetrasinya. Semakin tinggi titik lembek, maka suhu yang dibutuhkan untuk melunakkan aspal tersebut semakin tinggi pula. Dilihat dari nilai penetrasi, bio-aspal dengan penambahan *fly ash* terbanyak menjadi paling keras sehingga secara otomatis akan meningkatkan nilai titik lembeknya. Aspal dengan titik lembek yang tinggi kurang peka terhadap perubahan temperatur sehingga sangat cocok diterapkan pada daerah tropis seperti Indonesia.

Titik nyala merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui suhu ketika aspal mulai menyala yang merupakan persyaratan yang harus dipenuhi untuk keselamatan pelaksanaan pekerjaan. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengetahui sifat-sifat aspal terhadap bahaya api, pada temperatur mana aspal akan terbakar atau menyala. Dari Tabel 2 dan Tabel 3 terlihat bahwa titik nyala bio-aspal mencapai titik tertinggi pada kandungan *fly ash* 18%. Ditinjau dari temperatur pencampuran aspal di pabrik pencampur aspal secara panas yaitu 155°C, maka bio-aspal dengan komposisi tersebut aman untuk jenis *hotmix*.

Berat jenis aspal adalah perbandingan antara berat aspal dan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu 25°C. Hasil pengujian ini digunakan dalam pekerjaan perencanaan campuran. Pada proporsi *fly ash* sebesar 14%, berat jenis bio-aspal adalah 1,085 kemudian meningkat cukup besar pada proporsi 16% *fly ash* menjadi sebesar 1,142. Namun demikian, pada penambahan *fly ash* berikutnya terjadi penurunan berat jenis. Hal ini disebabkan karena penambahan *fly ash* dalam bio-aspal akan semakin meningkatkan volume dari campuran tersebut.

Pengujian kehilangan berat aspal digunakan untuk mengetahui fraksi aspal yang mudah menguap akibat pemanasan, di mana aspal yang baik adalah aspal yang tidak mudah rapuh dan tidak banyak unsur yang hilang bila dipanaskan pada suhu tinggi. Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa kehilangan berat bio-aspal relatif kecil pada proporsi 14% *fly ash* namun meningkat cukup tajam pada bio-aspal dengan kandungan *fly ash* 16%. Pada penambahan proporsi *fly ash* berikutnya, kehilangan berat semakin kecil yang mengindikasikan terjadi ikatan yang baik antara aspal minyak dan *fly ash* sehingga tidak mudah

menguap walaupun dipanaskan pada suhu tinggi.

Berikut adalah hasil pengujian agregat yang digunakan pada *hot-mix asphalt*.

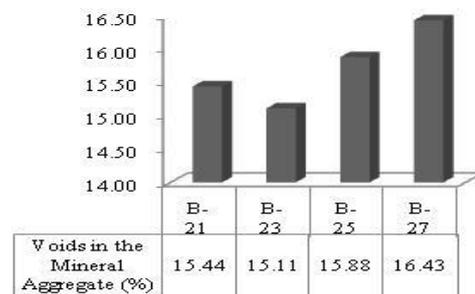
Tabel 4. Hasil pengujian agregat

| Jenis pengujian | Hasil pengujian | | Persyaratan*) |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | Agregat kasar | Agregat halus | |
| Keausan impact(%) | 9,27 | - | Maks. 40 |
| Berat jenis bulk | 2,684 | 2,735 | Min. 2,5 |
| Berat jenis semu | 2,784 | 2,738 | Min. 2,5 |
| Kadar air (%) | 1,39 | 1,09 | Maks. 2 |
| Kelekatan agregat terhadap aspal (%) | 100 | - | Min. 95 |

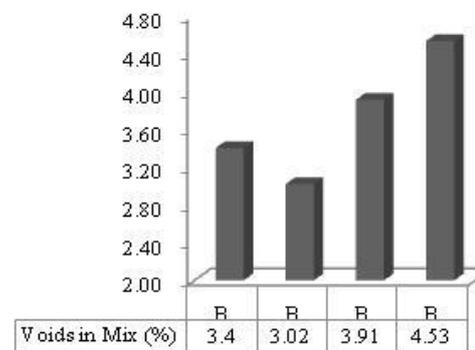
Sumber :*) Departemen PU, 2007.

Berdasarkan hasil pengujian terhadap agregat tersebut, terlihat bahwa agregat kasar dan agregat halus yang digunakan memenuhi spesifikasi sehingga dapat digunakan pada campuran aspal.

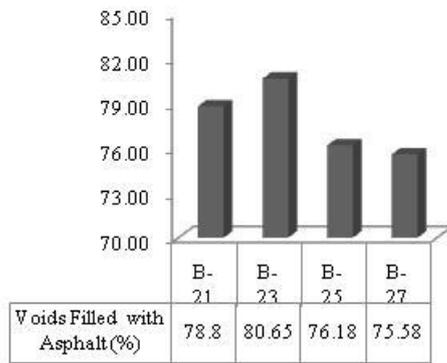
Hasil pengujian VMA (*Voids in the Mineral Aggregate*), VIM (*Voids in Mix*), VFA (*Voids Filled with Asphalt*), stabilitas Marshall, *flow* dan Marshall Quotient disajikan pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 7 berikut



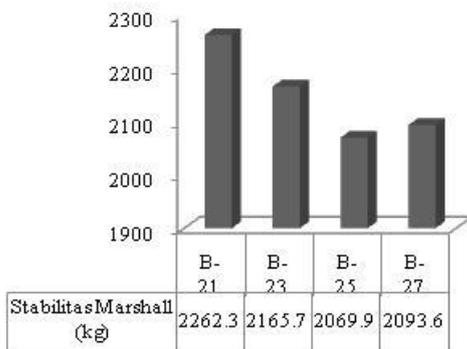
Gambar 2. Nilai VMA



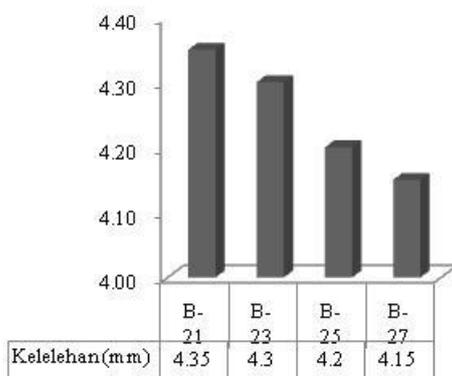
Gambar 3. Nilai VIM



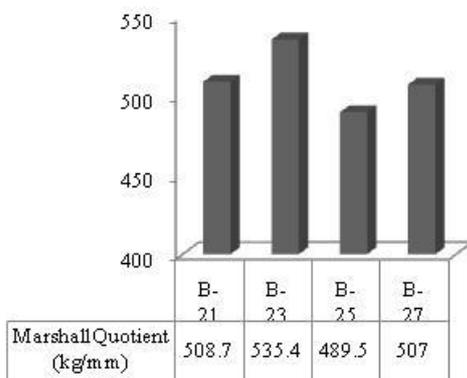
Gambar 4. Nilai VFA



Gambar 5. Nilai stabilitas Marshall



Gambar 6. Nilai kelelehan (flow)



Gambar 7. Nilai Marshall Quotient

Gambar 2 menampilkan nilai VMA masing-masing jenis bio-aspal pada kadar aspal sesuai nilai perhitungan kadar aspal optimum (Pb) sebesar 5,5%. Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa bio-aspal B-23 menghasilkan nilai VMA terendah dibandingkan dengan bio-aspal lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada campuran dengan bio-aspal B-23, rongga di antara mineral yang terbentuk adalah yang terkecil. Berdasarkan Tabel 2, dengan kandungan getah pinus dan bahan nabati lainnya yang sama, bio-aspal B-23 mengandung *fly ash* yang lebih rendah dibandingkan dengan bio-aspal B-25 dan B-27. Bio-aspal dengan komposisi ini menghasilkan ikatan yang kuat di antara bahan-bahan pembentuknya sehingga ketika dipadatkan menghasilkan campuran dengan rongga antara partikel-partikel agregat menjadi kecil. Fenomena tersebut dapat dilihat dari Tabel 3 di mana nilai kemuluran (daktilitas) bio-aspal B-23 tertinggi yaitu mencapai 117 cm. Pada campuran menggunakan bio-aspal B-21, kandungan aspal minyaknya 79%. Dengan aspal minyak yang jumlahnya lebih banyak dan *fly ash* yang berjumlah lebih sedikit dibandingkan dengan bio-aspal B-23, menghasilkan kohesi yang lebih kecil dan ikatan yang kurang kuat sehingga nilai VMA yang terbentuk menjadi lebih besar.

Pada Gambar 3, disajikan nilai VIM untuk masing-masing jenis bio-aspal. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai VIM terkecil juga terjadi pada campuran yang menggunakan bio-aspal B-23. Sebagaimana yang disebutkan sebelumnya, komposisi bahan-bahan pembentuk bio-aspal B-23 menghasilkan ikatan yang paling kuat di antara bio-aspal jenis lainnya sehingga rongga dalam campuran juga menjadi kecil.

Nilai VFA adalah besarnya rongga di dalam campuran yang terselimuti aspal. Karena bio-aspal B-23 menghasilkan VMA yang terkecil, maka rongga yang terbentuk di antara mineral agregat juga mengecil sehingga menghasilkan selimut aspal yang semakin tebal. Besarnya nilai VFA masing-masing spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 5 menunjukkan besarnya nilai stabilitas campuran menggunakan masing-masing jenis bio-aspal. Dari gambar tersebut terlihat bahwa campuran menggunakan bio-aspal B-21 menghasilkan stabilitas tertinggi. Dari Gambar 4 terlihat bahwa campuran menggunakan bio-aspal B-23 menghasilkan

selimut aspal yang lebih tebal, maka sifat saling mengunci di antara partikel-partikel agregatnya lebih rendah dibandingkan dengan campuran menggunakan bio-aspal B-21. Sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5, stabilitas Marshall makin berkurang pada campuran menggunakan bio-aspal B-25. Pada campuran yang menggunakan bio-aspal B-27, nilai stabilitas Marshall meningkat kembali karena dengan proporsi *fly ash* yang mencapai 20%, kekentalan bio-aspal meningkat yang membuat daya ikatnya menjadi lebih kuat.

Dari Gambar 6, terlihat bahwa nilai *flow* semakin menurun seiring dengan berkurangnya kandungan aspal minyak dalam bio-aspal. Nilai *flow* merupakan indikator dari deformasi yang terjadi ketika campuran menerima pembebanan. Semakin banyak kandungan *fly ash* dalam bio-aspal, bio-aspal cenderung lebih kental sehingga campuran kurang lentur dan nilai *flow* menjadi lebih kecil.

Nilai Marshall Quotient adalah hasil bagi antara stabilitas Marshall dan *flow*. Dengan nilai stabilitas dan *flow* yang telah diperoleh, maka Marshall Quotient dapat ditentukan. Dari Gambar 7 terlihat bahwa Marshall Quotient mencapai tertinggi pada campuran yang menggunakan bio-aspal B-23.

Dengan diperolehnya nilai VMA, VIM, VFA, stabilitas Marshall, *flow* dan Marshall Quotient, maka kinerja campuran tersebut dibandingkan dengan persyaratan standar yang telah ditetapkan Direktorat Jenderal Bina Marga. Menurut Departemen Pekerjaan Umum (2007), VMA adalah minimal 15%, VIM 3,5 - 5,5%, VFA minimal 65%, stabilitas Marshall minimal 1000 kg, *flow* minimal 3,0 mm, Marshall Quotient minimal 300 kg/mm, maka campuran yang memenuhi seluruh persyaratan adalah campuran menggunakan bio-aspal B-25 dan B-27. Namun karena campuran B-27 menggunakan lebih sedikit aspal minyak sehingga berpotensi untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam, maka direkomendasikan bio-aspal B-27 yang lebih ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Bio-aspal yang digunakan pada penelitian ini dibuat dari *fly ash*, getah pinus dan minyak nabati lainnya pada kadar 21%, 23%, 25%

dan 27% yang diwakili dengan kode spesimen berturut-turut B-21, B-23, B-25 dan B-27.

2. Nilai penetrasi bio-aspal berada pada kisaran 73,4-79,9 dmm, titik lembek pada rentang 33,6-37,9°C, titik nyala seluruhnya di atas 220°C, kehilangan berat pada rentang 0,19-0,24%, dan berat jenis seluruhnya lebih dari 1,0. Adapun nilai daktilitas tertinggi dicapai oleh bio-aspal B-23 sebesar 117 cm.
3. Ditinjau dari nilai VMA, VIM, VFA, stabilitas Marshall, *flow* dan Marshall Quotient, campuran yang memenuhi seluruh persyaratan adalah campuran yang menggunakan bio-aspal B-25 dan B-27.
4. Mengingat jumlah aspal minyak yang digunakan lebih sedikit, maka bio-aspal yang direkomendasikan adalah bio-aspal B-27 yang mengandung 20% *fly ash*, 5% getah pinus dan 2% minyak nabati lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bailey, H. K. and Phillips, P., 2010. Asphalt Rejuvenation, United States Patent Application Publication No. US 2010/0034586 A1.
- Coppen, J.J.W. and Hone, G.A., 1995. Gum Naval Stores: Turpentine and Rosin from Pine Resin, Natural Resources Institute, Food And Agriculture Organization of The United Nations, Rome.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian-Pengujian Penetrasi Bahan-bahan Bitumen, SNI 06-2456-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian Titik Lembek Aspal dan Ter, SNI 06-2434-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar dengan Cleveland Open Cup, SNI 06-2433-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian Daktilitas Bahan-bahan Aspal, SNI 06-2432-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian

- Berat Jenis Aspal Padat, SNI 06-2441-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Pengujian Kehilangan Berat Minyak dan Aspal dengan Cara A, SNI 06-2440-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. Standar Nasional Indonesia: Metode Campuran Aspal dengan Alat Marshall, SNI 06-2489-1991, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Departemen Pekerjaan Umum, 2007. Buku III Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan, Jakarta.
- Huang, S. C., Salomon, D. and Haddock, J. E., 2012. Work-shop Introduction, Transportation Research Circular E-C165, p. 1, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Nigen-Chaidron, S. and Porot, L., 2008. Rejuvenating Agent and Process for Recycling of Asphalt, World Intellectual Property Organization.
- Peralta, J., Williams, R.C., Rover, M. and Silva, H.M.R.D., 2012. Development of Rubber-Modified Fractionated Bio-Oil for Use as Noncrude Petroleum Binder in Flexible Pavements, Transportation Research Board, Washington, D.C.