

EFFECT OF RH-WMA ADDITIVE ON ENGINEERING PROPERTIES OF BITUMEN PG-76

KESAN BAHAN TAMBAH RH-WMA KE ATAS SIFAT- SIFAT KEJURUTERAAN BITUMEN PG-76

Gatot Rusbintardjo^a, Sitti Salmah Abdul Wahab^b, Faridah Hanim Khairuddin^{b,c*}, Ahmad Nazrul Hakimi Ibrahim^b, Nur Izzi Md Yusoff^b, Mohd Rosli Hainin^d

^aJabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Islam Sultan Agung (UNISSULA), Semarang, Indonesia

^bPusat Penyelidikan Bandar Pintar & Lestari, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

^cJabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

^dJabatan Geoteknik dan Pengangkutan, Fakulti Kejuruteraan Awam, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia

Article history

Received

27 August 2018

Received in revised form

25 April 2019

Accepted

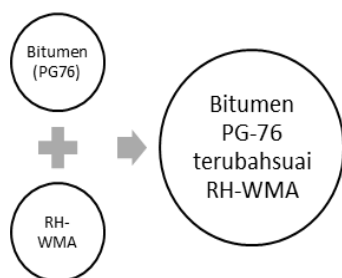
13 May 2019

Published online

25 June 2019

*Corresponding author
hanim@upnm.edu.my

Graphical abstract



Abstract

Pavement failure phenomena is normally caused by low quality of mixture materials, especially bitumen. The modification of bitumen is one of the alternatives to improve the performance of the material. Therefore, this study was conducted to investigate the performance of a polymer-modified binder (PG-76) with the addition of different percentages of Reduce Heat-Warm Mix Asphalt (RH-WMA) at 1, 2, 3, 4 and 5 % (by-weight of binder). Several testings such as penetration, softening point and ductility tests were conducted to determine the physical properties of PG-76 and RH-WMA modified binders. The molecular structures of the materials were analysed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) test while the contact angle test was conducted to investigate the type of binder's surface. In addition, an optical microscopy test was carried out to determine the morphological properties of the modified binders. Results show that the PG-76's hardness decreases with the increasing of RH-WMA percentage, but the ductility values are still within the specification. The FTIR test shows an increase of RH-WMA percentage does not provide a significant reaction of the binder and the original properties of the materials remain. The morphology test shows that all percentage of RH-WMA selected are well dispersed in bitumen PG-76. Based on the contact angle results, all the PG-76 and RH-WMA modified binders fall into hydrophobic category.

Keywords: RH-WMA, Fourier Transform Infrared Spectrometer, Morphology, Surface free energy

Abstrak

Fenomena kegagalan turapan kebiasaannya adalah berpunca daripada prestasi bahan campuran yang lemah, terutamanya bitumen. Pengubahsuaian bitumen atau bahan pengikat adalah satu alternatif untuk meningkatkan prestasi bahan tersebut. Oleh itu, kajian ini dijalankan adalah untuk mengkaji prestasi bahan pengikat terubahsuai polimer (PG-76) dengan penambahan bahan tambah campuran bitumen suam (RH-WMA) pada peratusan

1, 2, 3, 4 dan 5 % (daripada berat bahan pengikat). Beberapa ujikaji seperti penusukan, titik lembut dan kemuluran telah dijalankan bagi menentukan sifat-sifat fizikal PG-76 dan terubahsuaikan RH-WMA. Bagi menentukan struktur molekular bahan, ujian spektrometer inframerah (FTIR) telah dijalankan manakala ujian sudut sentuh telah dijalankan untuk mengetahui jenis permukaan bahan. Selain itu, ujikaji mikroskop optik telah dilakukan bagi mengetahui sifat morfologi bahan tersebut. Keputusan ujian menunjukkan bahawa kekerasan PG-76 semakin menurun apabila berlakunya peningkatan peratusan RH-WMA, namun nilai kemuluran masih berada di dalam spesifikasi yang ditetapkan. Bagi ujikaji FTIR, keputusan menunjukkan bahawa pertambahan RH-WMA ke atas PG-76 tidak memberikan tindak balas kimia yang ketara dan masih mengekalkan struktur molekular asal bahan tersebut. Ujian morfologi pula menunjukkan selerakan RH-WMA di dalam PG-76 adalah sekata bagi semua peratus RH-WMA yang dipilih. Berdasarkan keputusan ujikaji titik sentuh, kesemua bahan pengikat PG-76 terubahsuaikan RH-WMA berada di dalam kategori hidrofobik.

Kata Kunci: RH-WMA, Spektrometer infra merah, Morfologi, Permukaan bebas tenaga

© 2019 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Campuran bitumen panas (HMA) adalah bahan yang diguna pakai dalam pembinaan jalan raya. Campuran ini perlu di gaul dan dipadatkan pada suhu yang tinggi iaitu sekitar 155-180 °C. Alternatif kepada penggunaan suhu yang tinggi, kini, satu campuran baru yang menggunakan suhu yang lebih rendah sekitar 120-135 °C iaitu campuran bitumen suam (WMA) mula digunakan secara meluas [1-3]. Terdapat banyak kebaikan yang boleh diperolehi daripada teknologi WMA. Dilihat dari sudut alam sekitar, bahan ini dapat membantu mengurangkan pengeluaran suhu dan mengurangkan penggunaan tenaga serta bahan api [4]. Dari segi aspek operasi pula, WMA membantu dalam mempercepatkan pembukaan jalanraya selepas proses pembinaan dan mengurangkan pendedahan pekerja terhadap bahan berkasinogen serta membantu dalam mengurangkan penuaan [5]. Kajian mendapati bahawa prestasi campuran WMA adalah setanding dengan campuran konvensional (HMA) [6].

Terdapat tiga jenis proses teknologi WMA yang boleh digunakan. Proses yang pertama dikenali sebagai teknologi buih dan boleh dibahagikan kepada dua kategori [7]. Kategori yang pertama adalah bahan tambahan air yang mengandungi zeolite sintetik yang terdiri daripada alumina silikat dan logam alkali. Kategori yang kedua adalah berasaskan air di mana ianya hanya menggunakan air untuk menghasilkan buih apabila bersentuh dengan bahan pengikat panas. Contoh bahan tambahan air adalah seperti aspha-min dan advera manakala bahan tambahan berasaskan air adalah Dwi-Acuan Hijau (*Double Barrel Green*) dan WMA berbuih [5]. Proses yang kedua adalah bahan tambah organik untuk mengurangkan kelikatan bitumen di mana dengan cara menyuntik bahan tambah tersebut ke dalam campuran bitumen dan bahan mineral [8]. Bahan tambah organik mempunyai titik lebur yang kurang daripada suhu normal dan ianya dapat membantu mengurangkan

kelikatan bitumen. Contoh bahan organik yang digunakan adalah Sasobit, Asphaltan-B dan Licomont BS-100 [7-9]. Proses yang ketiga pula adalah proses menggunakan bahan tambah kimia untuk mengurangkan kelikatan bitumen [10]. Bahan tambah kimia ini dicampur dengan bitumen sehingga sebatu [7]. Bahan tambah kimia adalah bahan yang mampu mengurangkan geseran dalaman antara pengikat dan zarah agregat semasa proses pemadatan. Contoh bahan tambah kimia adalah Evotherm, Rediset dan Cecabase [11-12].

Teknologi WMA ini telah diperkenalkan di Eropah pada akhir tahun 1990 bagi mengurangkan pelepasan gas rumah hijau di bawah protokol Kyoto. Di Amerika Syarikat pula, WMA diperkenalkan pada tahun 2002. Di Eropah, WMA telah digunakan secara terbuka pada tahun 1999, di Amerika Syarikat pada tahun 2004 dan di India pula pada tahun 2009. Kebanyakan negara seperti Jerman, Norway, Perancis, Amerika Syarikat, Kanada, China, Korea, Afrika Selatan, India dan Brazil telah mula menggunakan WMA di jalan-jalan utama selepas beberapa ujikaji makmal dilakukan [1]. Jadual 1 menunjukkan percubaan pertama yang dilakukan ke atas jalan-jalan awam di beberapa buah negara. Berbanding dengan negara Eropah, Amerika Syarikat lebih menampakkan hasil yang positif bagi aplikasi WMA. WMA bukan saja boleh digunakan sebagai lapisan asas, malah ianya juga boleh digunakan dalam membaiki pulih dan menyelenggara jalan [5].

Jadual 1 Percubaan pertama yang dijalankan ke atas jalan awam [5]

Percubaan pertama (Tahun)	Negara	Panjang (km)	Bahan Tambah WMA
1999	German	*	Aspha-min ^R
1999	Norway	*	*
2000	Perancis	*	*

Percubaan pertama (Tahun)	Negara	Panjang (km)	Bahan Tambah WMA
2004	Amerika Syarikat	*	*
2005	Kanada	*	*
2007	China	1.00	Evotherm
2008	Korea	0.24	LEADCAP WMA
2008	Afrika Selatan	*	WMA-T
2009	India	0.50	Thiopave
2010	Brazil	0.40	Gemul XT-14

Di Malaysia, penyelidikan tentang penggunaan bahan tambah WMA juga sedang giat dijalankan. Sebagai contoh, Hamzah *et al.* [13] dan Jamshidi *et al.* [14] telah menggunakan Sasobit untuk meningkatkan ciri-ciri reologi bitumen. Abdullah *et al.* [5] telah menggunakan dua jenis bahan iaitu WMA kimia dan tanah liat nano untuk meningkatkan prestasi bitumen bergred penusukan 80/100. Gungat *et al.* [15] telah mencampurkan Reduce Heat- Warm Mix Asphalt (RH-WMA) bersama dengan campuran bitumen kitar semula. Didapati bahawa RH-WMA telah menurunkan sedikit nilai kelikatan dan kekukuhan. Namun, memandangkan WMA merupakan satu teknologi baru, maka terdapat beberapa masalah lain yang dibangkitkan mengenai sifat fizikal serta reka bentuk WMA dalam pembinaan jalan raya. Oleh itu, kajian ini dilakukan untuk mengkaji kesan RH-WMA ke atas sifat-sifat fizikal, kimia dan morfologi bitumen terubahsuai polimer (PG-76). RH-WMA adalah aditif yang terhasil daripada rangkaian silang polietilena. RH-WMA direka bentuk untuk mengurangkan kelikatan bitumen pada suhu yang tinggi di samping menguatkan struktur bitumen pada suhu yang rendah. Selain itu, ianya juga mampu mengurangkan suhu pengeluaran tanpa menjejaskan prestasi turapan [16-17].

2.0 KAEDAH KAJIAN

2.1 Bitumen PG-76

Dalam kajian ini, bitumen PG-76 digunakan sebagai sampel kawalan. Bitumen ini dipilih kerana ciri-ciri fizikalnya yang lebih tebal, keras dan tahan suhu yang tinggi. Selain itu, bitumen jenis ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap penuaan usia bitumen. Jadual 2 menunjukkan ciri-ciri fizikal dan reologi bahan tersebut.

2.2 Bahan tambah RH-WMA

Bahan tambah RH-WMA yang merupakan campuran bitumen suam (WMA) yang tergolong dalam kategori bahan tambah kimia digunakan dalam kajian ini. Berdasarkan Jadual 3, RH-WMA adalah sejenis bahan cecair, berwarna coklat, tidak

bersifat toksik dan tidak mempunyai bau. Ianya juga bersifat anti calar, kalis air dan merupakan bahan kimia [18]. RH-WMA mempunyai banyak kelebihan dari segi alam sekitar, ekonomi dan operasi. Antaranya ialah ianya dapat mengurangkan suhu campuran dan suhu pematatan tanpa menjejaskan prestasi bahan turapan. Sifatnya yang memerlukan suhu lebih rendah daripada HMA dalam penghasilannya mampu menjimatkan penggunaan tenaga dan bahan api sebanyak 20 %. Selain itu, WMA juga mampu mengurangkan kelikatan bitumen agar agregat dapat disalut pada suhu yang rendah.

2.3 Penyediaan Bahan

Dalam kajian ini, bitumen PG-76 dan RH-WMA dicampur menggunakan kaedah cair. Bitumen PG-76 dipanaskan sehingga cair pada suhu 145°C manakala RH-WMA ditambah pada lima peratusan yang berbeza iaitu 1, 2, 3, 4 dan 5 % daripada berat bitumen. Alat pengisar mekanikal ditetapkan pada kelajuan 2000 putaran per minit (rpm) dan sampel diadun selama 30 minit pada suhu 180 °C sehingga homogen. Campuran yang homogen dinilai melalui ujian titik lembut [19]. Jadual 4 menunjukkan penyediaan bahan pengikat PG-76 terubahsuai RH-WMA.

2.4 Ujikaji Fizikal

Ujikaji fizikal yang dijalankan ke atas sampel kawalan dan bitumen PG-76 terubahsuai RH-WMA ialah ujikaji penusukan, ujikaji titik lembut dan ujikaji kemuluran. Ujikaji-ujikaji ini telah dijalankan merujuk kepada ASTM D5, ASTM D36 dan ASTM D113.

Jadual 2 Ciri- ciri fizikal dan reologi bitumen PG-76

Spesifikasi Kualiti Ujikaji	Standard Ujikaji	Unit	Keperluan	Keputusan
Titik lembut	ASTM D36	°C	Min. 70 °C	93
Penusukan	ASTM D5	0.1 mm	Min. 45	46
Titik kilat	AASHTO T48	°C	Min. 260 °C	343
Spesifikasi Prestasi				
Kelikatan 135 °C	ASTM D4402	Pa.s	Max. 3 Pa.s	2.45
Dinamik Ricih, G*/sin δ	AASHTO T315	kPa	Min. 1.00 kPa	2.10
Ujikaji Ketuhar Filem Nipis (AASHTO T240)				
Kehilangan berat	AASHTO T240		Max. 1.00%	0.04
Dinamik Ricih, G*/sin δ	AASHTO T315	kPa	Min. 2.20 kPa	3.40
Tekanan Penuaan (AASHTO R28)				
Suhu ujikaji Penuaan PAV			100°C	
Dinamik Ricih, G*/sin δ	AASHTO T315	kPa	Min. 5000 kPa	1200

Jadual 3 Sifat fizikal bahan tambah RH-WMA [25]

Bahan	Penerangan	Sifat fizikal	Graviti Tentu	Ciri-ciri
RH-WMA	Lilin Polietilena	Cecair	0.89	Berwarna coklat dan tidak berbau

Jadual 4 Campuran bitumen PG-76 terubahsuai RH-WMA

Bahan	S1	S2	S3	S4	S5	Ciri-ciri Campuran
Bahan Pengikat (%)	100	98	97	96	95	2000 rpm, 30 min, 180 °C
Berat Bahan Pengikat (gm)	350	*	*	*	*	
RH-WMA (%)	1	2	3	4	5	

2.5 Spektrometer Infra Merah (FTIR)

Spektrometer Infra Merah (FTIR) hanya boleh menilai secara kualitatif berdasarkan bahan yang dikenali pada masa ini [20]. Keputusan yang diperolehi daripada ujikaji FTIR dianalisis untuk melihat sekiranya terdapat tindak balas kimia setelah pengubahsuaian bahan dilakukan. Matlamat penggunaan kaedah FTIR adalah untuk mengenal pasti kewujudan kumpulan berfungsi kimia pada bitumen terubahsuai. Selain itu, ujikaji ini bertujuan untuk mengenal pasti sama ada ia memainkan peranan dalam memberi kesan kepada sifat reologi dan sifat termodinamik pengikat bio bitumen biasa dan bitumen terubahsuai [21-23]. Unit bagi bilangan gelombang adalah cm^{-1} dimana bilangan gelombang adalah songsang bagi panjang gelombang. Konsep utama FTIR adalah berdasarkan perkaitan antara molekul ikatan kovalen dan frekuensi cahaya inframerah (IR). Luas jalur dan ketinggian puncak spektra FTIR digunakan secara meluas untuk menentukan kekuatan sesebuah ikatan [24].

2.6 Mikroskopik Optik

Alat DINO-LITE Pro Digital Mikroskop 500x digunakan untuk mengkaji morfologi bahan pengikat terubahsuai. Dalam ujikaji ini, sampel dipanaskan sehingga cair dan dititiskan di atas plat kaca sehingga permukaan menjadi rata. Sampel diuji menggunakan mikroskop pada suhu bilik.

2.7 Ujikaji Sudut Sentuh

Ujikaji ini dijalankan untuk mengkaji samada bitumen terubahsuai RH-WMA bersifat hidropobik atau hidropilik. Hidropobik menunjukkan bahan yang bersifat kalis air manakala hidropilik pula dapat menyerap air dengan baik. Ciri-ciri ini ditentukan dengan mengukur sudut jatuh cecair ke atas permukaan bahan. Sudut jatuh yang mempunyai nilai lebih kecil daripada 90° dikategorikan sebagai

hidropilik manakala sudut yang lebih besar daripada 90° berada dalam kategori hidropobik.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

3.1 Ujian Fizikal

Jadual 5 menunjukkan keputusan makmal bagi ujikaji penusukan, titik lembut dan kemuluran. Berdasarkan keputusan yang diperolehi, nilai penusukan meningkat seiring dengan peningkatan peratus nilai RH-WMA di dalam bitumen PG-76. Nilai penusukan bagi bitumen PG-76 dengan peratusan RH-WMA sebanyak 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 % adalah sebanyak 57, 78, 90, 104, 120 dan 133 dmm. Dapat dilihat nilai maksimum penusukan diperolehi apabila 5 % RH-WMA dimasukkan ke dalam bitumen PG-76. Keputusan yang sama turut diperolehi daripada kajian yang dilakukan oleh Al-Hachami *et al.* [25] dan Sulaiman *et al.* [26] ke atas bitumen bergred penusukan 80/100 dan 60/70. Pada penambahan 3% RH-WMA, nilai penusukan terhadap bitumen 80/100 adalah sebanyak 158 dmm manakala 60/70 pula adalah sebanyak 67 dmm. Di samping penambahan RH-WMA, gred bitumen juga mempengaruhi kekerasannya.

Bagi ujikaji titik lembut, suhu titik lembut yang terdapat pada bitumen PG-76 tanpa RH-WMA adalah lebih tinggi jika dibandingkan dengan bitumen yang telah ditambah dengan RH-WMA. Nilai suhu titik lembut bagi bitumen kawalan adalah 65.6°C manakala bagi sampel RH-WMA pada 1, 2, 3, 4 dan 5% masing-masing mencatatkan nilai 53.6 , 53.3 , 51.7 , 51.2 dan 49°C . Di samping itu, perbezaan suhu titik lembut diantara bitumen PG-76 dan yang mempunyai bahan tambah RH-WMA adalah direkodkan pada julat $12-16.6^\circ\text{C}$.

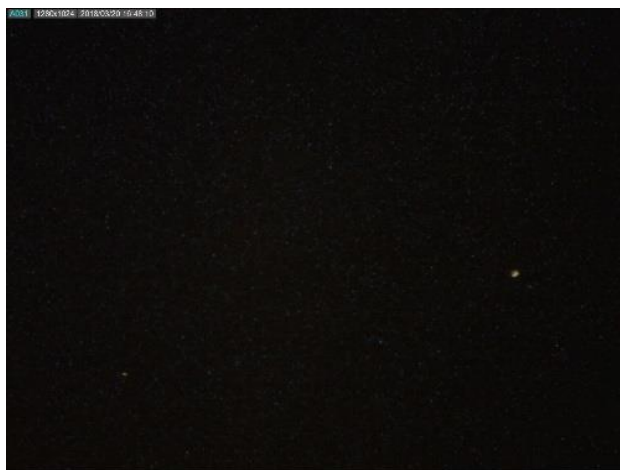
Berdasarkan keputusan yang diperolehi, nilai kemuluran bagi bahan pengikat PG-76 terubahsuai RH-WMA dan bitumen kawalan adalah tidak malar. Bagi sampel kawalan, nilai kemuluran adalah 110 cm manakala untuk sampel yang mengandungi 1, 2, 3, 4 dan 5 % RH-WMA adalah 103, 118, 102, 117 dan 115 cm. Nilai kemuluran ini dipengaruhi oleh kesan bahan tambah RH-WMA kepada kekuatan tegangan terhadap bahan pengikat RH-WMA di mana ianya masih mengikut spesifikasi ASTM D113 yang menyatakan nilai kemuluran haruslah berada di atas bacaan 100 cm. Peningkatan nilai penusukan dan pengurangan nilai titik lembut menunjukkan rintangan bahan pengikat terhadap perubahan bentuk serta mengurangkan kelesuan bahan pengikat tersebut [25]. Namun, kesan RH-WMA ke atas bahan pengikat PG-76 tidak menyebabkan nilai kemuluran bahan terjejas kerana nilai yang diperolehi masih mencapai piawaian ASTM.

Jadual 5 Sifat-sifat fizikal bitumen PG-76 dan terubah suai RH-WMA

Ujikaji	RH-WMA (%)					
	0	1	2	3	4	5
Penusukan (dmm)	57	78	90	104	120	133
Titik Lembut (°C)	65.6	53.6	53.3	51.7	51.2	49
Indeks Penusukan (PI)	2.45	0.84	1.17	1.27	1.67	1.40
Kemuluran (cm)	110	103	118	102	117	115

3.2 Ujikaji Morfologi

Ujikaji Mikroskop Optik dijalankan menggunakan instrumen DINO-LITE Pro Digital Mikroskop 500x. Rajah 1 menunjukkan mikrostruktur RH-WMA yang kelihatan di dalam bitumen. Berdasarkan imej tersebut, bitumen adalah berwarna hitam manakala bintik putih adalah RH-WMA. Rajah 1(a) menunjukkan bahan pengikat yang tidak mempunyai bahan tambah seterusnya diikuti dengan Rajah 1(b), (c), (d), (e) dan (f) masing-masing mempunyai 1, 2, 3, 4 dan 5 % RH-WMA. Imej menunjukkan penyebaran zarah RH-WMA kelihatan lebih jelas apabila peratusan RH-WMA semakin meningkat. Berdasarkan Rajah 1 (b-f), selerakan dan penyebaran zarah RH-WMA di dalam bahan pengikat PG-76 adalah sekata, menyeluruh dan tiada tompokan yang tidak konsisten di dalam imej yang ditunjukkan.



(a)



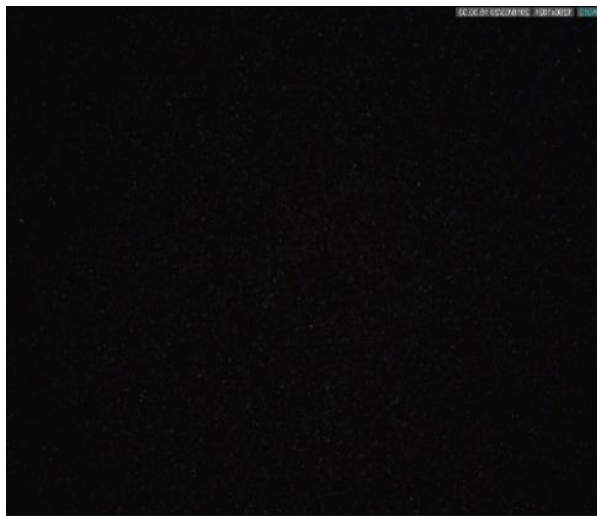
(b)



(c)



(d)



(e)



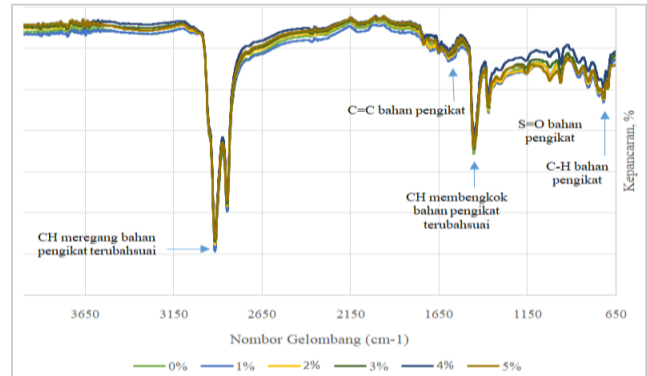
(f)

Rajah 1 (a-f) Morfologi bitumen PG-76 terubah suai RH-WMA

3.3 Spektrometer Inframerah (FTIR)

Dalam kajian ini, FTIR digunakan untuk mengkaji kehadiran molekul struktur kimia pada bahan pengikat PG-76 dan bahan pengikat terubah suai RH-WMA. Daripada jadual kumpulan senarai komprehensif yang dinyatakan dalam kajian Ouyang *et al.* [27], gelombang bacaan pada awal graf mencatatkan kehadiran kumpulan alkana (C-H) pada bacaan 723.10 cm^{-1} sehinggalah 863 cm^{-1} . Seterusnya, graf menunjukkan perubahan ketara daripada bacaan 965 cm^{-1} sehinggalah meningkat kepada 1600 cm^{-1} di mana pada bacaan ini, kumpulan berfungsi seperti butadina (HC=CH), sulfuroksida (S=O), hidrokarbon aromatik (C-H, C-H₂, dan CH₃) dan aromatik (C=C) dikesan. Akhir sekali, karboksil (C=O) pada bacaan 1700.80 cm^{-1} dikenalpasti sebelum mencapai bacaan kemuncak yang mencatatkan kehadiran hidrokarbon tepu iaitu 2850 cm^{-1} sehingga 2918.70 cm^{-1} [27]. Daripada

keputusan kajian dalam Rajah 2 dan Jadual 6, dapat disimpulkan tiada tindak balas kimia yang besar berlaku terhadap campuran RH-WMA ke atas bahan pengikat PG-76. Ini menunjukkan bahawa sifat kimia bahan pengikat PG-76 tidak berubah apabila diubahsuai dengan RH-WMA.



Rajah 2 Graf Kumpulan Komprehensif FTIR

Jadual 6 Senarai Kumpulan Komprehensif FTIR

Nama Komponen	Kumpulan Berfungsi	Had Spektrum (cm^{-1})
Alkana	C-H	723.10 – 863
Butadina	HC=CH	965
Sulfur Oksida	S=O	1020
Hidrokarbon Aromatik	C-H, CH ₂ and CH ₃	1372.80 – 1456.10
Aromatik	C=C	1600
Karboksil	C=O	1700.80
Hidrokarbon tepu	C-H	2850.90 – 2918.70

3.4 Ujikaji Sudut Sentuh

Ujikaji sudut sentuh adalah sebuah ujikaji untuk mengukur sudut jatuh bagi sesuatu bahan di samping menentukan tenaga bebas permukaan. Ujikaji sudut sentuh juga dapat menentukan ciri-ciri bahan samada ianya berada di kumpulan hidropobik ataupun hidropilik. Kedua-dua ciri ini ditentukan melalui bacaan sudut sentuh yang diperolehi daripada ujikaji ini. Berdasarkan Jadual 7, bacaan sudut jatuh pada permukaan bahan bagi kumpulan hidropobik adalah lebih daripada 90 ° manakala hidropilik pula kurang daripada 90 °. Ujikaji ini menggunakan air suling sebagai bahan cecair. Berdasarkan keputusan ujikaji, kesemua sampel berada dalam kategori hidropobik. Ianya juga menunjukkan had penggunaan bahan tambah RH-WMA adalah sebanyak 4 % kerana pada penggunaan 5 % bahan RH-WMA, sudut jatuh

permukaan bahan berada pada sudut 90° dan menghampiri kategori hidrofilik.

Jadual 7 Nilai Sudut Sentuh Dan Ciri-Ciri Bahan

RH-WMA (%)	Theta (M) (Darjah)	Ciri-ciri
0	108	Hidropobik
1	109	Hidropobik
2	104	Hidropobik
3	100	Hidropobik
4	98	Hidropobik
5	90	Hidropobik

4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan ujikaji makmal yang dijalankan ke atas bitumen PG-76 dan bitumen PG-76 terubah suai RHWMA, beberapa kesimpulan dapat dinyatakan. Pertama, penambahan RH-WMA ke dalam bitumen kawalan menyebabkan kekerasan dan ketekalan bitumen PG-76 semakin berkurang, akan tetapi, penambahan RHWMA tidak menjejaskan nilai kemuluran bahan. Hal ini kerana, nilai bacaan kemuluran untuk semua jenis bitumen terubah suai adalah melebihi 100 cm. Selain itu, penyebaran bahan tambah RH-WMA di dalam bitumen PG-76 adalah sekata berdasarkan keputusan ujikaji morfologi. Penambahan RH-WMA juga tidak memberikan kesan yang besar terhadap tindak balas kimia di dalam bitumen PG-76. Hal ini menunjukkan sifat molekul kimia di dalam bitumen kawalan tidak terganggu dengan adanya bahan tambah RH-WMA. Ujikaji titik sentuh pula menunjukkan tahap maksima penggunaan RH-WMA sebagai bahan tambah adalah sebanyak 4 % kerana pada penambahan 5 % RH-WMA, permukaan bahan berada pada sudut 90° dan menghampiri kategori hidropilik.

Penghargaan

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas bantuan kewangan dan kemudahan di bawah Geran (DIP-2017-004).

Rujukan

- [1] Kumar, R. & Chandra, S. 2016. Warm Mix Asphalt Investigation on Public Roads - A Review. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CIVEJ)*. 3(2): 75-86.
- [2] Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Yusoff, N. I. M., & Hassan, N. A. 2016. High Temperature Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures with Nanoclay and Chemical Warm Mix Asphalt Modified Binders. *Journal of Cleaner Production*. 122: 326-334.
- [3] Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Hassan, N. A., & Yusoff, N. I. M. 2016. Engineering Properties of Asphalt Binders Containing Nanoclay and Chemical Warm-mix Asphalt Additives. *Construction and Building Materials*. 112: 232-240.
- [4] Rondón-Quintana, H. A., Hernández-Noguera, J. A., & Reyes-Lizcano, J. A. 2015. A Review of Warm Mix Asphalt Technology: Technical, Economical and Environmental Aspects. *Ingeniería e Investigación*. 35(3): 5-18.
- [5] Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Kamaruddin, N. H. M., Nayan, N., Hainin, M. R., Hassa, N. A., Jaya, R. P. & Yusoff, N. I. M. 2015. A Review on the Exploration of Nanomaterials Application in Pavement Engineering. *Jurnal Teknologi*. 73(4): 69-76.
- [6] Sebaaly, P. E., Hajj, E. Y. & Piratheepan, M. 2015. Evaluation of Selected Warm-mix Asphalt Technologies. *Road Materials and Pavement Design*. 16: 475-486.
- [7] Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. & Moreno, F. 2012. Warm Mix Asphalt: An Overview. *Journal of Cleaner Production*. 24: 76-84.
- [8] Goh, S. 2012. Development and Improvement of Warm-mix Asphalt Technology 194. <http://digitalcommons.mtu.edu/etds/239/> [14 Januari 2018].
- [9] Wu, C., & Zeng, M., 2012. Effects of Additives for Warm Mix Asphalt on Performance Grades of Asphalt Binders. *Journal of Testing and Evaluation*. 40(2): 265-272.
- [10] Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H. 2013. Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25(12): 1887-1897.
- [11] Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G. & Martinho, F. 2012. Pavement Engineering Materials: Review on the Use of Warm-mix Asphalt. *Construction and Building Materials*. 36: 1016-1024.
- [12] Sheth, N., Sebaaly, P. E., Hajj, E. Y. & Piratheepan, M. 2015. Evaluation of Selected Warm Mix Asphalt Additives. *Road Materials and Pavement Design*. 16: 475-486.
- [13] Hamzah, M. O., Jamshidi, A., Kanitpong, K., & Aman, M. Y., 2012. Parameters to Characterise the Effects of Sasobit® on the Rheological Properties of Unaged and Aged Asphalt Binders. *Road Material and Pavement Design*. 13(2): 368-375
- [14] Jamshidi, A., Hamzah, M. O., & Zahed, M. A., 2013a. Rheological Evaluation and Modeling of Sasobit®-Modified Asphalt Binder at High Temperatures. *Pet. Sci. Technol.* 31(5): 1574-1584.
- [15] Gungat, L., Yusoff, N. I. M., & Hamzah, M. O. 2016. Effects of RH-WMA Additive on Rheological Properties of High Amount Reclaimed Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*. 114: 665-672.
- [16] Wang, H., Dang, Z., You, Z. & Cao, D. 2012a. Effect of Warm Mixture Asphalt (WMA) Additives on High Failure Temperature Properties for Crumb Rubber Modified (CRM) Binders. *Construction and Building Materials*. 35: 281-288.
- [17] Wang, H., Dang, Z., You, Z., Hao, P. & Huang, X. 2012b. Analysis of the Low-temperature Rheological Properties of Rubberized Warm Mix Asphalt Binders. *Journal of Testing and Evaluation*. 40(7): 20120147.
- [18] Chin, C. 2005. Performance Graded Bitumen Specifications. *Sustainable Infrastructure Management Department ARRB*. 70(2004): 1-10.
- [19] Ibrahim, A. N. H., Khairuddin, F. H., Yusoff, N. I. M., Borhan, M. N., & Mohd Akhir, N. 2017. Sifat Mekanik dan Tingkah Laku Serapan Air Botumen Terubah suai Geopolimer. *Jurnal Teknologi*. 79(4): 2017.
- [20] Fini, E. H., Asce, M., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Asce, M., et al. 2011. Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder (November): 1506-1513
- [21] Caro, S., Vega, N., Huserl, J. & Alvarez, A. E. 2016. Studying the Impact of Biomodifiers Produced from

- Agroindustrial Wastes on Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*. 126: 369-380.
- [22] Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M., & Nadi, N. 2016. Chemical Modification of Waste Cooking Oil to Improve the Physical and Rheological Properties of Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*. 126: 218-226.
- [23] Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Nayan, M. N., & Hainin, M. R. 2013. Short Term and Long-term Aging Effects of Asphalt Binder Modified with Montmorillonite. *Key Engineering Materials*. (594-595): 996-1002.
- [24] Yang, S. H. & Suciptan, T. 2016. Rheological Behavior of Japanese Cedar-based Biobinder as Partial Replacement for Bituminous Binder. *Construction and Building Materials*. 114: 127-133.
- [25] Al-Hachami, M. M. S. 2016. Adhesion Characteristics of RH-WMA Modified Asphalt Binders Using Surface Free Energy. MSc Project Report, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.
- [26] Sulaiman, I. K. A. 2016. Engineering Properties of RH-WMA Modified Asphalt Binders: Experimental and Modelling Approaches. MSc Project Report, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.
- [27] Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y. & Zhang, Y. 2006. Improving the Aging Resistance of Asphalt by Addition of Zinc Dialkyldithiophosphate. *Fuel*. 85(7-8): 1060-1066.