

## SIFAT MEKANIK DAN TINGKAH LAKU RESAPAN AIR BITUMEN TERUBAHSUAI GEOPOLIMER

Ahmad Nazrul Hakimi Ibrahim\*, Faridah Hanim Khairuddin, Nur Izzati Md. Yusoff, Muhamad Nazri Borhan, Norliza Mohd Akhir

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

### Article history

Received

24 October 2016

Received in revised form

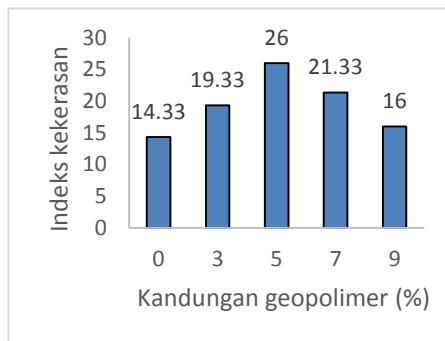
21 March 2017

Accepted

30 March 2017

\*Corresponding author  
nazrulhakimi@siswa.ukm.edu.my

### Graphical abstract



### Abstract

This study was conducted to investigate the mechanical properties and water absorption of geopolymer modified bitumen. Modification of 80/100 penetration grade bitumen with the 3, 5, 7 and 9% geopolymer (by weight of bitumen) were conducted using a melt blending technique. The study of mechanical properties of geopolymer modified bitumen was conducted using impact and hardness tests. On the other hand, water absorbed behaviour of bitumen was investigated using water absorption test. The results showed that the modification of base bitumen using geopolymer has increased the strength and hardness of binder up to 108% and 82% compared to the base bitumen. The absorption amount recorded by geopolymer modified bitumen can be considered as acceptable. This study found that 5% geopolymer is the optimum content of the modifier. Therefore, geopolymer can be considered as an alternative material to modify the mechanical properties of bitumen.

Keywords: Geopolymer, Bitumen, Mechanical properties, Impact, Hardness

### Abstrak

Kajian ini dijalankan untuk mengkaji sifat mekanik dan tingkah laku resapan air bagi bitumen terubahsuai dengan geopolimer. Pengubahsuaian bitumen asas bergred penusukan 80/100 dengan kandungan geopolimer sebanyak 3, 5, 7 dan 9% daripada jumlah berat bitumen telah dijalankan melalui kaedah campuran cair. Pengujian sifat mekanik bitumen terubahsuai geopolimer telah dilakukan menggunakan ujian hentaman dan ujian kekerasan bitumen. Tingkah laku serapan air pula diukur melalui kaedah ujian serapan air. Keputusan menunjukkan pengubahsuaian bitumen asas menggunakan geopolimer telah meningkatkan tahap ketahanan dan kekerasan bahan pengikat tersebut sebanyak 108% dan 82% berbanding bitumen asas. Kadar resapan yang dicatatkan oleh bitumen terubahsuai geopolimer menunjukkan masih di tahap yang terkawal. Kajian ini mendapati bahawa 5% adalah jumlah optimum geopolimer sebagai pengubahsuai dalam bitumen asas. Oleh yang demikian, geopolimer boleh dianggap sebagai bahan alternatif untuk mengubahsuai sifat-sifat mekanik bitumen.

Kata kunci: Geopolimer, Bitumen, Sifat mekanik, Hentaman, Kekerasan

© 2017 Penerbit UTM Press. All rights reserved

## 1.0 PENDAHULUAN

Bitumen adalah komponen utama dan paling penting dalam turapan jalan raya. Bitumen ditakrifkan sebagai cecair likat yang berwarna hitam atau coklat gelap, separa pepejal atau pepejal pada suhu bilik [1-3]. Menurut Apeagyei et al. [4], sifat-sifat bitumen berubah semasa hayat perkhidmatan disebabkan oleh beban kenderaan dan faktor persekitaran. Semasa suhu tinggi, kekerapan beban rendah, bitumen boleh menjadi lembut dengan kekukuhan yang rendah dan terdedah kepada ubah bentuk kekal. Sebagai campuran kompleks yang terdiri daripada alifatik, aromatik, dan hidrokarbon naftena, bitumen akan mudah mendapat penuaan yang disebabkan oleh resapan oksigen dan radiasi ultralembayung.

Penggunaan bitumen terubahsuai adalah penyelesaian yang terbaik untuk meningkatkan sifat-sifat bitumen, mengekalkan ketahanan turapan dan mengurangkan kekerapan penyelenggaraan [1], [4-6]. Menurut Sobolev et al. [8], Yu et al. [1] dan Yusoff et al. [9], pengubahsuaian pengikat berbitumen menggunakan polimer adalah mahal yang disebabkan oleh kos polimer tersebut. Jesteru itu, ramai pengkaji telah menjalankan kajian menggunakan bahan yang lebih murah seperti bahan sampingan industri untuk menghasilkan pengikat bitumen terubahsuai yang berprestasi tinggi dan murah [7], [9-12]. Penggunaan bahan sampingan industri seperti abu terbang sebagai bahan tambah di dalam pengikat bitumen dan campuran berasfalt telah banyak dilakukan sejak berdekad yang lalu [7], [13-15].

Pada masa kini, usaha penyelidikan yang lebih besar telah terarah kepada pembangunan geopolimer tidak organik kerana potensi penggunaan bahan ini. Penggunaan geopolimer telah lama dijalankan dalam pembinaan struktur konkrit dan telah dilaporkan memberi kesan yang baik terhadap prestasi struktur konkrit tersebut dari segi kekuatan, ketahanan dan jangka hayat konkrit tersebut di samping dapat menghasilkan struktur konkrit 'hijau' [16-20].

Walau bagaimanapun, kajian terhadap penggunaan geopolimer di dalam bahan pembinaan jalan raya adalah sangat jarang dilakukan. Jesteru itu, berdasarkan dapatan kajian terhadap prestasi penggunaan geopolimer di dalam struktur konkrit yang telah direkodkan, satu inovasi penggunaan geopolimer yang berasaskan abu terbang sebagai bahan mentah di dalam proses pengubahsuaian bitumen telah dijalankan dalam kajian ini. Dalam kajian ini, pencirian sifat mekanik bitumen terubahsuai geopolimer dinilai berdasarkan ujian hentaman dan kekerasan dan kadar resapan air turut diukur melalui kaedah ujian serapan air.

## 2.0 REKABENTUK UJIKAJI

### 2.1 Bahan

Bitumen yang digunakan di dalam kajian ini adalah bitumen bergred penusukan 80/100 yang dibekalkan

oleh kilang bitumen di Pelabuhan Klang. Abu terbang kelas F yang digunakan sebagai bahan mentah pula diperolehi daripada Stesen Jana Kuasa Sultan Salahuddin Abdul Aziz yang dimiliki oleh Kapar Energy Ventures Sdn Bhd di Selangor, Malaysia. Sifat-sifat fizikal bitumen asas dan komposisi kimia oksida abu terbang kelas F ditunjukkan di dalam Jadual 1 dan 2. Larutan alkali yang digunakan dalam kajian ini adalah larutan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan  $M_s = 2.0$  ( $\text{Na}_2\text{O}$ : 14.73%,  $\text{SiO}_2$ : 29.75% dan  $\text{H}_2\text{O}$ : 55.52%) dan larutan  $\text{NaOH}$  yang berkepekatan 8M.

Jadual 1 Sifat fizikal bitumen asas

Sifat	Spesifikasi	Had	Nilai
Penusukan (25°C, 0.1mm)	ASTM D 5	80-100	84
Kemuluran (25°C, cm)	ASTM D 113	Min 100	≥100
Titik lembut (°C)	ASTM D 36	Min 47	47.0
Graviti tentu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ASTM D 70	1.00-1.05	1.03

Jadual 2 Komposisi kimia abu terbang kelas F (%)

Oksida	Abu terbang
$\text{SiO}_2$	52.50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22.82
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.34
$\text{CaO}$	7.16
$\text{MgO}$	2.56
$\text{SO}_3$	0.20
$\text{K}_2\text{O}$	0.99
$\text{Na}_2\text{O}$	0.48
LOI	3.35

Sumber: Ibrahim et al. [2]

### 2.2 Penyediaan Bitumen Terubahsuai Geopolimer

Bitumen terubahsuai geopolimer dihasilkan dalam kajian ini melalui kaedah campuran cair. Langkah pertama dalam proses ini adalah penyediaan gel geopolimer dengan menggabungkan abu terbang dan larutan alkali. Bitumen asas dipanaskan pada suhu 150 °C sehingga bitumen tersebut cair. Selepas itu, gel geopolimer sebanyak 3, 5, 7 dan 9% daripada berat bitumen dicampurkan ke dalam bitumen asas yang telah cair dan campuran tersebut diadun selama 90 minit pada kelajuan 1000+10 r.p.m untuk menghasilkan campuran yang homogen. Di dalam kajian ini, tahap kehomogenan bitumen terubahsuai geopolimer dinilai melalui ujian titik lembut [2], [6]. Sampel yang di ambil pada setiap 30 minit semasa proses campuran selama 2 jam dijalankan diuji sehingga nilai titik lembut menjadi stabil.

### 2.3 Pengukuran

#### 2.3.1 Ujian Hentaman

Kekuatan hentaman dijalankan pada sampel bitumen asas dan bitumen terubahsuai geopolimer. Kekuatan

hentaman (KH) diuji mengikut piawaian ASTM D 25 menggunakan Izod Impact Machine. Kaedah Izod dijalankan menggunakan *unnotched* sampel berdimensi 60 mm x 12 mm x 3 mm menggunakan Izod *Impact Machine* dengan pendulum yang bertenaga 2 J. Kekuatan hentaman dikira dengan membahagikan tenaga yang telah direkodkan kepada kawasan sampel. Kekuatan hentaman bitumen dikira dengan membahagikan tenaga hentaman (TH) kepada luas kawasan sampel (LS) seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1. Tiga bacaan terbaik diambil untuk mendapatkan nilai purata bagi pemplotan graf.

$$KH (J/cm^2) = \frac{\text{Tenaga Hentaman (J)}}{\text{Kawasan Keretakan Rentas (cm}^2\text{)}} \quad (1)$$

### 2.3.2 Ujian Kekerasan

Ujian ini dijalankan dengan menggunakan alat *shore scale durometer* jenis D dengan menggunakan piawaian ASTM D 2240. Ukuran kekerasan adalah berdasarkan kepada kedalaman penembusan indenter tersebut. Alat ini ditekan pada sampel dan bacaan diambil. Tiga bacaan diambil bagi setiap sampel dan kekerasan ditentukan melalui kiraan purata bagi setiap bacaan.

### 2.3.3 Ujian Resapan Air

Ujian resapan air dilakukan pada sampel bitumen asas dan bitumen terubahsuai geopolimer untuk mengetahui peratus serapan air dengan merendamkan pengikat berbitumen seberat 30g ke dalam pelarut air pada suhu bilik selama seminggu sehingga keseimbangan serapan diperolehi. Berat pengikat berbitumen setiap hari (H0-H6) diukur untuk mengetahui kadar serapan air bahan tersebut. Kaedah ini diulangi sebanyak tiga kali bagi setiap sampel untuk mendapatkan nisbah serapan purata. Pengiraan peratus serapan air adalah seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2.

$$\% \text{ serapan} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

Di mana  $m_1$  adalah dan  $m_2$  adalah berat sampel kering dan basah.

## 3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

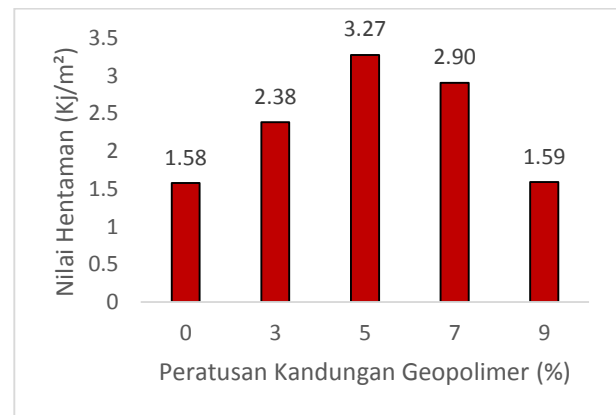
### 3.1 Nilai Hentaman

Kekuatan hentaman adalah satu petunjuk bagi ketahanan komposit terhadap beban yang dikenakan secara mengejut dan retakan yang merambat cepat melalui bahan. Tenaga yang diperlukan untuk mematahkan sampel boleh dikira dengan menghubungkan jarak pergerakan yang dilalui oleh bandul selepas menghentam sampel [22].

Rajah 1 menunjukkan kekuatan hentaman bagi pengikat bitumen asas dan bitumen terubahsuai yang

divariasikan dengan penggunaan geopolimer sebanyak 3, 5, 7, dan 9%. Hasil ujian mendapati, penggunaan geopolimer sebanyak 3 dan 5% di dalam bitumen asas telah meningkatkan kekuatan hentaman komposit tersebut berbanding bitumen asas iaitu daripada 1.58 kJ/m<sup>2</sup> kepada 2.38 kJ/m<sup>2</sup> dan 3.27 kJ/m<sup>2</sup>. Dapatan ujian ini menunjukkan kekuatan hentaman bitumen terubahsuai dengan 5% geopolimer menunjukkan nilai tertinggi iaitu 3.27 kJ/m<sup>2</sup>. Peningkatan kekuatan hentaman adalah disebabkan oleh penggungtingan struktur rantai pada permukaan pengisi yang membantu pelonggaran struktur matriks yang tersangkut [23].

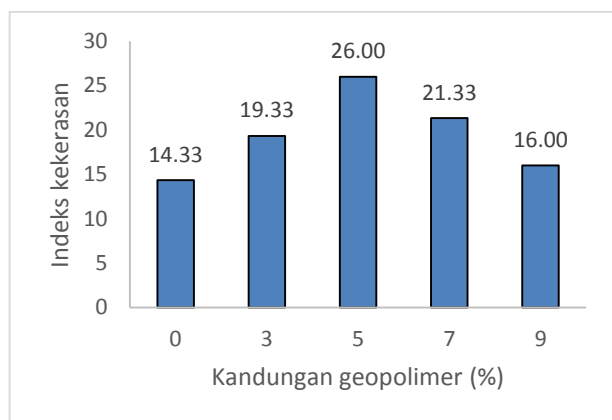
Walau bagaimanapun, pada pengubahsuaian bitumen asas menggunakan 7% kandungan geopolimer, didapati kekuatan hentaman mengalami sedikit penurunan kepada 2.90 kJ/m<sup>2</sup> dan dengan peningkatan kandungan geopolimer yang digunakan di dalam bitumen asas iaitu sebanyak 9%, kekuatan hentaman mengalami penurunan yang drastik kepada 1.59 kJ/m<sup>2</sup>. Penurunan nilai kekuatan hentaman (kJ/m<sup>2</sup>) ini berlaku adalah disebabkan oleh kandungan penambahan geopolimer ke dalam bitumen asas adalah tinggi dan padat. Keadaan ini berkait rapat dengan jumlah bahan pengubahsuai di dalam matriks pengikat berbitumen. Menurut Amin dan Badri [24], penambahan berat pengisi yang terlalu tinggi dan padat menghasilkan sampel komposit yang mudah mengalami patahan dan rapuh. Peratusan geopolimer yang digunakan di dalam bitumen asas telah memberi kesan kepada kekuatan bitumen.



Rajah 1 Nilai hentaman bagi bitumen asas dan bitumen terubahsuai geopolimer

### 3.2 Indeks Kekerasan

Kekerasan adalah kebolehrintangannya terhadap daya pemusnah yang boleh menyebabkan kecacatan pada bahan. Sifat kekerasan merujuk kepada rintangan sesuatu bahan terhadap penembusan indenter berbeban ke atas permukaan bahan. Ukuran kekerasan adalah berdasarkan kepada kedalaman penembusan indenter tersebut.



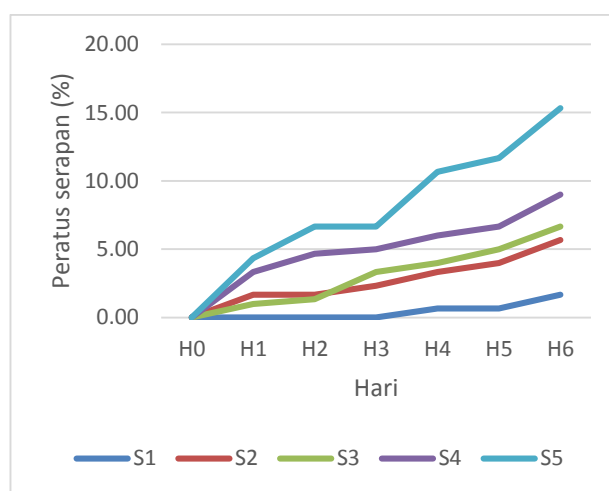
Rajah 2 Keputusan ujian kekerasan pengikat berbitumen

Berdasarkan Rajah 2, indeks kekerasan bitumen terubahsuai meningkat sebanyak 11.7-81.4% berbanding nilai kekerasan bitumen asas. Bitumen terubahsuai dengan kandungan geopolimer sebanyak 5% mencatatkan indeks kekerasan tertinggi iaitu 26. Dalam ujian ini, penggunaan geopolimer sebanyak 3 dan 5% di dalam pengikat bitumen telah meningkatkan tahap kekerasan komposit tersebut. Akan tetapi, nilai kekerasan komposit menunjukkan penurunan yang ketara selepas pengubahsuaian bitumen asas menggunakan 7 dan 9% geopolimer dilakukan. Keputusan ujian kekerasan ini adalah seiring dengan dapatan daripada ujian hentaman seperti yang telah dibincangkan dalam Bahagian 3.1 iaitu komposit menjadi semakin rapuh jika penambahan bahan pengisi yang terlalu banyak di dalam matriks bitumen.

### 3.3 Tingkah Laku Resapan Air

Rajah 3 menunjukkan kadar serapan air bagi bitumen asas dan bitumen terubahsuai geopolimer dalam tempoh tujuh hari masa rendaman. S1, S2, S3, S4 dan S5 merujuk kepada peratusan kandungan geopolimer di dalam bitumen asas iaitu 0 (bitumen asas), 3, 5, 7 dan 9%. Dapatan ujian ini menunjukkan bahawa sampel yang mengandungi kandungan geopolimer sebanyak 9% mempunyai serapan air yang paling tinggi iaitu 15.33% dan diikuti dengan S4, S3, S2 iaitu dengan peratusan serapan air sebanyak 9%, 6.67%, dan 5.57%. Bacaan serapan air yang paling rendah dicatatkan oleh S1 iaitu bitumen asas. Bitumen asas menunjukkan kadar serapan air yang paling rendah adalah kerana sifat asli bahan tersebut yang kalis air seperti yang telah dibincangkan di dalam bab kajian kepustakaan [25-26]. Peningkatan amaun geopolimer di dalam bitumen asas menyebabkan berlaku peningkatan kepada serapan air. Hal ini kerana, menurut Ahmaruzzaman [27], sifat abu terbang yang menyerap air menjadi punca kadar serapan air meningkat seiring dengan peningkatan kadar penggunaan abu terbang semasa proses penghasilan geopolimer. Walaupun begitu, kadar serapan air meningkat pada tahap yang sangat minima dan terkawal.

Rajah 3 mendapati peratusan serapan air menunjukkan peningkatan yang mendadak di antara hari ke 4 dan 6 (H4-H6). Perkara ini telah disokong oleh Razali & Doing [28] yang melaporkan kelembapan bahan akan meningkat secara mendadak di akhir tempoh rendaman. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh aktiviti yang sangat aktif pada peringkat awal rendaman. Di akhir rendaman, didapati bahawa tahap kejernihan air berkurang (air bertukar menjadi warna kelabu). Hal ini berlaku disebabkan oleh kesan kotor kulat yang telah mati. Apabila berlakunya perubahan kandungan air, dimensi bahan akan menjadi tidak stabil dimana sifat kekuatan bahan akan berkurang. Ramai pengkaji menyatakan bahawa bitumen adalah bahan kalis air [25-26], [29-30]. Akan tetapi, penambahan geopolimer yang mengandungi abu terbang di dalam bitumen asas telah meningkatkan jumlah serapan air.



Rajah 3 Kadar serapan air bagi bitumen asas (S1) dan bitumen terubahsuai geopolimer dengan 3, 5, 7, dan 9% geopolimer (S2, S3, S4, dan S5)

## 4.0 KESIMPULAN

Kajian ini dijalankan untuk menyiasat kesan penggunaan geopolimer sebagai bahan pengubahsuaian bitumen terhadap sifat mekanik dan tingkah laku resapan air bahan tersebut. Berdasarkan ujian hentaman dan kekerasan yang dijalankan, bitumen terubahsuai geopolimer telah menunjukkan peningkatan dari segi kekuatan dan ketahanan terhadap beban yang dikenakan. Tahap ketahanan yang tertinggi telah ditunjukkan oleh bitumen terubahsuai dengan 5% geopolimer. Kadar serapan air yang ditunjukkan oleh bitumen terubahsuai geopolimer masih di tahap yang terkawal. Sebagai kesimpulan, sifat-sifat mekanikal bitumen terubahsuai geopolimer menunjukkan 5% adalah kandungan optimum geopolimer dalam kajian ini.

## Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas bantuan dan kemudahan yang disediakan dalam menyiapkan kajian ini. Projek ini telah dibiayai oleh UKM di bawah Projek GUP-2014-022 dan GGPM-2014-062.

## Rujukan

- [1] R. Yu, C. Fang, P. Liu, X. Liu, and Y. Li. 2015. Storage Stability and Rheological Properties of Asphalt Modified with Waste Packaging Polyethylene and Organic Montmorillonite. *Appl. Clay Sci.* 104: 1-7.
- [2] A. N. H. Ibrahim, N. I. Yusoff, N. Mohd, and M. N. Borhan. 2016. Physical Properties and Storage Stability of Geopolymer Modified Asphalt Binder. *J. Teknol. (Sciences Eng.)*. 78(7-2): 133-138.
- [3] A. N. H. Ibrahim, A. S. Ahmad, N. Mohd Akhir, and M. N. Borhan. 2016. Evaluation of Stone Mastic Asphalt Using Geopolymer As an Asphalt Modifier. *Jordan J. Civ. Eng.* 10(4): 442-450.
- [4] A. K. Apeagyei, J. R. a Grenfell, and G. D. Airey. 2007. Observation of Reversible Moisture Damage in Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.* 60: 73-80.
- [5] Y. Yildirim. 2014. Polymer Modified Asphalt Binders. *Constr. Build. Mater.* 21(1): 66-72.
- [6] S. I. A. Ali, A. Ismail, N. I. M. Yusoff, M. R. Karim, R. a. Al-Mansob, and D. I. Alhamali. 2015. Physical and Rheological Properties of Acrylate-styrene-acrylonitrile Modified Asphalt Cement. *Constr. Build. Mater.* 93: 326-334.
- [7] M. N. Borhan, A. Ismail, R. A. Rahmat, and F. Suja. 2007. Used cylinder Oil Modified Cold-Mix Asphalt Concrete. *J. Appl. Sci.* 7(22): 3845-3491.
- [8] K. Sobolev, I. Flores Vivian, R. Saha, N. M. Wasiuddin (Wasi), and N. E. Saltibus. 2014. The Effect of Fly Ash on the Rheological Properties of Bituminous Materials. *Fuel*. 116: 471-477.
- [9] N. I. M. Yusoff, A. A. S. Breem, H. N. M. Alattug, A. Hamim, and J. Ahmad. 2014. The Effects of Moisture Susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.* 72:139-147.
- [10] E. Ahmadiania, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz, and P. Shafiqh. 2011. Using Waste Plastic Bottles as Additive for Stone Mastic Asphalt. *Mater. Des.* 32(10): 4844-4849.
- [11] W. M. N. W. A. Rahman and A. F. A. Wahab. 2013. Green Pavement using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. *Procedia Engineering*. 53: 124-128.
- [12] D. Lo Presti. 2013. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for Road Asphalt Mixtures: A Literature Review. *Constr. Build. Mater.* 49: 863-881.
- [13] M. N. Borhan, A. Ismail, R. A. Rahmat, and F. Suja. 2009. The Effects of Used Cylinder Oil on Asphalt Mixes. *Eur. J. Sci. Res.* 28(3): 398-411.
- [14] S. Tapkin. 2008. Mechanical Evaluation of Asphalt-Aggregate Mixtures Prepared with Fly Ash as a Filler Replacement. *Can. J. Civ. Eng.* 35(1): 27-40.
- [15] V. Sharma, S. Chandra, and R. Choudhary. 2010. Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes. *J. Mater. Civ. Eng.* 22(December): 1209-1216.
- [16] G. Vasudevan. 2013. Performance on Coal Bottom Ash in Hot Mix Asphalt. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2319(1167): 24-33.
- [17] L. Zhang, S. Ahmari, and J. Zhang. 2011. Synthesis and Characterization of Fly Ash Modified Mine Tailings-based Geopolymers. *Constr. Build. Mater.* 25(9): 3773-3781.
- [18] P. Sukmak, S. Horpibulsuk, and S.-L. Shen. 2013. Strength Development in Clay-fly Ash Geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 40: 566-574.
- [19] P. M. A. Bhosale and P. N. N. Shinde. 2012. Geopolymer Concrete by Using Fly Ash in Construction. *J. Mech. Civ. Eng.* 1(3): 25-30.
- [20] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, and A. Arulrajah. 2015. Compressive Strength Development in Fly Ash Geopolymer Masonry Units Manufactured from Water Treatment Sludge. *Constr. Build. Mater.* 82: 20-30.
- [21] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, and S. K. Bhattacharyya. 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* 85: 78-90.
- [22] F. Billmeyer. 1971. *Textbook of Polymer Science*. 2nd ed. New York: Wiley Interscience.
- [23] Sahrim Hj. Ahmad, Mou'ad. A. Tarawneh, S. Y. Yahya and Rozaidi Rasid. 2011. Reinforced Thermoplastic Natural Rubber (TPNR) Composites with Different Types of Carbon Nanotubes (MWNTS), Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, Dr. Siva Yel, 2011.
- [24] K. A. M. Amin and K. H. Badri. 2007. Palm-Based Bio-Composites Hybridized with Kaolinite. *J. Appl. Polym. Sci.* 105: 2488-2496.
- [25] P. Redelius. 2004. Bitumen solubility model using hansen solubility parameter. *Energy and Fuels*. 18(4): 1087-1092.
- [26] N. S. Mashaan, A. H. Ali, S. Koting, and M. R. Karim. 2013. Performance Evaluation of Crumb Rubber Modified Stone Mastic Asphalt Pavement in Malaysia. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2013: 1-8.
- [27] M. Ahmaruzzaman. 2010. A Review on the Utilization of Fly Ash. *Prog. Energy Combust. Sci.* 36(3): 327-363.
- [28] A. K. Razali and C. . Doing. 1998. Influence of Chip-Storage Period on Selected Properties of Rubberwood (Hevea Brasiliensis) MDF. *Adhes. Technol. Bond. Trop. wood Prod.* 311-320.
- [29] J. M. Krishnan and K. R. Rajagopal. 2003. Review of the Uses and Modeling of Bitumen from Ancient to Modern Times. *Appl. Mech. Rev.* 56(2): 149.
- [30] D. Lesueur. 2009. The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Adv. Colloid Interface Sci.* 145(1-2): 42-82.