

Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Modulus Elastik Lapisan Turapan Boleh Lentur

(The Effect of Temperature Changes on Elastic Modulus of Flexible Pavements)

Mohd Raihan Taha, Sentot Hardwiyono, Nur Izzi Md. Yusoff,
Khairul Anuar Mohd Nayan & Mohd. Rosli Hainin

ABSTRAK

Pada umumnya, modulus kekakuan sistem turapan boleh lentur dipengaruhi oleh perubahan alam sekitar di mana perubahan suhu dan musim (hujan) masing-masing akan mempengaruhi kekuatan lapisan turapan berasfalt dan lapisan tidak berasfalt seperti lapisan tanah dasar. Kebiasaannya, kesan suhu terhadap lapisan turapan boleh lentur di tapak boleh diuji melalui dua kaedah. Pertamanya, melalui ujian musnah di mana sampel yang telah dikorek akan diuji di makmal, sebagai contohnya menggunakan alat universal testing machine (UTM). Keduanya, ujian tidak musnah seperti ujikaji di tapak yang menggunakan peralatan seperti falling weight deflectometer (FWD) dan spectral analysis of surface wave (SASW). Kajian ini dijalankan untuk mengkaji kesan pengaruh suhu pada regangan yang berbeza terhadap jalan raya Soekarno-Hatta dan Cikampek-Purwakarta di Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Dapat diperhatikan bahawa kaedah ujikaji dan tingkat regangan yang berbeza telah menghasilkan nilai modulus elastik turapan boleh lentur yang berbeza. Semakin tinggi suhu yang dikenakan pada lapisan turapan boleh lentur, semakin menurun nilai modulus elastiknya. Sebaliknya, semakin rendah suhu yang dikenakan pada lapisan turapan boleh lentur akan menghasilkan nilai modulus elastik yang semakin tinggi. Kaedah ujikaji yang berbeza (FWD, UTM dan SASW) pada lapisan turapan berasfalt diperhatikan juga dipengaruhi oleh perubahan suhu.

Kata kunci: SASW; FWD; UTM; modulus elastik dan turapan boleh lentur

ABSTRACT

In general, the stiffness of flexible pavement is influenced by environmental changes, whereby temperature and rainfall affect the asphalt layer and non-asphalt layer, such as the subgrade, respectively. Normally, the effect of temperature on flexible pavement can be measured using two methods. The first is a destructive test whereby core samples are tested in a laboratory using a universal testing machine (UTM). The second is a non-destructive in situ test using equipment such as a falling weight deflectometer (FWD) and spectral analysis of surface waves (SASW). This study was conducted to investigate the effect of temperature at different tensile levels on the Soekarno-Hatta and Purwakarta Cikampek roads in Bandung, West Java, Indonesia. It is observed that different tensile levels and testing methods result in various elastic modulus values of flexible pavement. The higher the temperature applied to the flexible pavement layer, the more the elastic modulus values decrease. In contrast, the lower the temperature imposed on the flexible pavement layer, the more the elastic modulus values increase. Different testing methods (FWD, UTM and SASW) on the flexible pavement layer are also affected by temperature changes.

Keywords: SASW; FW; UTM; elastic modulus and flexible pavement

PENDAHULUAN

Sistem turapan boleh lentur secara ringkasnya terdiri dari lapisan berasfalt, lapisan tapak dan lapisan sub-tapak yang diletakkan di atas tanah dasar (juga dikenali sebagai sub-gred). Kekuatan turapan boleh lentur ditentukan oleh mutu bahan yang digunakan dan biasanya diukur dalam nilai modulus bahan (E). Kekuatan turapan boleh lentur juga dipengaruhi oleh perubahan cuaca atau musim (hujan) di kawasan tersebut. Perubahan suhu mempengaruhi modulus lapisan berasfalt, manakala perubahan musim atau curahan hujan pula mempengaruhi nilai modulus lapisan tidak berasfalt seperti lapisan tanah dasar. Faktor lingkungan seperti suhu mempengaruhi kelakuan lapisan turapan boleh

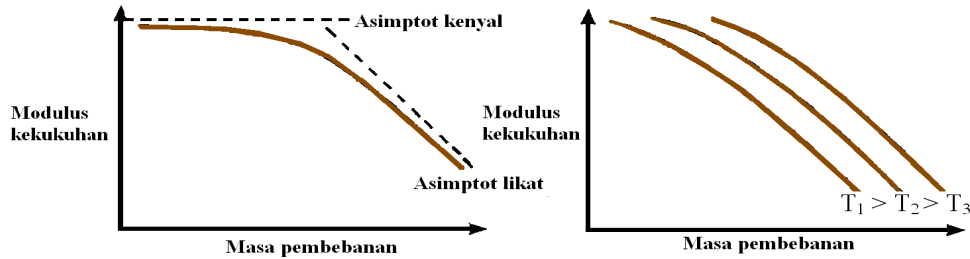
lentur yang menggunakan asfalt sebagai bahan pengikat (Ullidz 1987; Ehlora et al. 1990; AASHTO 1993).

KAJIAN PERPUSTAKAAN

Campuran berasfalt adalah bahan komposit yang terdiri daripada asfalt, udara dan bahan batuan berbutir yang mempunyai nilai penggedran yang berbeza (dalam kadar/nisbah yang tertentu). Bahan batuan berbutir ini mempunyai pengaruh yang besar bagi sifat campuran berasfalt. Kandungan asfalt dalam campuran ini secara

relatifnya adalah kecil, iaitu antara 4 hingga 7% daripada berat campuran. Bahan ini akan mempengaruhi sifat struktur turapan boleh lentur sehingga had yang tertentu. Kebiasaannya, asphalt adalah likat pada suhu tinggi atau mengalami pembebanan yang lama. Sebaliknya, pada

suhu rendah atau dikenakan pembebanan yang pendek, bahan ini mempunyai sifat padat-kenyal (rapuh). Pada suhu dan pembebanan pertengahan, asphalt adalah bersifat likat-kenyal. Perubahan sifat (kelakuan) ini adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 1.



RAJAH 1. Modulus kekakuan melawan masa (waktu) pembebanan atau frekuensi dan pengaruh perbezaan suhu (diubahsuai dari Whiteoak 1990)

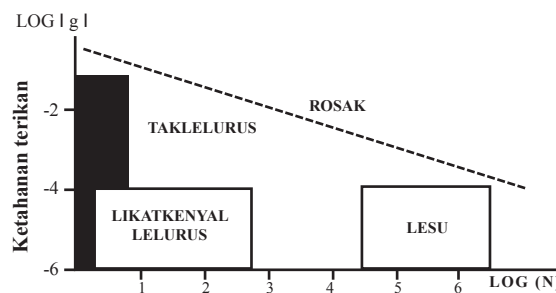
Rajah 1 ini menunjukkan bahawa perubahan suhu dan sejarah perubahan beban sangat mempengaruhi tindak balas lapisan campuran berasfalt (Whiteoak 1990). Oleh itu, sifat mekanik asphalt dapat ditunjukkan oleh modulus kekakuan (Van der Poel 1954):

$$S_b = \frac{\sigma}{\epsilon}(t, T) \tag{1}$$

di sini S_b adalah modulus kekakuan pada masa pembebanan (t) dan suhu (T), σ adalah tegangan dan ϵ adalah regangan pada masa pembebanan (t) dan suhu (T). Tiga jenis sifat amplitud regangan utama dan jumlah beban

yang dikenakan pada campuran berasfalt adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 2 (Di Benedetto & Olard 2009). Ini dapat dijelaskan lagi seperti berikut:

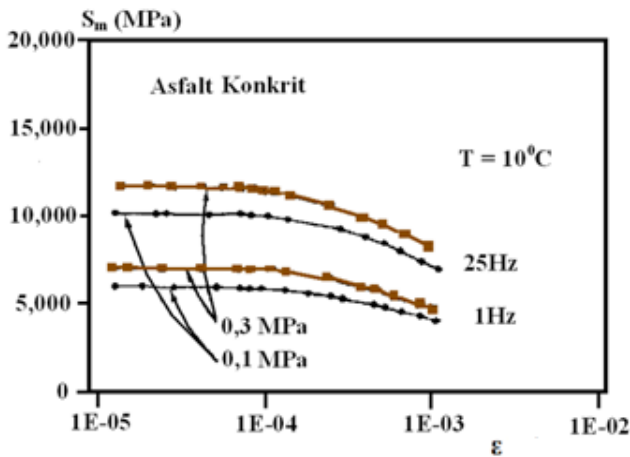
1. Pada pembebanan dan regangan yang kecil, sebahagian besar sifat bahan adalah tidak lurus.
2. Untuk pembebanan beberapa ratus putaran (*cyclic*) dan regangan yang kecil ($<10^{-4}$), bahan bersifat seperti likat-kenyal lurus.
3. Pada pembebanan berpuluh ribu putaran dan pada regangan kecil, ketika keadaan kerosakan mula terjadi, bahan dikatakan menunjukkan sifat kelesuan (*fatigue*).



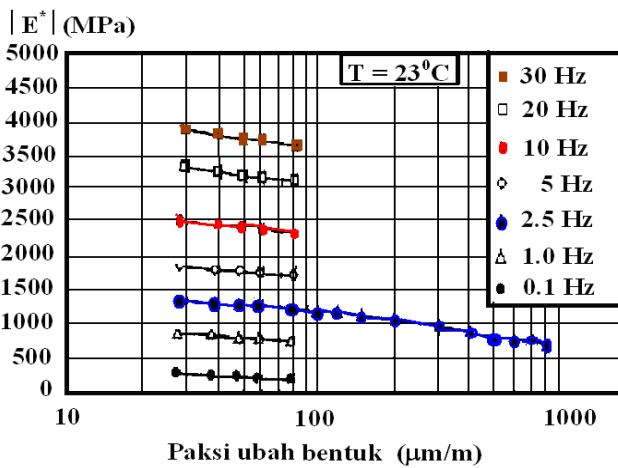
RAJAH 2. Jenis sifat yang diteliti pada campuran berasfalt (diubahsuai dari di Benedetto 1990)

Campuran berasfalt bukanlah satu bahan yang ideal dan anggapan ianya bersifat lurus adalah tidak benar. Walau bagaimanapun, penggunaan teori likat-kenyal lurus ini adalah dibenarkan bagi campuran berasfalt pada regangan yang kecil (Alavi & Monismith 1994). Secara umumnya, bahan turapan boleh lentur dianggap mempunyai tindak balas lurus untuk tegangan dan regangan kecil (nisbah tegangan dan regangan adalah tetap). Telah ditunjukkan

bahawa campuran berasfalt menunjukkan sifat lurus untuk regangan 10% lebih rendah daripada kekuatan tegangan atau hasil regangan yang kurang daripada 0.1%. Rajah 3 menunjukkan perubahan modulus kekakuan campuran berasfalt pada suhu 10°C melawan regangan, ϵ (Charif 1991). Manakala perubahan modulus campuran berasfalt pada suhu 23°C melawan perubahan bentuk ($\mu\text{m/m}$) pula ditunjukkan di dalam Rajah 4 (Doubbaneh 1995).



RAJAH 3. Perubahan modulus kekukuhan S_m melawan regangan ϵ (diubahsuai dari Charif 1991)



RAJAH 4. Perubahan modulus dinamik melawan regangan ϵ (diubahsuai dari Doubbaneh 1995)

Sifat kimia bahan dan kekukuhan lapisan berasfalt dapat berubah akibat daripada perubahan suhu. Park dan Kim (2001) telah menjalankan analisis pengaruh suhu pada pengiraan balik modulus Young bahan berasfalt. Daripada kajian ini, didapati bahawa modulus kekukuhan boleh berubah sesuai dengan kedalaman lapisan berasfalt yang bergantung kepada pemanasan atau pendinginan udara sekitar kawasan turapan. Oleh itu, pembetulan suhu bagi lendutan pada pengujian menggunakan alat seperti *falling weight deflectometer* (FWD) adalah diperlukan. Reka bentuk turapan boleh lentur ini menurut *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) memberikan pembetulan suhu pengukuran lendutan bagi keadaan normal untuk rujukan suhu perkerasan (AASHTO 1993). Ujikaji biasanya dilakukan pada suhu di antara 0 hingga 40°C, pada kelajuan kenderaan sehingga 55 km/jam. Persamaan empirik untuk menentukan modulus elastik lapisan berasfalt yang dihasilkan dapat ditunjukkan seperti berikut:

$$E_1(t) = 15000 - 7900 \times \log(t) \tag{2}$$

di sini $E_1(t)$ = modulus kekenyalan lapisan turapan campuran berasfalt dalam suhu t (t^3 1°C).

Pengaruh perubahan suhu modulus kekuatan campuran berasfalt di dalam perisian *Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design* (ELMOD) dinyatakan dengan persamaan pembetulan suhu seperti berikut (Dynatest Engineering 1989):

$$\frac{E_t}{E_c} = A_s - B_s \log(t_a/c_a) \tag{3}$$

di mana E_t adalah modulus kekenyalan lapisan campuran berasfalt pada suhu t , E_c adalah modulus kekenyalan rujukan lapisan campuran berasfalt, t_a adalah suhu lapisan campuran berasfalt, c_a adalah suhu rujukan lapisan campuran berasfalt, A_s dan B_s adalah nilai pemalar. Hubungan lendutan, tebal lapisan berasfalt turapan boleh lentur dan suhu pengujian alat FWD boleh dinyatakan dalam bentuk persamaan empirikal yang ditunjukkan dalam Persamaan 4 dan Persamaan 5 (Ehrola et al. 1990).

$$d = A_d \times B_d^T \tag{4}$$

$$d = 0.981 \times h^{0.00726} \tag{5}$$

di sini T adalah suhu turapan (°C), A_d dan B_d adalah pemalar, h adalah tebal turapan (mm) dan d adalah lendutan (mm).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Ujikaji perbandingan yang dilakukan dalam kajian ini adalah ujikaji makmal untuk mengetahui nilai modulus lapisan berasfalt yang diperolehi daripada korekan di kedua-dua jalan raya Soekarno-Hatta dan Cikampek-Purwakarta. Dalam kajian ini, modulus lapisan berasfalt diukur menggunakan alatan ujikaji yang dikenali sebagai *Universal Testing Machine* (UTM). Sampel didapatkan daripada ujian lubang gerudi pada turapan ujikaji. Seterusnya sampel dibawa ke makmal dan ujian modulus dilakukan. Semasa ujikaji dijalankan, daya beban denyutan dikenakan kepada sampel dan terikan kembali bahan yang dihasilkan diukur dalam arah garis pusat bahan. Sejumlah 16 sampel ujikaji telah didapati daripada penggerudian di tapak turapan jalan. Seterusnya keseluruhan sampel dipotong dan disesuaikan dengan ukuran sampel dalam susunan sel. Sebelum beban denyutan dikenakan, sampel terlebih dahulu dipanaskan di dalam alat UTM dengan suhu yang disyaratkan. Selanjutnya nilai modulus (M_p) lapisan berasfalt ditentukan menggunakan persamaan berikut (Haas & Hudson 1978; Universal Testing Machine 2002):

$$S_t = \frac{2F}{\pi D} \tag{6}$$

$$E_{\text{asfalt}} = \frac{H}{D} \tag{7}$$

$$M_{\text{asfalt}} = \frac{\sigma_d}{E_{\text{asfalt}}} = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \tag{8}$$

di sini S_t adalah kekuatan tegangan (kPa), E_{asfalt} adalah modulus elastik campuran berasfalt (MPa), L adalah panjang sampel bahan (mm), D adalah diameter sampel bahan (mm), F adalah daya puncak maksimum yang diberikan untuk beban pengulangan (N), R adalah nisbah Poisson yang ditentukan dan H adalah perubahan bentuk kembali pada arah mendatar.

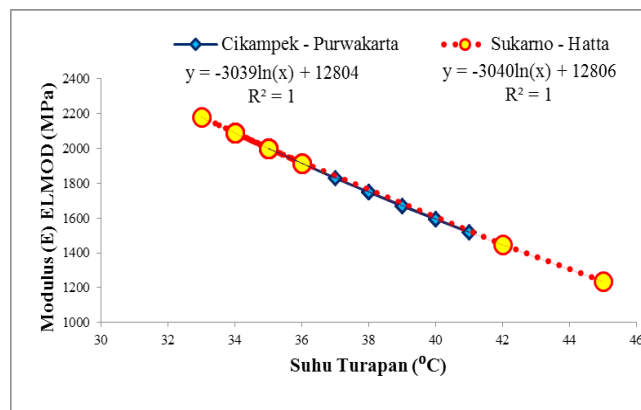
PENGARUH KESAN SUHU PADA MODULUS ELASTIK TURAPAN \ BOLEH LENTUR

Persamaan empirik untuk menjelaskan hubungan di antara suhu dengan modulus elastik asfalt telah dikembangkan

oleh AASHTO (1993). Hubungan di antara suhu dengan modulus campuran berasfalt dari kedua-dua lebuhraya telah dikira dengan menggunakan Persamaan 2. Sebagai contoh, satu titik suhu turapan (T_p) dirakamkan pada 40°C. Modulus kenyal (E_1) lapisan turapan berasfalt boleh dikira seperti berikut:

$$E_1(40^\circ\text{C}) = 15000 - 7900 \times \log(40) = 2344 \text{ MPa}$$

Hubungan suhu turapan dengan modulus (E) bahan berasfalt berdasarkan persamaan empirik AASHTO (1993) bagi kedua-dua turapan boleh lentur yang dikaji ini adalah ditunjukkan di dalam Rajah 5. Hubungan kedua-dua parameter ini sangat baik di mana R^2 adalah menghampiri nilai satu, yang bermaksud hubungan ini menghampiri keadaan yang sempurna. Pada suhu rendah, modulus turapan berasfalt (E) mempunyai nilai tinggi dan pada suhu tinggi, modulus turapan berasfalt (E) menunjukkan nilai yang rendah. Ini bersesuaian dengan sifat reologi dan kelikatan bahan asfalt yang mudah dipengaruhi oleh perubahan suhu. Analisis ini juga menunjukkan bahawa persamaan empirik AASHTO (1993) dapat digunakan di kawasan yang diuji.



RAJAH 5. Modulus turapan berasfalt melawan suhu turapan berasaskan persamaan AASHTO (1993)

ANALISIS LANJUTAN PENGARUH SUHU TERHADAP MODULUS ELASTIK TURAPAN

Perisian ELMOD telah menggunakan persamaan untuk pembetulan modulus kenyal lapisan turapan akibat pengaruh suhu, seperti yang ditunjukkan di dalam Persamaan 3. Suhu dan faktor A_s dan B_s adalah tidak sama bagi setiap kawasan kerana ianya bergantung kepada iklim dan suhu lingkungan. Puslitbang (1993) menentukan suhu rujukan turapan $c = 35^\circ\text{C}$ dan modulus turapan berasfalt, $E_c = 2000 \text{ MPa}$ dengan faktor-faktor pemalar $A_s = 1$ dan $B_s = 3.5$. Dynatest Engineering (1989) juga menentukan suhu

rujukan turapan $c = 25^\circ\text{C}$ dan modulus turapan berasfalt E_c rujukan 3000 MPa dengan faktor-faktor pemalar $A_s = 1$ dan $B_s = 2.2$. Persamaan logarithma yang mempunyai hubungan ($R^2 = 1$) antara modulus (E) turapan berasfalt dan suhu (t) kedua-dua lebuhraya ditunjukkan dalam persamaan:

$$Y = 14.995 - 342.5 \ln(X) \tag{9}$$

Persamaan 9 boleh ditulis dalam bentuk persamaan logarithma dan simbol $Y = E_t$ yang menyatakan modulus turapan berasfalt pada suhu t sebagai berikut:

$$E_t = 14.995 - 7895.56 \log(t) \quad (10)$$

Suhu (t) rujukan $c = 35^\circ\text{C}$ (Puslitbang 1993) dan $c = 25^\circ\text{C}$ (Dynatest Engineering 1989) dimasukkan di dalam persamaan 10, didapati bahawa $E_{c35} = 2802$ MPa dan $E_{c25} = 3956$ MPa. Didapati bahawa modulus turapan berasfalt E_c daripada kajian ini lebih besar berbanding dengan modulus turapan berasfalt E_c rujukan 2000 MPa (Puslitbang 1993) dan 3000 MPa (Dynatest Engineering 1989).

Seterusnya, E_t di dalam Persamaan 10 dibahagikan dengan $E_{c35} = 2802$ MPa, maka Persamaan 11 di bawah diperolehi:

$$\frac{E_t}{E_{c35}} = 5.35 - 2.82 \log(t) \quad (11)$$

Suhu (t) di dalam Persamaan 11 dibahagikan dengan suhu $c = 35^\circ\text{C}$ untuk mendapatkan persamaan:

$$\frac{E_t}{E_{c35}} = 0.9957 - 2.82 \log\left(\frac{t}{c}\right) \quad (12)$$

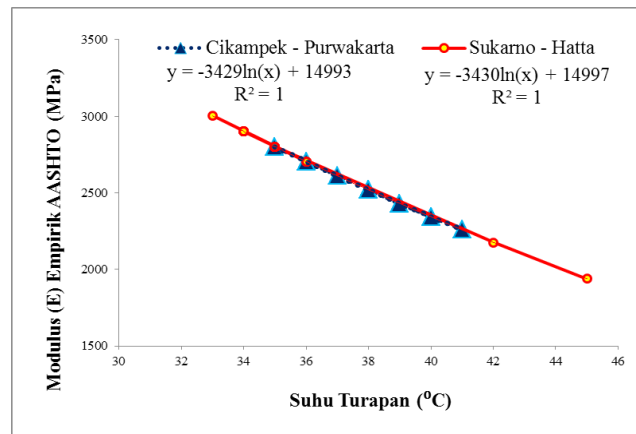
Persamaan 12 adalah bersesuaian dengan Persamaan 3 yang mana faktor $A_s = 0.9957$ (hampir sama dengan 1) dan faktor $B_s = 2.82$. Dengan menggunakan kaedah yang sama, E_t di dalam Persamaan 11 dibahagikan dengan $E_{c25} = 3956$ MPa dan seterusnya suhu (t) di dalam Persamaan 12 dibahagikan dengan suhu $c = 25^\circ\text{C}$. Maka persamaan berikut diperolehi:

$$\frac{E_t}{E_{c25}} = 1 - 2 \log(t) \quad (13)$$

Persamaan 13 pula bersesuaian dengan persamaan ELMOD (Dynatest Engineering 1989) yang mana faktor $A_s = 1$ dan $B_s = 2$. Faktor A_s yang diperolehi daripada pengujian mempunyai nilai 1 dan bersesuaian dengan faktor A_s dari kedua-dua rujukan. Manakala faktor B_s pengujian juga mempunyai nilai 2 dan ini lebih kecil daripada faktor B_s kedua rujukan iaitu bernilai 2.2 (Dynatest Engineering 1989) dan 3.5 (Puslitbang 1993). Semakin besar nilai B_s yang digunakan dalam persamaan ELMOD (yang mana faktor A_s adalah bersamaan dengan 1), semakin kecil nilai modulus turapan berasfalt E_t yang didapatkan, dan begitu juga keadaan sebaliknya. Keadaan ini membuktikan pula

bahawa perubahan suhu lingkungan mempunyai pengaruh terhadap modulus kenyal turapan berasfalt.

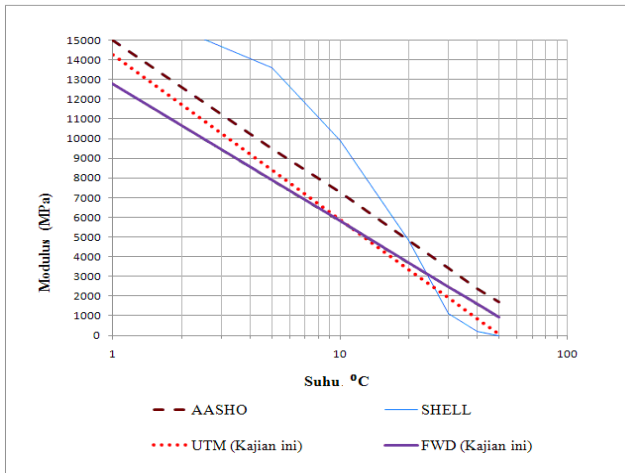
Pemalar-pemalar A_s dan B_s dalam persamaan ELMOD bagi pembetulan modulus kenyal lapisan turapan berasfalt akibat pengaruh suhu dalam reka bentuk turapan masing-masing mempunyai nilai 1 dan 3.5, dengan suhu rujukan adalah 35°C dan modulus kenyal rujukan lapisan berasfalt (E_c) adalah 2.000 MPa (Puslitbang 1993). Ini dilakukan supaya nilai penghitungan modulus turapan berasfalt E_t kecil (konservatif) dan penilaian kekuatan turapan berasfalt tidak berlebihan. Pengujian modulus kenyal lapisan turapan berasfalt akibat pengaruh suhu di lebuhraya Soekarno-Hatta dan lebuhraya Cikampek-Purwakarta menggunakan nilai rujukan Puslitbang (1993) dan persamaan ELMOD adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 6.



RAJAH 6. Modulus turapan (E) MPa ELMOD melawan suhu turapan bagi jalan raya Sukarno-Hatta dan Cikampek-Purwakarta

UJIKAJI DI MAKMAL MENGGUNAKAN ALAT UTM

Setiap sampel yang diambil daripada ujian lubang gerudi di tapak akan ditanda, ditimbang (gram), diukur diameter (mm) dan seterusnya diukur tebalnya (mm). Suhu sampel pula boleh diketahui daripada monitor suhu alat UTM pada pengujian bahagian skin (sampel pertama) dan pada pengujian bahagian yang dikorek (sampel kedua) di dalam alat UTM (terdapat dua sampel dalam satu ujikaji, iaitu pengujian suhu dan pembebanan). Sebanyak lima bacaan diambil dan dipuratakan. Di dalam kajian ini, sampel diuji pada tiga suhu berbeza iaitu 25, 35 dan 45°C . Hasil ujikaji korekan dan hubungan modulus (E) lapisan berasfalt (AC) dan tapak terawat asphalt (ATB) menggunakan alat UTM di makmal melawan suhu (t) adalah ditunjukkan dalam Rajah 7.



RAJAH 7. Modulus AC-ATB melawan suhu ujian UTM

Persamaan empirik pula dapat ditunjukkan seperti berikut ini:

$$E_{AC-ATB} = 14225 - 3636 \ln(t) \quad (14)$$

Di mana R^2 adalah bersamaan dengan 0.9911. Persamaan empirik ini adalah modulus berasfalt (AC-ATB) melawan suhu (t) yang menunjukkan modulus bahan berasfalt dipengaruhi oleh perubahan suhu. Semakin tinggi suhu pengujian UTM, nilai modulus sampel bahan berasfalt menjadi semakin rendah dan demikian juga sebaliknya.

Kajian yang sama yang menggunakan kaedah SHELL dan kaedah AASHO oleh Ullidtz (1987) menunjukkan bahawa terdapat hubungan yang signifikan di antara suhu dan modulus asphalt. Hasil pengujian FWD dan Persamaan 14 kajian ini yang diplotkan bersama hasil yang didapatkan dari kaedah SHELL dan kaedah AASHO adalah ditunjukkan di dalam Rajah 8. Hasil pengujian makmal ini dimulakan dari suhu 25 hingga 45°C. Persamaan yang didapatkan seterusnya digunakan untuk mengira keadaan dari suhu 1 hingga 50°C. Ini digambarkan di dalam satu grafik bersama garis yang dihasilkan dari kaedah SHELL dan kaedah AASHO. Didapati hasil dari kaedah AASHO mempunyai nilai yang hampir sama dengan hasil kajian ini, demikian juga hasil dari kaedah SHELL yang menunjukkan corak yang hampir sama tetapi bersifat tidak lurus.

Tiga penelitian yang diperhatikan daripada kaedah SHELL dalam penghitungan kekukuhan modulus lapisan berasfalt, E adalah:

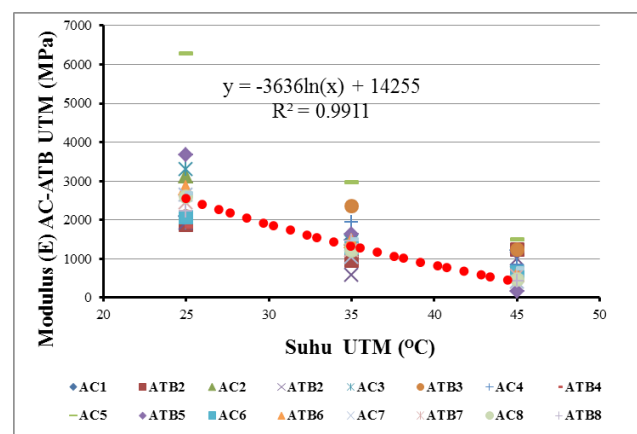
1. Berat isi batuan pecah dalam campuran asphalt dan berat jenis udara dalam campuran tidak boleh melebihi 3%.

2. Nomogram Van der Poel (1954) digunakan bagi penghitungan kekukuhan asphalt (MPa) dalam rentang suhu antara 10 hingga 70°C dan masa pembebanan di antara 0.1 dan 0.01 saat.
3. Kekukuhan campuran berasfalt E (MPa) dihitung menggunakan kaedah (SHELL)

$$E_a = S_b \times \left[1 + \left(\frac{2.5}{n} \right) \times \frac{C'_v}{1 - C'_v} \right]^n \quad (15)$$

di sini E_a = kukuhan campuran asphalt (MPa), $n = 0.83 \times \log(40.000 \text{ Mpa}/S_b)$, S_b = kekukuhan asphalt (MPa) dari nomogram Van der Poel, C'_v ialah faktor pembetulan C'_v bagi berat isi udara dalam campuran berasfalt > 3% dan C'_v adalah berat isi batuan pecah dalam campuran berasfalt (%).

Secara umumnya, modulus campuran berasfalt yang dihitung menggunakan kaedah ini bersesuaian dengan ujikaji lenturan (*bending test*) di dalam makmal (Ullidtz 1987). Pada suhu yang tinggi, walau bagaimanapun, ujikaji lenturan cenderung memberikan nilai modulus yang rendah dan tidak realistik. Kenaikan suhu pengujian menyebabkan modulus campuran berasfalt dalam turapan mencapai modulus batuan pecah, di mana modulus alur sampel yang digunakan dalam pengujian lentur menghampiri kosong. Seterusnya, rajah yang diplot dengan menggunakan kaedah SHELL menunjukkan bentuk lengkungan (Rajah 8). Sampel yang digunakan dalam pengujian UTM adalah hasil pengujian korekan di lebuh raya Soekarno-Hatta yang berbeza dengan sampel pengujian yang digunakan oleh kaedah SHELL, dan oleh itu hasilnya adalah berbeza.



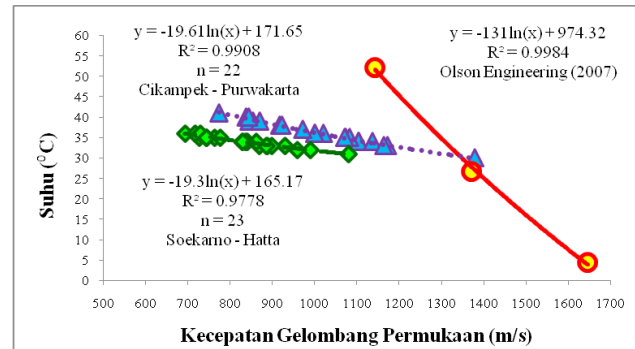
RAJAH 8. Modulus asphalt melawan suhu

Persamaan AASHTO (1993) digunakan dalam analisis data lendutan pengujian AASHTO bagi mendapatkan nilai modulus campuran asfalt yang realistik pada suhu yang tinggi. Hasilnya adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 8 dan ini hampir bersesuaian dengan hasil kajian ini yang didapatkan sama dengan pengujian FWD atau pengujian UTM. Suhu di bawah 20 °C bagi AASHTO dan suhu di bawah 27 °C bagi kajian ini menunjukkan hasil modulus campuran berasfalt yang lebih besar berbanding yang diperolehi dari kaedah SHELL. Ini kerana dalam suhu rendah pengujian lentur di makmal (UTM) memberikan nilai regangan sampel yang lebih kecil berbanding regangan yang diperolehi dari pengujian (FWD) di lapangan.

Asfalt adalah satu bahan yang tidak kenyal lurus dan tingkat regangan dapat menurun dalam satu kenaikan tertentu di dalam modulus (Bohn et al. 1977). Walau bagaimanapun, perbezaan modulus pada suhu rendah tidak begitu penting bagi prestasi turapan. Bagi suhu yang melebihi 20 °C, modulus campuran berasfalt yang didapatkan dari kaedah SHELL menurun dengan lebih cepat berbanding kaedah AASHTO atau kajian ini. Dalam suhu melebihi 40 °C, hasil kaedah SHELL memperolehi nilai modulus campuran berasfalt yang rendah dan tidak realistik serta lebih rendah daripada modulus batu pecah. Pada suhu yang melebihi 30 °C, modulus asfalt kajian ini mempunyai nilai sederhana di antara kedua-dua kaedah (SHELL dan AASHTO).

PENGARUH SUHU DALAM UJIKAJI SASW

Sifat bahan turapan yang juga penting adalah sifat likat-kenyal (*visco-elastic*) lapisan permukaan turapan berasfalt dalam fungsi suhu. Sifat ini berkait rapat dengan perubahan kekukuhan bahan berasfalt dalam perubahan suhu. Bahan perkerasan yang mempunyai sifat ini adalah hanya lapisan permukaan berasfalt (Sentot 2012). Rajah 9 pula menunjukkan hubungan suhu melawan kecepatan gelombang permukaan yang didapatkan dalam kajian ini (lebuh raya Cikampek–Purwakarta dan lebuh raya Soekarno–Hatta) dan kajian oleh Olson Engineering pada tahun 2007. Olson Engineering mendapati bahawa kenaikan suhu dalam turapan boleh lentur yang mempunyai ketebalan 16.764 cm menyebabkan kecepatan gelombang permukaan menurun. Pada suhu 4.44 °C, didapati kecepatan gelombang permukaan adalah 1645.9 m/s dan kecepatan gelombang permukaan adalah 1371.6 m/s pada suhu 26.66 °C. Manakala, pada suhu 52.22 °C didapati kecepatan gelombang permukaan adalah 1143.0 m/s. Semakin tinggi kecepatan merambat gelombang dalam lapisan berasfalt, semakin tinggi modulus lapisan berasfalt tersebut dan sebaliknya. Pada pengujian kaedah SASW regangan yang terjadi pada bahan berasfalt kurang daripada 10⁻³% dan ini lebih kecil dari pengujian FWD dan UTM. Oleh kerana kecepatan gelombang menurun seiring dengan kenaikan suhu lapisan berasfalt, maka modulus elastik juga akan menurun (Sentot 2012).



RAJAH 9. Hubungan kecepatan gelombang permukaan (m/s) melawan suhu kajian ini dan Olson Engineering

KESIMPULAN

Secara umumnya, semakin tinggi suhu yang dikenakan pada lapisan berasfal perkerasan lentur menghasilkan modulus elastik yang nilainya semakin menurun. Sebaliknya, semakin rendah suhu yang dikenakan pada lapisan berasfalt perkerasan lentur menghasilkan modulus elastik yang nilainya semakin naik. Tingkat regangan pengujian yang berbeza (FWD, UTM dan SASW) pada lapisan turapan berasfalt dipengaruhi pula oleh perubahan suhu.

RUJUKAN

- Alavi, S. H. & Monismith, C. L. 1994. Time and temperature dependent properties of asphalt concrete mixes tested as hollow cylinders and subjected to dynamic axial and shear loads. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 63: 152-181.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bohn, A. O., Stubstad, R. N., Sorensen, A. & Simonsen, P. 1977. Rheological properties of road materials and their effect on the behavior of a pavement section tested in a climate controlled, linear track road testing machine. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*; 105-131.
- Charif, K. 1991. Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton bitumineux en petites et grandes déformations, Tesis PhD, École Centrale Paris, Perancis.
- Di Benedetto, H. & Olard, F. 2009. DBN law for the thermo-visco-elasto-plastic behavior of asphalt concrete, Chapter 9, *Modelling of asphalt concrete* (Ed. Kim, Y.R) ASCE Press, New York.
- Doubbaneh, E. 1995. Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations, Tesis PhD, Institut National des Sciences Appliquées

- de Lyon, Perancis.
- Dynatest Engineering A/S. 1989. ELMOD/ELCON user's manual (ELMOD 3.2). Dynatest Engineering A/S. Vedbaek, Denmark.
- Ehrola, E., Belt, J. & Ryynanen, T. 1990. Influence of asphalt pavements. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfield*. Norway: Trondheim.
- Haas, R. & Hudson, W. R. 1978. *Pavement Management System*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Park, H. C. & Kim, D. S. 2001. Evaluation of the dispersion phase and group velocities using harmonic wavelet transform. *NDT&E International* 34: 457-467.
- Puslitbang, P. U. 1993. Faktor ekivalent beban (ESA) Untuk perencanaan perkerasan lentur dengan alat falling weight deflectometer (FWD), Laporan Penelitian 11010TJ92. Maret 1993.
- Sentot Hardwiyono. 2012. Kelakuan tak lurus sistem turapan boleh lentur menggunakan kaedah SASW dan FWD. Tesis PhD, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.
- Ullidtz, P. 1987. *Pavement Analysis*. Denmark: The Technical University of Denmark, Elsevier.
- Universal Testing Machine. 2002. Reference manual. Test no.16. Feed back controlled 5-pulse indirect tensile modulus test, Australia.
- Van der Poel, C. 1954. A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry* 4: 231-236.
- Whiteoak, D. 1990. *The Shell Bitumen Handbook*. United Kingdom: Shell Bitumen.
- Mohd Raihan Taha
 *Nur Izzi Md. Yusoff
 Khairul Anuar Mohd Nayan
 Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur
 Fakulti Kejuruteraan dan Alam Sekitar
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 Bangi, Selangor
 Malaysia
- Sentot Hardwiyono
 Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur
 Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
 Indonesia
- Mohd Rosli Hainin
 Fakulti Kejuruteraan Awam
 Universiti Teknologi Malaysia
 81310 Skudai, Johor
 Malaysia
- *Corresponding author: izzi@vlsi.eng.ukm.my
- Received Date: 20 June 2012
 Accepted Date: 5 October 2012