

Pengaruh Perubahan Suhu pada Modulus Elastik Lapisan Beraspal Perkerasan Lentur dalam Pengujian Regangan yang Berbeda

(Temperature Influence Effect on Elastic Modulus Flexible Pevement Layers in Difference Strain Test)

SENTOT HARDWIYONO

ABSTRACT

Flexible pavement strength (Flexible Pavement) is affected by changes in the nature around the changes in temperature affect the strength asphalt layer and seasonal changes (precipitation) affect the strength of the soil layer is not particularly asphalt base. Research to determine the effect of temperature for a layer of flexible pavement in the field can be done in two ways. The first destructive test (Destructive Test, DT) such as core-drill are routed by means of a laboratory test using Universal Testing Machine (UTM). The second test is not destructive (Non Destructive Test, NDT) such as direct field test using a Falling Weight Deflectometer (FWD) and tools Spectral Analysis of Surface Wave (SASW). Testing the temperature of use as has been mentioned with a different strain performed at the Soekarno-Hatta road and highway Cikampek-Purwakarta, Bandung, West Java, Indonesia. Testing methods and testing different strain rates produce different elastic modulus values in testing asphalt flexible pavement layer. The general conclusion, the higher the temperature imposed on the asphalt pavement layer elastic modulus flexural yield whose value has declined. Conversely the lower the temperature imposed on the asphalt pavement layer elastic flexural modulus values produce increasingly rising. Different strain rate testing (FWD, UTM and SASW) on asphalt pavement layer is influenced also by changes in temperature.

Keywords: SASW, FWD, UTM, elastic modulus, asphalt layers, flexible pavement

PENDAHULUAN

Perkerasan lentur biasanya terdiri dari lapisan beraspal, lapisan pondasi A dan lapisan pondasi B yang diletakkan di atas tanah dasar. Kekuatan perkerasan lentur ditentukan oleh mutu bahan yang digunakan dan biasanya diukur dalam nilai modulus bahan (E). Kekuatan perkerasan lentur juga dipengaruhi oleh perubahan cuaca atau musim di kawasan tersebut. Perubahan suhu mempengaruhi modulus lapisan beraspal dan perubahan curah hujan mempengaruhi modulus lapisan tak beraspal, utamanya tanah dasar. Faktor lingkungan seperti suhu mempunyai pengaruh terhadap perilaku lapisan perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan ikat (Ullidz 1987; Ehlora, 1990; AASHTO, 1993).

Campuran aspal adalah bahan komposit yang terdiri dari aspal dan bahan batuan berbutir yang mempunyai gradasi yang berbeda dalam

rasio tertentu. Bahan batuan berbutir mempunyai pengaruh besar bagi sifat campuran aspal. Kandungan aspal dalam campuran ini relatif kecil (sebagai pelengkap, yaitu 4% hingga 7% berat campuran) dan mempengaruhi sifat struktur perkerasan lentur hingga batas tertentu. Aspal mempunyai sifat viskositas cair (*viscous liquids*) pada suhu tinggi atau pembebanan yang lama. Pada suhu rendah atau pembebanan yang pendek aspal mempunyai sifat padat elastik (*elastic solids*) atau rapuh (*brittle*). Pada suhu dan pembebanan pertengahan didapatkan sifat aspal viskositas elastik (*viscoelastic*) (Gambar 1).

Gambar 1 menunjukkan perubahan suhu dan sejarah perubahan beban sangat mempengaruhi bagi respon lapisan beraspal (Whiteoak, 1990). Oleh sebab itu sifat mekanik aspal ditunjukkan oleh suatu modulus kekakuan (*stiffness*) yang diusulkan oleh Van der Poel (1954) seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1.

$$S_b \text{ atau } S_m = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left(\frac{1}{T} \right) \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

- S_b atau S_m : modulus kekakuan pada masa pembebanan (t) dan suhu (T)
- σ : tegangan
- ε : regangan pada suhu (T) dan masa pembebanan (t)

Tiga jenis utama sifat amplitudo regangan dan jumlah beban yang dibebankan pada campuran aspal (di Benedetto, 1990) ditunjukkan dalam Gambar 2.

Gambar 2 dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Pada pembebanan dan regangan yang kecil, sifat bahan sebagian besar tak linier.
- b. Untuk pembebanan beberapa ratus putaran (siklik) dan regangan kecil ($<10^{-4}$) sifat bahan seperti viskositas elastik linier.
- c. Pembebanan putaran beberapa puluh ribu dan pada regangan kecil, ketika keadaan

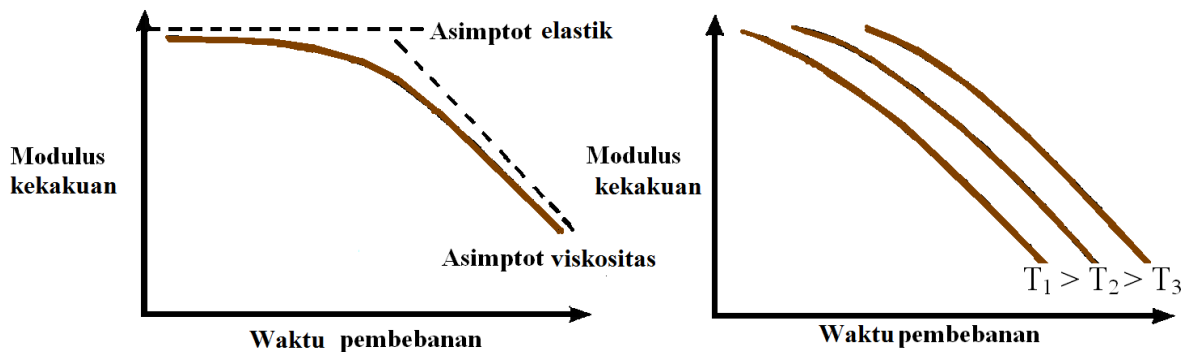
kerusakan mulai terjadi, bahan menunjukkan sifat kelelahan (*fatigue*).

Campuran aspal bukan bahan ideal dan anggapan linier adalah tidak benar. Walaubagaimanapun, penggunaan teori viskositas elastik linier mungkin dapat dibenarkan untuk campuran aspal pada regangan kecil (Alavi et al., 1994; Doubbaneh, 1995).

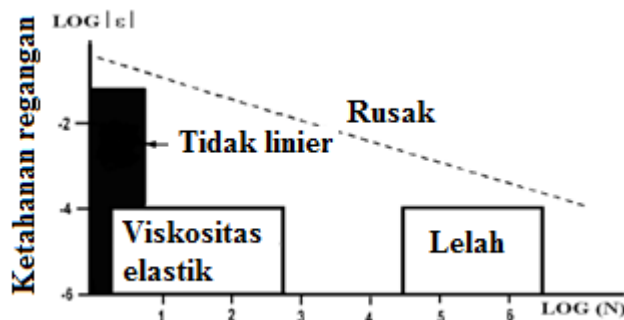
Pada umumnya bahan lapisan perkerasan dianggap mempunyai respon linier untuk tegangan dan regangan kecil (rasio tegangan dan regangan tetap). Telah ditampilkan bahwa campuran aspal menunjukkan sifat linier untuk tegangan 10% lebih rendah daripada kekuatan tegangan atau hasil regangan yang kurang daripada 0,1%.

Gambar 3 menunjukkan perubahan modulus kekakuan AC (*Asphalt Concrete*) pada suhu 10°C versus regangan ε (Charif, 1991).

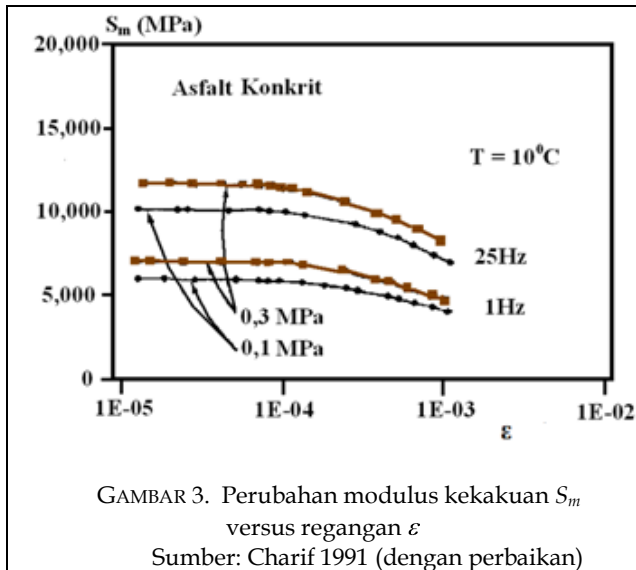
Gambar 4 (Doubbaneh, 1995) menunjukkan perubahan modulus AC dalam suhu 23°C versus perubahan bentuk ($\mu\text{m/m}$).



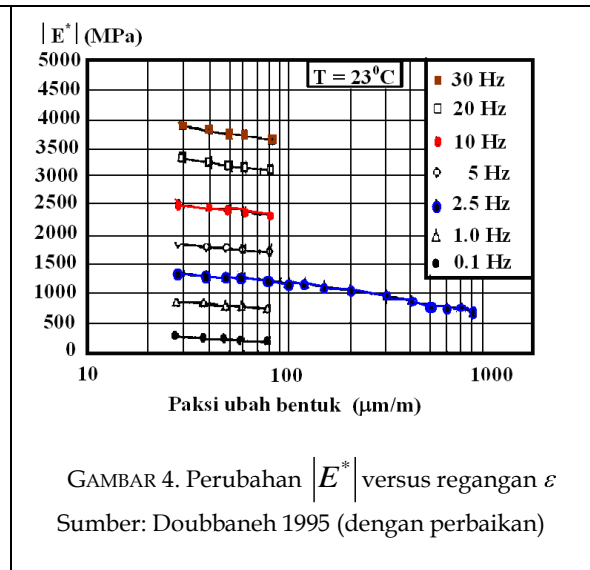
GAMBAR 1. Modulus kekakuan versus waktu pembebanan atau frekuensi dan pengaruh perbedaan suhu
Sumber: Whiteoak, 1990



GAMBAR 2. Jenis sifat yang diteliti pada campuran aspal
Sumber: di Benedetto 1990.



GAMBAR 3. Perubahan modulus kekakuan S_m versus regangan ϵ
 Sumber: Charif 1991 (dengan perbaikan)



GAMBAR 4. Perubahan $|E^*|$ versus regangan ϵ
 Sumber: Doubbaneh 1995 (dengan perbaikan)

Sifat kimia bahan dan kekakuan lapisan aspal dapat berubah akibat perubahan suhu. Park et al. (2001) menjalankan analisis pengaruh suhu pada perhitungan balik modulus Young bahan aspal. Modulus kekakuan dapat berubah sesuai dengan kedalaman lapisan aspal yang bergantung kepada pemanasan atau pendinginan udara sekitar kawasan perkerasan. Oleh karena itu koreksi suhu bagi lendutan pada pengujian FWD diperlukan. Desain perkerasan menurut AASHTO (1993) memberikan koreksi suhu pengukuran lendutan bagi keadaan normal untuk rujukan suhu perkerasan. Pengujian dilakukan pada suhu 0°C hingga 40°C dengan kecepatan kendaraan 55 km/jam. Persamaan empiris untuk menentukan modulus lapisan beraspal ditunjukkan dalam Persamaan 2.

$$E(t) = 15000\text{MPa} - 7900\text{MPa} \cdot \log(t^0\text{C}) \dots (2)$$

dengan:

$E_I(t)$: Modulus kenyal lapisan campuran aspal dalam suhu t ($t \geq 1^\circ\text{C}$)

Pengaruh perubahan suhu modulus campuran aspal (*mix asphalt stiffness*) pada *software* ELMOD dinyatakan dengan persamaan koreksi suhu seperti yang ditampilkan pada Persamaan 3.

$$\left[\frac{E_t}{E_c} \right] = [A_s - B_s \log(t_a/c_a)] \dots (3)$$

dengan:

E_t : modulus elastik lapisan campuran aspal pada suhu t .

E_c : modulus elastik lapisan campuran aspal rujukan.

t_a : suhu lapisan campuran aspal.

c_a : suhu lapisan campuran aspal rujukan.

A_s, B_s : konstanta.

Hubungan lendutan, tebal lapisan beraspal perkerasan lentur dan suhu pengujian alat FWD oleh Ehrola et al. (1990) dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang ditunjukkan dalam Persamaan 4 dan Persamaan 5.

$$d = A_d * B_d^T \dots (4)$$

$$d = 0.981 * h^{0.00726} \dots (5)$$

dengan:

T : suhu perkerasan ($^\circ\text{C}$)

A_d, B_d : konstanta

h : tebal perkerasan (mm)

d : lendutan (mm)

UJI PEMBANDING UNTUK PARAMETER MODULUS DAN KETEBALAN PERKERASAN LENTUR

Uji perbandingan yang dilakukan dalam kajian ini adalah uji laboratorium untuk mengetahui modulus lapisan beraspal yang didapatkan dari uji *cordrill* di kedua jalan raya yang diteliti.

Modulus Lapisan Beraspal

Dalam kajian ini modulus lapisan beraspal diukur menggunakan alat uji *Universal Testing Machine* (UTM). Sampel sejumlah 16

didapatkan dari uji *cordrill*, kemudian sampel dibawa ke laboratorium untuk dilakukan uji modulus bahan. Ketika pengujian dijalankan, daya beban tekanan dibebankan kepada sampel dan regangan balik bahan yang dihasilkan diukur dalam arah garis pusat bahan.

Selanjutnya nilai modulus lapisan beraspal ditentukan menggunakan Persamaan 6 sampai dengan Persamaan 8 (Haas & Hudson, 1978; Universal Testing Machine, 2002).

$$S_t = \frac{2F}{\pi LD} \dots\dots\dots (6)$$

$$E_{aspal} = \frac{H}{D} \dots\dots\dots (7)$$

$$M_{aspal} = \frac{\sigma_d}{E_{aspal}} = \frac{F(R+0.27)}{LH} \dots\dots (8)$$

dengan:

- S_t : kekuatan tegangan (kPa),
- E_{aspal} : modulus elastik sampel aspal (MPa),
- L : panjang sampel bahan (mm),
- D : diameter sampel bahan (mm),
- F : daya puncak maksimum yang diberikan untuk beban pengulangan (N),
- R : rasio Poisson yang ditentukan
- H : perubahan bentuk kembali pada arah mendarat.

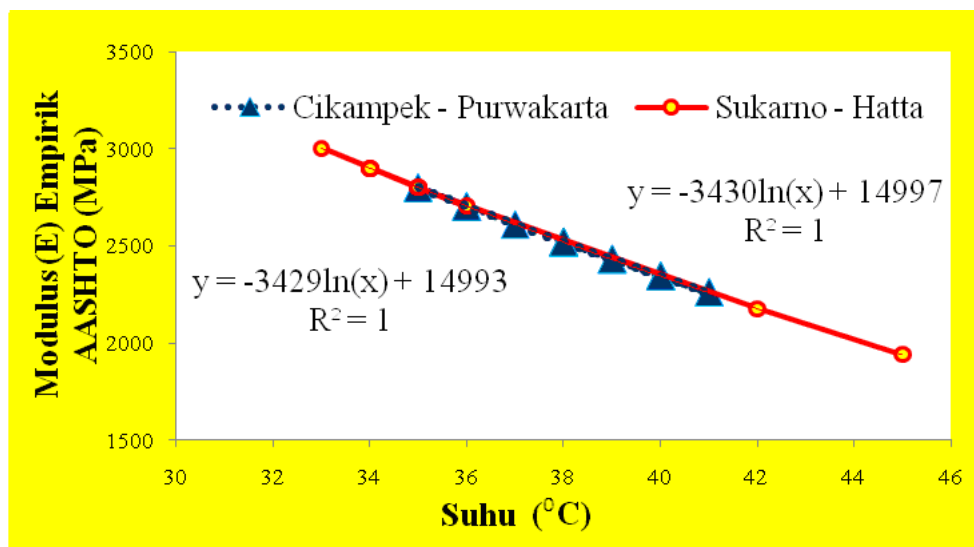
Pengaruh Suhu pada Modulus Elastik Perkerasan

Persamaan empiris untuk menjelaskan hubungan antara suhu dengan modulus elastik aspal telah dikembangkan oleh AASHTO (1993). Hubungan antara suhu dengan modulus campuran aspal dari kedua jalan yang diteliti telah dihitung dengan menggunakan Persamaan 2. Sebagai contoh penggunaan Persamaan 2, satu titik rekaman suhu perkerasan diambil (T_p) 40^0 C. Modulus kenyal (E_I) lapisan perkerasan beraspal dihitung sebagai berikut:

$$E_I(40^0C) = 15.000 \text{ Mpa} - 7.900 \text{ Mpa} * \log 40 = 2.344 \text{ MPa.}$$

Hubungan suhu perkerasan dengan modulus (E) bahan beraspal berdasarkan persamaan empirik AASHTO (1993) bagi kedua perkerasan ditunjukkan dalam Gambar 5.

Hubungan dua parameter ini sangat baik dengan R^2 hampir satu yang berarti hubungan ini menghampiri kondisi sempurna. Pada suhu rendah modulus (E) perkerasan beraspal mempunyai nilai tinggi dan sebaliknya pada suhu tinggi modulus (E) perkerasan beraspal mempunyai nilai rendah. Ini bersesuaian dengan sifat reologi dan viskositas bahan aspal yang mudah dipengaruhi oleh perubahan suhu. Analisis ini juga menunjukkan bahwa persamaan empirik AASHTO (1993) dapat digunakan di kawasan yang diuji.



GAMBAR 5. Modulus perkerasan beraspal versus suhu perkerasan, berasaskan persamaan AASHTO (1993)

*Analisis Lanjutan Pengaruh Suhu pada
Modulus Elastik Perkerasan*

ELMOD/ELCON (1989) membuat persamaan untuk pembedaan modulus kenyal lapisan perkerasan akibat pengaruh suhu yang dinyatakan dalam Persamaan 3. Suhu dan faktor A_s , B_s tidak sama bagi setiap kawasan karena bergantung kepada iklim dan suhu lingkungan. Puslitbang (1993) menentukan suhu rujukan perkerasan $c = 35^0$ C dan modulus perkerasan beraspal E_c rujukan 2000 MPa dengan faktor $A_s=1$ dan $B_s=3.5$. Dynatest Engineering Denmark (1989) juga menentukan suhu rujukan perkerasan $c = 25^0$ C dan modulus perkerasan beraspal E_c rujukan 3000 MPa dengan perkerasan $A_s=1$ dan $B_s=2.2$.

Persamaan logaritma yang mempunyai hubungan ($R^2=1$) antara modulus (E) perkerasan beraspal dan suhu perkerasan (t^0 C) kedua jalan raya ditunjukkan dalam Persamaan 9.

$$Y = 14.995 - 3.429,5 \ln(x) \dots \dots \dots (9)$$

Persamaan 9 ditulis dalam bentuk persamaan logaritma dan simbol $Y = E_t$ yang menyatakan modulus perkerasan beraspal pada suhu t^0 sebagai berikut:

$$E_t = 14.995 - 7895,56 \log(t) \dots \dots \dots (10)$$

Untuk suhu (t) rujukan $c = 35^0$ C (Puslitbang, 1993) dan $c = 25^0$ C (Dynatest Engineering Denmark, 1989) dimasukkan dalam Persamaan 10 didapatkan $E_{c35} = 2802$ MPa dan $E_{c25} = 3956$ MPa. Modulus perkerasan beraspal E_c kajian ini lebih besar daripada modulus perkerasan beraspal E_c rujukan 2000 MPa (Puslitbang, 1993) dan 3000 MPa (Dynatest Engineering Denmark, 1989).

Seterusnya, Persamaan 10 dibagi oleh $E_{c35} = 2802$ MPa maka didapatkan:

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

Suhu t^0 C persamaan 11 pula dibagi oleh suhu $c=35^0$ C didapatkan persamaan:

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

Persamaan 12 bersesuaian dengan Persamaan 3 (ELMOD 1989) dimana faktor $A_s = 0,9957$ (hampir sama dengan 1) dan faktor $B_s = 2,82$. Menggunakan metode yang sama, E_t pada

Persamaan 11 dibagi oleh $E_{c25} = 3956$ MPa dan seterusnya suhu t^0 C pada Persamaan 12 dibagi oleh suhu $c=25^0$ C maka persamaan berikut didapatkan:

$$\frac{E_t}{E_{c35}} = 1 - 2 \log(t) \dots \dots \dots (13)$$

Persamaan 13 juga bersesuaian dengan persamaan ELMOD (1989) dimana faktor $A_s = 1$ dan $B_s = 2$. Faktor A_s yang didapatkan dari pengujian mempunyai nilai 1 dan bersesuaian dengan faktor A_s kedua rujukan. Faktor B_s pengujian juga mempunyai nilai 2 dan ini lebih kecil daripada faktor B_s kedua rujukan yaitu bernilai 2.2 (Dynatest Engineering Denmark, 1989) dan 3.5 (Puslitbang, 1993). Semakin besar faktor B_s yang digunakan dalam persamaan ELMOD (dimana faktor A_s tetap 1) semakin kecil nilai modulus perkerasan beraspal E_t yang didapatkan, dan sebaliknya. Keadaan ini membuktikan pula bahwa perubahan suhu lingkungan mempunyai pengaruh terhadap modulus kenyal perkerasan beraspal.

Faktor A_s dan B_s dalam persamaan ELMOD (1989) bagi pembedaan modulus kenyal lapisan perkerasan beraspal akibat pengaruh suhu dalam desain perkerasan masing-masing mempunyai nilai 1 dan 3,5, dengan suhu rujukan (c) 35^0 C dan modulus kenyal rujukan lapisan perkerasan beraspal (E_c) 2.000 MPa (Puslitbang, 1993). Ini dilakukan supaya nilai penghitungan modulus perkerasan beraspal E_t didapatkan kecil (konservatif) dan penilaian kekukuhan perkerasan beraspal tidak berlebihan.

Pengujian modulus kenyal lapisan perkerasan beraspal akibat pengaruh suhu di jalan raya Soekarno-Hatta dan Cikampek-Purwakarta menggunakan nilai rujukan Puslitbang (1993) dan persamaan ELMOD (1989) ditunjukkan dalam Gambar 6.

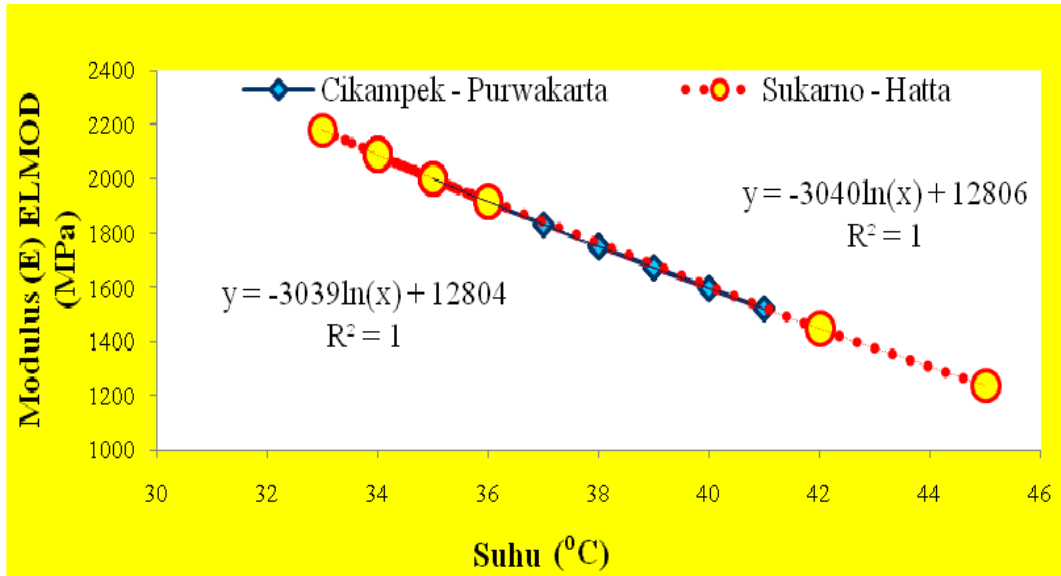
PENGUJIAN UTM DI LABORATORIUM

Hasil pengujian *cordrill* dan hubungan modulus (E) lapisan beraspal AC₍₁₂₎ dan ATB pengujian UTM di laboratorium versus suhu (t^0) ditunjukkan dalam Gambar 7. Persamaan empiris Gambar 7 ditunjukkan dalam Persamaan 9.

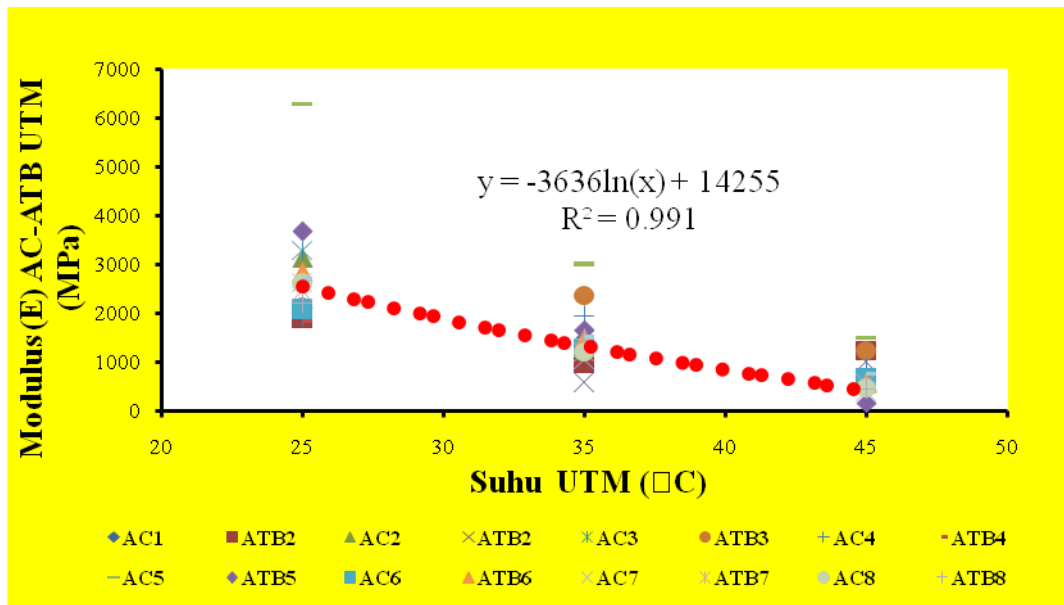
$$E_{AC-ATB} = 14255 - 3636 \ln t^0 \quad \text{UTM} \quad \dots \dots (14)$$

Persamaan empirik ini adalah modulus beraspal (AC-ATB) versus suhu (t^0) yang menunjukkan modulus bahan beraspal dipengaruhi oleh perubahan suhu. Semakin tinggi suhu pengujian UTM nilai modulus sampel bahan beraspal menjadi semakin rendah dan demikian pula sebaliknya.

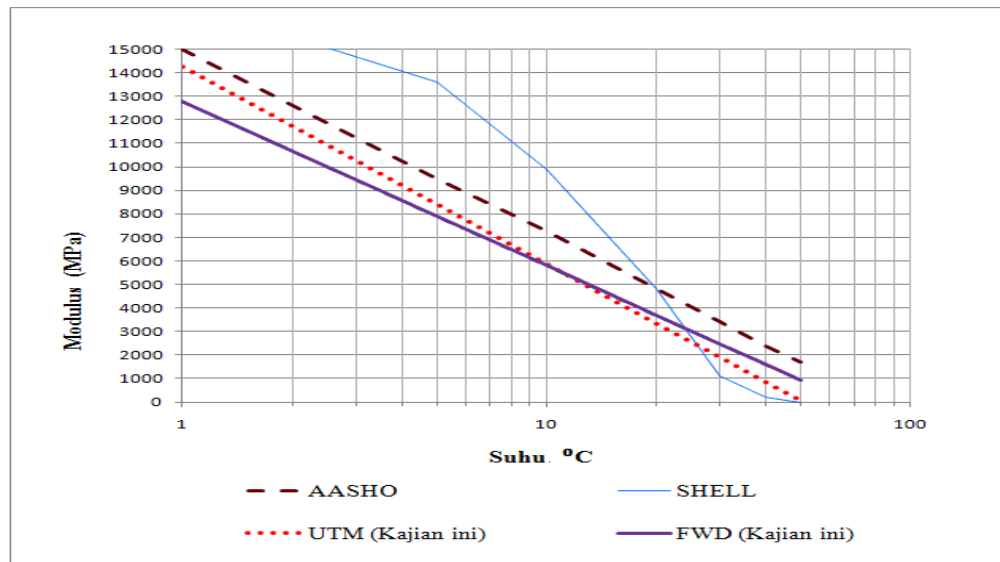
Kajian serupa yang didapatkan oleh SHELL dan AASHO dalam Ulidtz (1987) menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara suhu dan modulus aspal. Hasil pengujian FWD dan Persamaan 14 kajian ini yang diplot bersama hasil yang didapatkan oleh SHELL dan AASHO ditunjukkan dalam Gambar 8.



GAMBAR 6. Modulus perkerasan (E) MPa ELMOD versus suhu perkerasan (°C), Jalan raya Sukarno-Hatta dan Cikampek-Purwakarta



GAMBAR 7. Modulus AC-ATB versus suhu ujian UTM



GAMBAR 8. Modulus aspal (MPa) versus suhu aspal (°C)

Hasil pengujian laboratorium yang diplot dalam Gambar 8 diawali dari suhu 25°C hingga 45°C. Persamaan yang didapatkan seterusnya digunakan untuk menghitung keadaan suhu 1°C hingga suhu 50°C. Ini dilakukan untuk memudahkan penggambaran dalam satu grafik bersama garis yang dihasilkan SHELL dan AASHO. Hasil dari AASHO mempunyai nilai yang hampir sama dengan hasil kajian ini, demikian pula hasil SHELL menunjukkan corak yang hampir sama tetapi bersifat tidak linier.

Tiga hal yang diperhatikan dalam metode SHELL untuk menghitung kekakuan E modulus lapisan beraspal adalah:

- Berat isi batuan pecah dalam campuran aspal dan berat jenis udara dalam campuran tidak boleh melebihi 3%.
- Nomogram van der Poel digunakan bagi penghitungan kekakuan aspal (MPa) dalam rentang suhu antara 10°C hingga 70°C dan waktu pembebanan 0.1 dan 0.01 detik.
- Kekakuan campuran beraspal E (MPa) dihitung menggunakan Persamaan 10 (SHELL).

$$E_a = S_b \left[1 + \left(\frac{2.5}{n} \right) * \frac{C'_v}{(1-C'_v)} \right]^n \dots \dots \dots (10)$$

dengan:

- n = $0.83 * \log (40.000 \text{ MPa}/S_b)$
- S_b = kekakuan aspal (MPa) dari nomogram van der Poel's
- C'_v = faktor koreksi C_v bagi berat isi udara dalam campuran aspal >3%

$$C_v = \text{berat isi batuan pecah dalam campuran aspal (\%)}$$

Modulus campuran aspal yang dihitung menggunakan metode ini umumnya bersesuaian dengan pengujian lentur (*bending tests*) dalam laboratorium (Ullidtz, 1987). Dalam suhu tinggi, walaubagaimanapun, pengujian lentur cenderung memberikan nilai rendah yang tidak realistik. Kenaikan suhu pengujian menyebabkan modulus campuran aspal dalam perkerasan bertemu dengan modulus batuan pecah, dimana modulus alur sampel yang digunakan dalam pengujian lentur mendekati nol. Seterusnya, gambar yang dihitung menggunakan Persamaan SHELL menunjukkan garis lengkung (Gambar 8).

Sampel yang digunakan dalam pengujian UTM ini adalah hasil pengujian *cordrill* di jalan raya Soekarno-Hatta yang berbeda dengan sampel pengujian yang digunakan oleh metode SHELL, dan oleh karena itu hasilnya berbeda. Persamaan AASHO (1993) digunakan dalam analisis data lendutan pengujian AASHO bagi mendapatkan modulus campuran aspal yang realistik dalam suhu tinggi. Hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 11 dan ini hampir sesuai dengan hasil kajian ini yang didapatkan sama dengan pengujian FWD atau pengujian UTM. Suhu di bawah 20°C bagi AASHO dan suhu di bawah 27°C bagi kajian ini menunjukkan hasil modulus campuran aspal yang lebih besar berbanding yang didapatkan oleh metode SHELL. Perbedaan ini karena dalam suhu rendah pengujian lentur di laboratorium (UTM) mendapatkan nilai

regangan sampel yang lebih kecil berbanding regangan yang didapatkan dalam pengujian (FWD) di lapangan.

Aspal adalah satu bahan yang tak sesungguhnya kenyal linier dan tingkat regangan dapat menurun dalam satu kenaikan tertentu didalam modulus (Bohn 1977). Perbedaan modulus dalam suhu rendah, walaubagaimanapun, tidak begitu penting bagi prestasi turapan. Bagi suhu melebihi 20⁰C modulus campuran aspal yang didapatkan oleh metode SHELL menurun lebih cepat berbanding metode AASHO atau kedua kajian ini. Pada suhu melebihi 40⁰C hasil metode SHELL mendapatkan nilai modulus campuran aspal yang rendah dan tidak realistis serta lebih rendah daripada modulus batu pecah. Pada suhu lebih dari 30⁰C modulus aspal kajian ini mempunyai nilai *moderate* diantara kedua metode (SHELL dan AASHO).

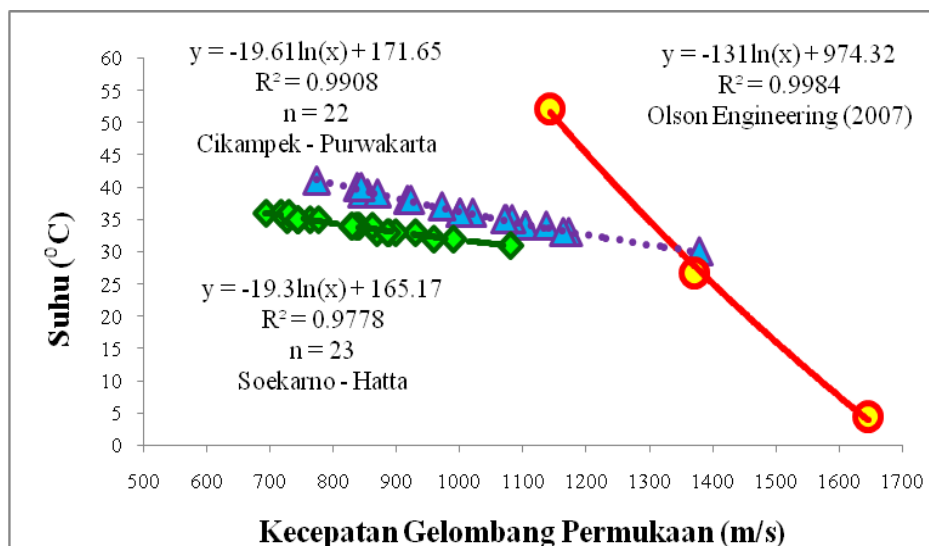
PENGARUH SUHU DALAM PENGUJIAN SASW PADA LAPISAN BERASPAL PERKERASAN LENTUR

Sifat bahan yang juga penting adalah sifat viskositas elastik lapisan permukaan perkerasan beraspal dalam fungsi suhu. Sifat ini berkaitan erat dengan perubahan kekakuan bahan beraspal dalam perubahan suhu. Bahan

perkerasan yang mempunyai sifat ini adalah hanya lapisan permukaan beraspal (Sentot, 2011).

Gambar 9 menunjukkan hubungan suhu versus kecepatan gelombang permukaan yang didapatkan dalam kajian ini (jalan raya Cikampek-Purwakarta dan Soekarno-Hatta) dan kajian Olson Engineering (2007).

Kajian Olson Engineering (2007) mendapatkan kenaikan suhu dalam perkerasan (AC) yang mempunyai tebal 16.764 cm menyebabkan kecepatan gelombang permukaan menurun. Pada suhu 4,44⁰ C didapatkan kecepatan gelombang permukaan adalah 1645,92 m/s dan pada suhu 26,66⁰ C didapatkan kecepatan gelombang permukaan adalah 1371,6 m/s. Pada suhu 52,22⁰C didapatkan kecepatan gelombang permukaan adalah 1143 m/s. Semakin tinggi kecepatan merambat gelombang dalam lapisan aspal semakin tinggi pula modulus lapisan beraspal tersebut dan sebaliknya. Pada pengujian metode SASW regangan yang terjadi pada bahan beraspal kurang dari 10⁻³% dan ini lebih kecil dari pengujian FWD dan UTM. Oleh karena kecepatan gelombang menurun seiring dengan menaiknya suhu lapisan beraspal perkerasan lentur maka modulus elastiknya pun ikut menurun (Sentot 2011).



GAMBAR 9. Hubungan kecepatan gelombang permukaan (m/s) versus suhu (°C) kajian ini dan kajian Olson Engineering 2007

KESIMPULAN

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

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas pemberian karya siswa, En. Khairul Anuar K Nayan atas support alat SASW dan kelengkapan lainnya, Prof. Dr. Moh. Raihan Taha dan Prof. Dr. Zamri Chik atas bimbingannya, Dr. Sri Atmaja PNJJR atas segala bantuannya, serta Dr. Siegfried atas fasilitas alat FWD dan kelengkapannya dari Puslitbang Bandung. Terimakasih pula diucapkan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia yang memberi kesempatan untuk belajar.

DAFTAR PUSTAKA

- 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*, Vol. 63, pp.152-175.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, DC: AASHTO
- Charif, K. (1991). *Contribution a l'etude du comportement mecanique du beton bitumieux en petites et grandes deformations*, These de Doctorat, Ecole Centrale Paris.
- Di Benedetto, H. (1990). *New approach to behaviour of coated bitumens: experimental results and rheological characteristics. in Mechanical tests for bituminous mixes* (edited by H. W. Fritz and E. Eustacchio). Chapman and Hall Great Britain, pp. 387-401.
- Doubbaneh, E. (1995). *Comportement mecanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes deformations*, These de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, ENTPE.
- Ehrola, Belt J, Ryynanen T. (1990) Influence of Asphalt Pavements, *Proc. Of the 3 rd. Int. Conf. On Bearing Capacity of Roads and Airfield*, Trondheim, Norway.
- 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.
- Ullidtz, P. (1987). *Pavement Analysis* The Technical University of Denmark, Elsevier, .
- Universal Testing Machine. (2002). Reference Manual of Universal Testing Machine. Test No.16. *Feed Back Controlled 5-Pulse Indirect Tensile Modulus Test*. Australia.
- Van der Poel, C. (1990). General system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relations to routine test data. *Journal of Applied Chemistry*, pp.221-236, Whiteoak, D., The Shell bitumen handbook, Shell bitumen, UK.

PENULIS:

Sentot Hardwiyono ✉

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul 55183.

✉ Email: sentot_hardwiyono@yahoo.com