

## Evaluasi Koreksi Lendutan Akibat Temperatur dan Beban (Pd T-05-2005-B) pada Umur Perkerasan

Aloysius Tjan

Universitas Katolik Parahyangan – Program Studi Teknik Sipil  
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung 40141. E-mail: aloysius@unpar.ac.id

### Abstrak

Akurasi evaluasi struktur perkerasan lentur menjadi penting karena keputusan strategi pemeliharaan perkerasan merupakan bagian integral sistem manajemen perkerasan berdasarkan evaluasi tersebut. Lendutan FWD merupakan salah satu cara yang ditawarkan oleh Pd T-05-2005-B (2005). Lendutan dipengaruhi temperatur perkerasan dan beban yang bekerja pada saat pengujian. Pedoman menggunakan temperatur 35°C dan beban 4.08 ton sebagai temperatur dan beban standar. Dari hasil analisis, koreksi lendutan akibat beban tidak standar dapat digunakan dan menghasilkan solusi yang akurat. Akan tetapi, koreksi lendutan akibat pengukuran pada temperatur tidak standar akan menghasilkan kesalahan lendutan, sehingga juga pada prediksi umur sisa. Kesalahan prediksi umur sisa akan semakin besar jika pengujian lendutan dilakukan semakin jauh dari temperatur standar. Koreksi lendutan disarankan diubah dengan Persamaan 19, yang akan memberikan prediksi umur sisa lebih akurat seperti tampak pada Tabel 2.

**Kata kunci:** Lendutan FWD, umur sisa, temperatur standar, beban standar, faktor koreksi.

### Abstract

Optimal pavement maintenance based on evaluation of pavement structure – makes the accuracy to the evaluation is very important - as an integral pavement management system, FWD deflection is one alternatif used in Pd T-05-2005-B (2005) for pavement structure evaluation. Deflection measured depends on pavement temperature as well as the load applied on FWD. The Guide (Pd T-05-2005-B) specified 35°C pavement temperature, and 4.08 ton of FWD loading as standard testing. Correction factors are provided when deflection test condition deviates than the standard. From this research, correction factor provided for non standard load is perfectly accurate. However, the correction factor provided for non standard pavement temperature is inaccurate. Equation 19 is proposed as better correction factor. Better accuracy of predicted pavement remaining life using the proposed equation is provided as shown on Table 2.

**Keywords:** Deflection of FWD, remaining life, standard temperature, standard loading, correction factor.

## 1. Pendahuluan

Struktur perkerasan (baik perkerasan lentur maupun perkerasan kaku) yang telah dikonstruksi dan kemudian dioperasikan melayani lalu lintas – perlu dilakukan evaluasi kondisi strukturalnya secara berkala. Evaluasi struktural ini menjadi dasar untuk membuat keputusan strategi pemeliharannya. Salah satu strategi itu adalah peningkatan (atau penambahan umur) perkerasan dengan konstruksi lapis ulang (atau *overlay*).

Evaluasi kondisi struktural ini antara lain berupa pengukuran lendutan akibat beban tertentu. Khusus untuk struktur perkerasan lentur – yang modulur struktur lapis campuran beraspal tergantung pada temperatur – maka besarnya lendutan juga tergantung pada temperatur. Pedoman desain tebal lapis ulang memberikan korelasi besarnya lendutan dengan umur perkerasan (Pd T-05-2005-B, 2005). Agar hubungan lendutan dan umur perkerasan berlaku umum, maka korelasi tersebut hanya berlaku pada kondisi tertentu, yaitu besarnya beban dan temperatur. Untuk pengukuran lendutan dengan alat FWD (*falling weight*

*deflectometer*) ditentukan syarat beban 40 kN, dan temperatur 35°C. Kedua kondisi syarat itu disebut sebagai kondisi standar. Bagi pengukuran pada kondisi yang tidak standar, lendutan harus dikoreksi – baik koreksi temperatur maupun koreksi beban – sehingga setelah menggunakan faktor koreksi tersebut, lendutan yang diperoleh menjadi seperti pengukuran pada kondisi standar.

Audina (2018) menyimpulkan bahwa koreksi temperatur yang diberikan Pedoman (Pd T-05-2005-B, 2005) perlu dievaluasi ulang. Pada temperatur pengukuran yang lebih rendah daripada 35°C – koreksi lendutan terlalu besar, sedangkan pada temperatur lebih besar daripada 35°C – koreksi lendutan terlalu kecil dari yang seharusnya. Ketidaksesuaian koreksi lendutan ini dipengaruhi oleh tebal lapis pondasi.

## 2. Tujuan Penelitian

Ketidaksesuaian koreksi lendutan akibat pengukuran lendutan pada temperatur bukan standar belum diketahui dampaknya terhadap umur perkerasan. Oleh

karena itu dalam penelitian ini fokus penelitian ini adalah:

- Evaluasi koreksi lendutan akibat pengukuran pada temperatur bukan standar
- Evaluasi koreksi lendutan akibat pengukuran dengan beban bukan standar
- Evaluasi hasil prediksi lendutan terhadap umur perkerasan
- Evaluasi hasil prediksi lendutan terhadap tebal overlay

### 3. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka yang utama adalah Pedoman Pd T-05-2005-B (2005) – karena koreksi lendutan yang akan dievaluasi berdasarkan pedoman ini. Evaluasi kekuatan struktur perkerasan lentur berdasarkan informasi lendutan di permukaan perkerasan akibat beban. Ada dua alat yang dapat digunakan untuk mengukur lendutan, yaitu *Benkelman Beam* dan *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Dalam penelitian ini dibahas pengukuran lendutan berdasarkan alat FWD.

#### 3.1. Hubungan lendutan dan umur perkerasan

Lendutan di permukaan struktur perkerasan lentur dipengaruhi oleh temperatur perkerasan dan beban yang menimbulkan lendutan. Pedoman menstandarisasi keduanya, yaitu temperatur perkerasan 35°C, dan beban 40 kN. Lendutan pada kondisi standar berkorelasi dengan umur perkerasan, seperti Persamaan 1. Umur dinyatakan sebagai repetisi sumbu standar, yaitu sumbu tunggal roda ganda dengan beban 8.16 ton. Aplikasi Persamaan 1 pada perkerasan yang telah beroperasi menjadi umur sisa. Dalam penelitian ini korelasi lendutan dan prediksi umur perkerasan seperti Persamaan 1 tidak menjadi topik kajian.

$$\delta_{35C,4.08t} = 17.004 \times (W_{18})^{-0.2307} \quad (1)$$

Dengan:

$\delta_{35C,4.08t}$  = lendutan di permukaan perkerasan lentur pada temperatur 35°C dan beban FWD 4.08 ton (mm)

$W_{18}$  = repetisi sumbu standar (sumbu tunggal roda ganda dengan beban 8.16 ton atau 18 kips)

#### 3.2. Hubungan lendutan dengan temperatur perkerasan

Aplikasi Persamaan 1 yang mensyaratkan lendutan diperoleh pada saat temperatur perkerasan sama dengan temperatur standar (35°C). Dalam praktek, syarat ini akan sangat sulit dipenuhi – karena temperatur perkerasan di lokasi pengukuran lendutan amat tergantung pada kondisi cuaca setempat dan sulit diprediksi bilamana temperatur itu akan terjadi. Sekalipun dapat diprediksi, mungkin durasi terjadinya menjadi terbatas (atau tidak dapat sebarang waktu). Hal

ini akan membatasi durasi operasi pekerjaan survei lendutan dan dan menjadi tidak praktis.

#### 3.2 Hubungan lendutan dengan temperatur perkerasan

Aplikasi Persamaan 1 yang mensyaratkan lendutan diperoleh pada saat temperatur perkerasan sama dengan temperatur standar (35°C). Dalam praktek, syarat ini akan sangat sulit dipenuhi – karena temperatur perkerasan di lokasi pengukuran lendutan amat tergantung pada kondisi cuaca setempat dan sulit diprediksi bilamana temperatur itu akan terjadi. Sekalipun dapat diprediksi, mungkin durasi terjadinya menjadi terbatas (atau tidak dapat sebarang waktu). Hal ini akan membatasi durasi operasi pekerjaan survei lendutan dan dan menjadi tidak praktis.

Dengan mempertimbangkan kendala pemenuhan syarat temperatur standar tersebut, agar survei lendutan dapat dilakukan pada setiap saat serta hasil lendutannya tetap dapat dipergunakan untuk memprediksi umur perkerasan, maka diperlukan faktor koreksi. Koreksi ini adalah faktor pengali lendutan pada temperatur sebarang - sehingga diperoleh lendutan seperti pada temperatur standar.

Koreksi temperatur ditentukan seperti Persamaan 2 (berlaku untuk tebal lapis permukaan campuran beraspal,  $H_L < 10$  cm) atau Persamaan 3 (berlaku untuk tebal lapis permukaan campuran beraspal,  $H_L \geq 10$  cm). Ekspresi dari kedua persamaan tersebut dalam bentuk visual seperti pada **Gambar 1**.

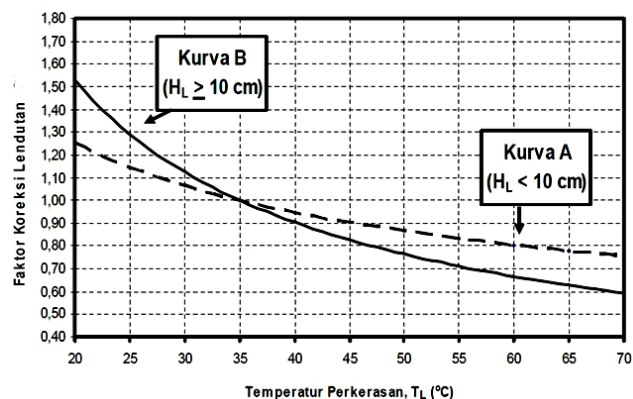
$$FK_t = 4.184 \times (T_L)^{-0.4025} \quad (2)$$

$$FK_t = 14.785 \times (T_L)^{-0.7573} \quad (3)$$

Dengan:

$FK_t$  = koreksi lendutan sebagai faktor pengali hasil pengukuran lendutan – sehingga diperoleh lendutan pada temperatur standar

$T_L$  = temperatur rata-rata lapis permukaan perkerasan, °C



**Gambar 1. Koreksi Lendutan akibat Temperatur tidak Standar (Pd T-05-2005-B, 2005)**

### 3.3 Hubungan lendutan dengan beban

Lendutan untuk memprediksi umur perkerasan dengan Persamaan 1 adalah akibat beban standar (4.08 ton) pada alat ukur FWD dengan radius pelat 5.9 in. Pembebanan pada FWD adalah akibat jatuhnya beban (*hammer*) pada ketinggian tertentu bersifat dinamis - impuls. Beban impuls yang terjadi diukur berdasarkan pembacaan beban pada *load cell* yang dipasang pada pelat FWD. Pengukuran lendutan dengan alat FWD ini dilakukan beberapa kali pada beberapa level beban impuls. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan hasil pengukuran lendutan yang *reliable*. Lendutan yang diukur pada berbagai beban (bukan standar) harus dikonversikan menjadi lendutan akibat beban standar. Koreksi lendutan akibat beban bukan standar menurut Pedoman (Pd T-05-2005-B, 2005) adalah seperti Persamaan 4.

$$FK_B = \frac{4.08}{B} \quad (4)$$

Dengan:

$FK_B$  = koreksi lendutan sebagai faktor pengali hasil pengukuran lendutan – sehingga diperoleh lendutan pada beban standar

$B$  = beban impuls yang bekerja pada pelat pada pengukuran lendutan dengan FWD, ton

Secara teoritis, besarnya lendutan akibat sebuah beban seperti pembebanan FWD pada material *semi-infinite* adalah seperti ditulis pada Yoder & Witczak (1975), yaitu pada Persamaan 5. Untuk lendutan di permukaan ( $z=0$ ), di pusat bidang kontak ( $a=0$ ), maka diperoleh  $H = 2$  (dari Tabel 2.2 (Yoder & Witczak, 1975)) serta untuk angka Poisson = 0.5 maka menjadi Persamaan 6.

$$\Delta_z = \frac{p(1+\mu)a}{E_1} \left[ \frac{z}{a} A + (1-\mu)H \right] \quad (5)$$

$$\Delta_z = \frac{1.5 pa}{E_1} \quad (6)$$

Dengan:

$\Delta_z$  = lendutan vertikal, inch

$\mu$  = angka Poisson lapis permukaan

$A$  = konstanta yang diperoleh dari Tabel 2.2 (Yoder & Witczak, 1975), yang tergantung pada rasio  $z$  terhadap  $a$ , dan rasio jarak titik yang ditinjau secara radial terhadap  $a$

$H$  = konstanta yang diperoleh dari Tabel 2.2 (Yoder & Witczak, 1975), yang tergantung pada rasio  $z$  terhadap  $a$ , dan rasio jarak titik yang ditinjau secara radial terhadap  $a$

$E_1$  = modulus elastisitas lapis permukaan, sama dengan  $E_{ac}$ , psi

$a$  = radius pelat FWD, inch

$z$  = kedalaman posisi lendutan yang ditinjau, inch

Pada material *semi-infinite*, lendutan berkorelasi linier dengan besarnya beban yang bekerja. Lendutan pada struktur dua maupun tiga lapis dihitung secara teoritis oleh Burmister. Kemudian disimpulkan bahwa pada

struktur satu, dua, maupun tiga lapis, lendutan berkorelasi linier dengan beban yang bekerja.

### 3.4. Lendutan Standar

Lendutan yang diukur pada temperatur dan beban sebarang dapat dikoreksi dengan Persamaan 2 atau 3 untuk temperatur, dan Persamaan 4 untuk beban. Sehingga gabungan faktor koreksi menghasilkan lendutan pada kondisi standar seperti Persamaan 7.

$$\delta_{35C,4.08t} = FK_t \times FK_B \times \delta_{t,B} \quad (7)$$

Dengan:

$\delta_{35C,4.08t}$  = lendutan vertikal akibat beban dan temperatur standar, mm

$FK_t$  = koreksi lendutan sebagai faktor pengali hasil pengukuran lendutan - sehingga diperoleh lendutan pada temperatur standar

$FK_B$  = koreksi lendutan sebagai faktor pengali hasil pengukuran lendutan – sehingga diperoleh lendutan pada beban standar

$\delta_{t,B}$  = lendutan di permukaan dan di pusat beban FWD pada temperatur  $t$  dan beban  $B$ , mm

### 3.5. Desain tebal overlay

Hasil pengukuran lendutan yang dikoreksi akibat temperatur dan beban digunakan pada Persamaan 1 untuk memprediksi umur sisa perkerasan. Apabila strategi memperpanjang umur perkerasan adalah yang paling tepat, maka tebal lapis tambah (*overlay*) perlu didesain. Lapis tambah dikonstruksi dengan maksud mengurangi lendutan yang akan berdampak pada bertambahnya umur perkerasan. Untuk membedakan lendutan sebelum *overlay* dan setelah *overlay* ditetapkan notasi lendutan yang berturut-turut adalah  $\delta_1$  dan  $\delta_2$ . Perubahan lendutan disebabkan oleh tebal lapis tambah,  $H_o$  (cm), yang dihitung dengan Persamaan 8.

$$H_o = \frac{\ln(1.0364) + \ln(\delta_1) - \ln(\delta_2)}{0.0597} \quad (8)$$

Dengan:

$\delta_1$  = lendutan vertikal sebelum lapis tambah, mm

$\delta_2$  = lendutan vertikal setelah lapis tambah, mm

$H_o$  = tebal lapis tambah (*overlay*), cm

Tebal *overlay*,  $H_o$ , berlaku pada dua kondisi, yaitu campuran beraspal konstruksi *overlay* mempunyai modulus 2000 MPa pada temperatur 25°C, dan lokasi mempunyai temperatur perkerasan rata-rata tahunan (TPRT) 35°C. Apabila kedua syarat tersebut tidak terpenuhi, maka tebal *overlay* harus dikoreksi. Faktor koreksi akibat perbedaan modulus dihitung dengan Persamaan 9, dan faktor koreksi untuk perbedaan TPRT dihitung dengan Persamaan 10.

$$FK_{TBL} = 12.51(M_R^{-0.333}) \quad (9)$$

$$F_o = 0.5032(e^{0.0194 \times TPRT}) \quad (10)$$

Dengan:

- $M_R$  = modulus resilien campuran beraspal lapis tambah, MPa
- TPRT = temperatur rata-rata perkerasan tahunan, °C
- $FK_{TBL}$  = faktor koreksi tebal lapis tambah akibat modulus resilien beraspal lapis tambah tidak sebesar 2000 MPa pada temperatur 25°C
- $F_o$  = faktor koreksi tebal lapis tambah akibat lokasi mempunyai temperatur rata-rata perkerasan tahunan tidak 35°C

### 3.6 Model modulus campuran beraspal

Campuran beraspal konstruksi lapis tambah overlay Pedoman (Pd T-05-2005-B, 2005) mempunyai modulus 2000 MPa pada temperatur 25°C namun tidak ada penjelasan tentang frekuensi pembebanannya. Sehingga pedoman masih belum memberi karakteristik campuran beraspal yang digunakan.

Nilai modulus campuran beraspal diperoleh dari uji laboratorium atau diprediksi berdasarkan karakteristik komponen campuran. Alat uji modulus termasuk langka karena mahal harganya harga alat dan tingkat kesulitan pengujiannya. Prediksi modulus menjadi alternatif, berdasarkan penelitian mencari hubungan parameter campuran, temperatur dan frekuensi beban dengan modulus campuran. Beberapa model prediksi modulus seperti antara lain adalah seperti model the Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1982), model Shell (Shell, 1978), model NCHRP (NCHRP, 2004).

Dalam penelitian ini akan digunakan model the Asphalt Institute, seperti Persamaan 11. Persamaan 12 digunakan untuk memprediksi viskositas aspal berdasarkan nilai penetrasi. Persamaan 13 digunakan untuk memprediksi kadar aspal berdasarkan volume aspal efektif, sedangkan Persamaan 14 digunakan untuk memprediksi kadar aspal berdasarkan volume aspal total.

$$\log|E_{ac}| = 5.553833 + 0.028829 \left( \frac{P_{200}}{f_{0.17033}} \right) - 0.03476 (V_p) + 0.070377 (\eta) + 0.000005 \left[ t_p^{(1.3+0.49825(\log(f)))} P_{ac}^{0.5} \right] - 0.00189 \left[ t_p^{(1.3+0.49825(\log(f)))} \frac{P_{ac}^{0.5}}{f^{1.1}} \right] + 0.931757 \left( \frac{1}{f^{0.02774}} \right) \quad (11)$$

$$\eta = 29,508.2 (Pen^{-2.1939}) \quad (12)$$

$$P_{ac} = 0.483 (V_{be}) \quad (13)$$

$$P_{ac} = 0.484 (V_b) \quad (14)$$

Dengan:

- $E_{ac}$  = modulus campuran beraspal, psi
- $P_{200}$  = persentasi berat material lolos saringan 200

terhadap total berat agregat, %

- $f$  = frekuensi pembebanan, Hz
- $V_v$  = persentasi volume rongga terhadap volume total campuran, %
- $\eta$  = viskositas aspal pada 70°F, juta poise
- $T_p$  = temperatur rata-rata lapis beraspal, °F
- $P_{ac}$  = persentasi berat aspal terhadap total campuran, %
- $V_{be}$  = persentasi volume aspal efektif terhadap total campuran
- $V_b$  = persentasi volume aspal terhadap total campuran

### 3.7 Model modulus resilient lapis pondasi

Material berbutir mempunyai modulus resilien yang tergantung pada *state of the stress* di lokasi tersebut. Material berbutir sebagai lapis pondasi diprediksi dengan model the Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1982) seperti Persamaan 15. Konstanta  $k_1$  tergantung pada kualitas agregat lapis pondasi, dan dalam penelitian ini diambil = 5000. Persamaan ini menggunakan satuan psi untuk modulus, in untuk tebal lapis.

$$E_2 = 10.447 (h_1^{-0.471}) (h_2^{-0.041}) (E_1^{-0.139}) (E_3^{0.287}) (k_1^{0.868}) \quad (15)$$

Dengan:

- $E_2$  = modulus resilien lapis pondasi material berbutir, psi
- $h_1$  = tebal lapis permukaan, in
- $h_2$  = tebal lapis pondasi, in
- $E_1$  = modulus lapis permukaan, psi
- $E_3$  = modulus resilien lapis tanah dasar, psi
- $k_1$  = konstanta untuk lapis pondasi batu pecah

### 3.8. Modulus resilien lapis tanah dasar

Korelasi modulus resilien tanah dasar dengan CBR digunakan hubungan the Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1982) seperti Persamaan 16. Nilai CBR dalam persen, dan  $E_3$  dalam psi.

$$E_3 = 1500 (CBR) \quad (16)$$

Dengan:

- $E_3$  = modulus resilien lapis tanah dasar, psi
- CBR = daya dukung lapis tanah dasar yang diuji dengan *California Bearing Ratio*, %

### 3.9 KENPAVE

Untuk menghitung lendutan di permukaan akibat beban FWD (beban merata pada sebuah lingkaran) dapat digunakan berbagai perangkat lunak yang tersedia, seperti antara lain ELSYM5 versi DOS, Weslea versi

Windows, dan KENPAVE versi Windows. Program ELSYM5 versi DOS yang berdasarkan *multilayer elastic theory* yang dibuat oleh University of California at Berkeley (Ahlborn, 1972). Program ini berukuran kecil, sangat sederhana dan mudah digunakan walaupun berfungsi dengan DOS *environment*. Program KENPAVE versi Windows yang dibuat oleh Huang (2004) dari University of Kectucky. Sebenarnya semua program itu menghasilkan output yang sama karena mempunyai dasar teori yang sama, namun dalam penelitian ini digunakan program KENPAVE karena sekali eksekusi program mampu menghitung struktur perkerasan dengan 12 variasi modulus dan 12 konfigurasi beban.

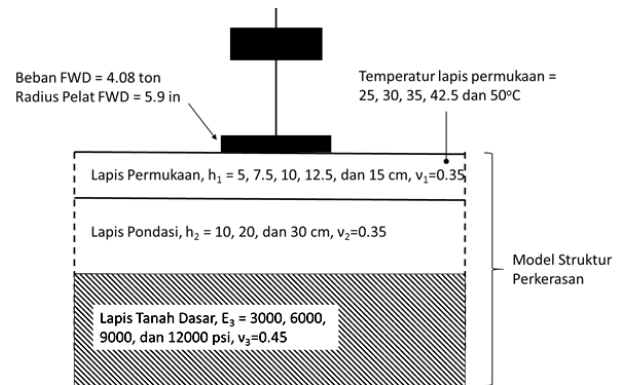
#### 4. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Perkerasan lentur dimodelkan sebagai perkerasan yang terdiri dari 3 lapis, yaitu lapis permukaan (campuran beraspal), lapis pondasi (batu pecah tanpa bahan pengikat), dan lapis tanah dasar. Tebal lapis permukaan dan pondasi, demikian pula dengan kualitas lapis tanah dasar divariasikan untuk mendapat informasi tentang pengaruh ketiganya akibat temperatur yang berbeda.
- Beban dimodelkan sebuah lingkaran dengan tekanan bidang kontak yang homogen sebagai model dari pelat FWD. Tekanan pada bidang kontak divariasikan – sebagai model variasi beban.
- Lentutan akibat beban standar pada beberapa temperatur. Lentutan dihitung pada perkerasan yang dimodelkan dengan menggunakan *multilayer elastic theory*.
- Lentutan akibat beban tidak standar pada temperatur standar. Lentutan dihitung pada perkerasan yang dimodelkan dengan menggunakan *multilayer elastic theory*.
- Hasil lentutan diperbandingkan dengan koreksi lentutan akibat temperatur dan beban.
- Evaluasi perbedaan umur perkerasan yang diprediksi dari lentutan yang diprediksi berdasarkan faktor koreksi Pedoman serta lentutan yang dihitung dengan *multilayer elastic theory*.
- Evaluasi tebal overlay yang dihitung berdasarkan lentutan yang diprediksi berdasarkan faktor koreksi Pedoman serta lentutan yang dihitung dengan *multilayer elastic theory*.

#### 5. Model Perkerasan

Perkerasan lentur dimodelkan 3 lapis dengan lapis permukaan terbuat dari campuran beraspal – tebal  $h_1$  (5 variasi tebal = 5, 7.5, 10, 12.5, dan 15 cm, dan 5 variasi modulus = 732,368 psi representasi pada temperatur 25°C, 492,813 psi (30°C), 320,352 psi (35°C), 157,598 psi (42.5°C), dan 71,987 psi (50°C)), lapis pondasi dari batu pecah – tebal  $h_2$  (3 variasi = 10, 20, dan 30 cm), dan



Gambar 2. Model struktur perkerasan dan beban FWD

lapis tanah dasar berupa lapis tanah yang telah distabilisasi dan dipadatkan (4 variasi = 3000, 6000, 9000, dan 12000 psi berdasarkan Persamaan 16 untuk CBR 2, 4, 6, dan 9%). Kombinasi struktur yang dianalisis berjumlah 300 buah. Poisson's ratio untuk lapis permukaan dan lapis pondasi diambil 0.35 dan untuk lapis tanah dasar 0.45.

Modulus campuran beraspal di atas dihitung dengan Persamaan 11 dengan asumsi nilai penetrasi aspal 60, kandungan filler 5%, persen rongga udara 4%, kadar aspal 4.77% volume, frekuensi pembebanan 10 Hz. Modulus lapis pondasi dihitung dengan Persamaan 15. Untuk lapis pondasi batu pecah,  $k_1$  5000.

Beban divariasikan 5 dan 10 persen di atas maupun di bawah beban standar. Beban standar pada alat uji FWD adalah 4.08 ton (40 kN) dengan radius pelat FWD 5.9 in. Dampak dari perbedaan beban itu ada pada berubahnya tekanan pada bidang kontak pelat FWD.

#### 6. Analisis

##### 6.1 Faktor koreksi lentutan akibat beban non standar

Beban mempengaruhi lentutan, demikian pula beban pada saat pengujian lentutan dengan FWD. Dalam analisis umur sisa (dengan Persamaan 1), lentutan pengukuran FWD dengan beban 4.08 ton (setengah dari beban sumbu standar). Pedoman Pd T-05-2005-B (2005) memberi Persamaan 4 sebagai koreksi lentutan akibat beban tidak standar. Faktor koreksi lentutan akibat beban adalah linier dan berbanding terbalik dengan rasio beban standar terhadap beban tidak standar.

Pada struktur satu lapis, lentutan akibat beban FWD dapat dihitung dengan Persamaan 5. Lentutan ditinjau pada pusat beban (maka jarak radial = 0, sehingga rasio jarak radial terhadap radius pelat FWD = 0), dan di permukaan perkerasan (maka  $z = 0$ ), menghasilkan hubungan yang proporsional antara lentutan dan tekanan pada pelat FWD (Persamaan 6). Hubungan beban dengan tekanan pada pelat FWD adalah seperti Persamaan 17. Sehingga Persamaan 6 menjadi Persamaan 18 - yang memperlihatkan lentutan mempunyai hubungan linier terbalik dengan tekanan pada pelat FWD.

$$B = (\pi a^2)p \quad (17)$$

$$\Delta_z = \frac{1.5 B}{\pi a E_1} \quad (18)$$

Dengan:

- $\Delta_z$  = lendutan vertikal, in
- B = beban, psi
- $E_1$  = modulus elastisitas lapis permukaan, sama dengan  $E_{ac}$ , psi
- a = radius pelat FWD, in
- p = tekanan pada pelat FWD, psi

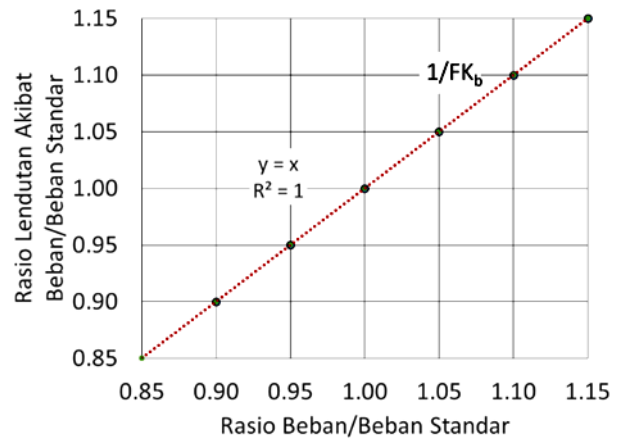
Sehingga faktor koreksi lendutan akibat beban tidak standar menjadi beban standar seperti Persamaan 4 sesuai secara teoritis, karena lendutan tersebut proporsional dengan beban atau liner terbalik dengan tekanan pada pelat FWD. Menurut Burmister hubungan ini berlaku juga pada struktur dua lapis maupun tiga lapis.

Walaupun demikian, perhitungan secara numerik berdasarkan analisis *multilayer elastic theory* dilakukan juga untuk mengkonfirmasi hal tersebut. Lendutan di pusat beban FWD dihitung pada berbagai tebal struktur perkerasan yang dianalisis. Lendutan dihitung akibat beberapa beban, dengan radius bidang kontak pelat FWD sebesar 5.9 in). Beban yang maksud adalah beban standar (4.08 ton) dan beban yang lebih besar maupun lebih rendah dari standar (yaitu  $\pm 5, 10, 15\%$ ). Agar dapat mengvaluasi koreksi lendutan akibat beban bukan standar - dihitung pula rasio lendutan akibat beban tidak standar terhadap beban standar. Hasil perhitungan disajikan dalam Gambar 2. Tampak pada gambar tersebut bahwa faktor koreksi lendutan yang diberikan oleh Persamaan 4 sama dengan hasil regresi hasil perhitungan rasio lendutan ini. Radius pelat FWD yang konstan (=5.9 in) tidak berpengaruh pada hasil linieritas lendutan pada pusat beban, seperti yang ditunjukkan pula oleh Persamaan 18.

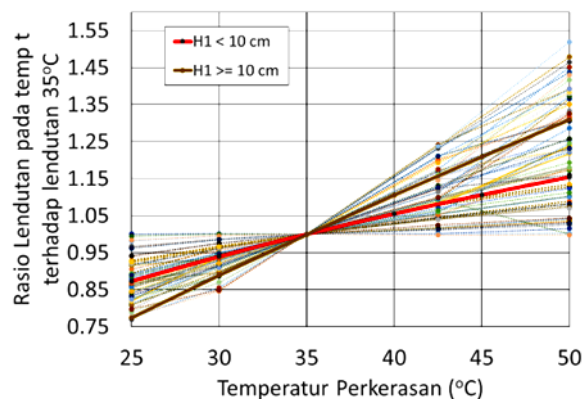
### 6.2 Lendutan akibat beban standar pada temperatur non standar

Evaluasi koreksi lendutan akibat temperatur tidak standar dilakukan dengan menghitung lendutan pada permukaan perkerasan dan di pusat beban FWD pada 60 macam tebal struktur perkerasan serta 5 temperatur (25, 30, 35, 42.5, dan 50°C). Sehingga terdapat 300 kondisi perkerasan yang berbeda. Tabel 1 adalah sebagian kecil hasil perhitungan lendutan, yaitu struktur perkerasan dengan tebal  $h_1 = 5$  cm,  $h_2 = 20$  cm dan modulus lapis tanah dasar,  $E_3$  3000, 6000, 9000 dan 12000 psi, pada 5 temperatur yang berbeda. Pada kolom terakhir tabel itu dihitung rasio lendutan dari masing-masing struktur terhadap lendutan pada temperatur standar (35°C). Pada temperatur 35°C, modulus lapis permukaan campuran beraspal,  $E_1 = 320,352$  psi (dihitung dengan Persamaan 11 sd 14).

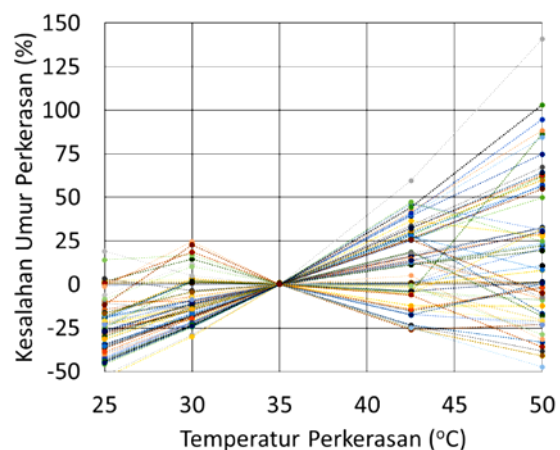
**Gambar 3** memperlihatkan rasio lendutan akibat temperatur tidak standar terhadap lendutan pada temperatur standar untuk semua struktur yang dihitung. Sebagai pembandingan, ditampilkan faktor koreksi



**Gambar 2.** Hubungan rasio beban dengan rasio lendutan pada pembebanan FWD



**Gambar 3.** Rasio lendutan temperatur tidak standar terhadap temperatur standar akibat pengujian FWD



**Gambar 4** Kesalahan prediksi umur perkerasan akibat koreksi Pd T-05-2005-B (2005)

lendutan menurut Pedoman Pd T-05-2005-B (2005), yaitu Persamaan 2 untuk  $h_1 < 10$  cm atau Persamaan 3 untuk  $h_1 \geq 10$  cm.

Berdasarkan hasil perhitungan lendutan pada 60 macam tebal struktur perkerasan memperlihatkan bahwa koreksi lendutan tidak memadai hanya berdasarkan dua persamaan pada Pedoman. Hasil yang serupa juga terjadi berdasarkan analisis Audina (2018). Setiap kombinasi

Tabel 1 Lentutan permukaan perkerasan akibat beban standar

$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$T_L$ (°C)	$E_1$ (psi)	$E_3$ (psi)	$E_2$ (psi)	Lentutan (in)	Rasio Lentutan <sup>1)</sup>
5	20	25	732,368	3,000	17,264	0.07434	0.919
5	20	30	492,813	3,000	18,242	0.07562	0.935
5	20	35	320,352	3,000	19,367	0.08088	1.000
5	20	42.5	157,598	3,000	21,374	0.08238	1.019
5	20	50	71,987	3,000	23,834	0.08422	1.041
5	20	25	732,368	6,000	21,064	0.04852	0.964
5	20	30	492,813	6,000	22,257	0.04959	0.985
5	20	35	320,352	6,000	23,630	0.05033	1.000
5	20	42.5	157,598	6,000	26,079	0.05103	1.014
5	20	50	71,987	6,000	29,079	0.05193	1.032
5	20	25	732,368	9,000	23,664	0.03706	0.967
5	20	30	492,813	9,000	25,003	0.03783	0.987
5	20	35	320,352	9,000	26,546	0.03832	1.000
5	20	42.5	157,598	9,000	29,297	0.03875	1.011
5	20	50	71,987	9,000	32,668	0.03929	1.025
5	20	25	732,368	12,000	25,701	0.03073	0.915
5	20	30	492,813	12,000	27,155	0.03132	0.933
5	20	35	320,352	12,000	28,831	0.03357	1.000
5	20	42.5	157,598	12,000	31,819	0.03414	1.017
5	20	50	71,987	12,000	35,480	0.03478	1.036

<sup>1)</sup> perbandingan lentutan pada temperatur t terhadap lentutan pada 35°C

tebal struktur perkerasan mempunyai hubungan rasio lentutan yang unik.

Evaluasi umur sisa yang dihitung berdasarkan lentutan yang dikoreksi menurut Pedoman dibandingkan dengan umur sisa berdasarkan lendutannya sesungguhnya (hasil perhitung *multilayer elastic theory*). Umur sisa yang dihitung pada 60 macam tebal struktur dan temperatur 35°C ditetapkan sebagai umur sisa yang benar atau standar. Umur sisa yang diperoleh pada pengukuran lentutan pada temperatur tidak standar dikoreksi berdasarkan faktor koreksi Pedoman. Evaluasi perbedaan umur sisa antara pengukuran lentutan pada temperatur standar dengan pengukuran lentutan pada temperatur tidak standar yang dikoreksi sesuai Pedoman ditampilkan pada Gambar 4.

Kesalahan prediksi umur berdasarkan masing-masing temperatur adalah seperti Tabel 2. Pengujian lentutan pada temperatur perkerasan yang lebih rendah dari temperatur standar mengakibatkan prediksi umur sisa perkerasan lebih rendah daripada yang seharusnya. Demikian pula sebaliknya, jika pengujian lentutan dilakukan pada temperatur perkerasan yang lebih tinggi daripada temperatur standar, akan menghasilkan prediksi umur sisa perkerasan yang lebih tinggi. Semakin besar perbedaan temperatur (antara temperatur pengukuran dan temperatur standar), akan semakin besar pula kesalahan prediksi yang dihasilkan. Berdasarkan analisis regresi diperoleh Persamaan 19 (dengan  $R^2 = 0.883$ ) sebagai alternatif yang lebih baik daripada Persamaan 2 dan 3.

$$FK_t = \frac{1}{0.00069(T_L - 35)(h_1)^{1.302609} + 1} \quad (19)$$

Dengan:

$FK_t$  = faktor koreksi lentutan akibat pengukuran lentutan pada temperatur t°C

$T_L$  = temperatur lapis permukaan, °C

$h_1$  = tebal lapis permukaan, cm

## 7. Kesimpulan

Berdasarkan semua perhitungan dan analisis di atas, maka dapat disimpulkan:

1. Lentutan FWD dengan beban tidak standar (bukan 4.08 ton), kemudian lendutannya dikoreksi dengan Pedoman Pd T-05-2005-B (2005) memberikan solusi yang benar secara teoritis maupun berdasarkan analisis numeriknya (*multilayer elastic theory*).
2. Lentutan FWD pada temperatur perkerasan yang tidak standar (bukan 35°C), kemudian dikoreksi dengan Persamaan 2 atau Persamaan 3 dari Pedoman Pd T-05-2005-B (2005) tidak menghasilkan solusi yang akurat. Pengukuran lentutan dilakukan lebih rendah daripada temperatur standar, maka umur sisa perkerasan yang diprediksi akan lebih kecil daripada yang seharusnya. Demikian pula sebaliknya, jika pengukuran dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur standar, maka umur sisa perkerasan akan lebih besar daripada yang seharusnya.
3. Alternatif koreksi lentutan yang lebih baik adalah Persamaan 19. Prediksi umur sisa perkerasan menggunakan Persamaan 19 memberikan hasil

Tabel 2. Kesalahan prediksi umur pada temperatur tertentu

Temperatur <sup>*)</sup> (°C)	Pedoman Pd T-05-2005-B		Alternatif Model – Persamaan 18	
	Rata-rata (%)	Deviasi Standar (%)	Rata-rata (%)	Deviasi Standar (%)
25	-23.8	16.5	-4.6	21.5
30	-9.4	13.6	-1.0	14.3
42.5	11.3	21.6	2.1	18.8
50	19.1	41.3	3.4	33.4

<sup>\*)</sup> temperatur perkerasan pada saat pengujian FWD

prediksi umur sisa yang lebih baik (Tabel 2) daripada hasil Pedoman (Pd T-05-2005-B, 2005).

## Daftar Pustaka

- Ahlborn, G. (1972). *ELSYM5, Computer Program for Determining Stresses and Deformations in Five Layer Elastic Systems*. Berkeley, CA: University of California.
- Asphalt Institute. (1982). *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th edition, Research Report 82-2*. College Park, MD: Asphalt Institute.
- Audina, P. (2018). Evaluasi Faktor Koreksi Lendutan. *Skripsi*. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan - Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil.
- Heukelom, W., & Klomp, A. (1962). *Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During*. Ann Arbor, MI: Proceedings of International Conference. on the Structural Design of Asphalt Pavements.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design, 2nd Ed*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc.
- NCHRP. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 2 Design Inputs, Chapter 2 Material Characterization*. Washington, DC: TRB.
- Pd T-05-2005-B. (2005). *Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- Shell. (1978). *Shell Pavement Design Manual - asphalt pavements and overlays for road traffic*. London: Shell International Petroleum Company.
- Yoder, E. J., & Witzczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design, 2nd Ed*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Zamhari, K. A., James, E. M., & Jameson, G. (2017). *Manual Desain Perkerasan jalan - No. 02/M/BM/2017, edisi 2*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.