

## Penghitungan Tebal Setara Metode Boussinesq-Exel dan FWD-ELMOD pada Perkerasan Lentur

(Equivalent Thickness Calculation Methods Boussinesq-Exel and FWD-ELMOD on Flexible Pavement)

SENTOT HARDWIYONO

### ABSTRACT

Calculating the Flexible Pavement System (FPS) response has initiated by Boussinesq, Burmister, Huang and more scientists around the world. Determining modulus elasticity each stratum FPS very important to note to designing the Flexible Pavement. The purpose of this study is to determine the elastic modulus of each layer in the profile Flexible Pavement Systems (FPS) with a thickness equivalent method Boussinesq-Exel and FWD-ELMOD. Tests were run on the Soekarno-Hatta Cikampek-Purwakarta-Bandung and West Java highways, Indonesia. The test results showed a good correlation between the modulus of each layer in the FWD testing with those of Boussinesq-Exel test.

**Keywords:** FWD-ELMOD, Boussinesq-Exel, flexible pavement system, deflection

### PENDAHULUAN

Parameter yang penting pada Sistem Perkerasan Lentur (SPL) antara lain adalah modulus elastis linier perkerasan ( $E$ ), modulus elastis non linier tanah dasar ( $E_s$ ), rasio Poisson ( $\mu$ ), tegangan ( $\sigma$ ), regangan ( $\epsilon$ ), lendutan ( $d$ ), nilai struktur kritik (*critical structure value*), dan keadaan lingkungan (*environmental condition*) (Huang, 2004).

Untuk memenuhi penyelenggaraan, pemulihan dan perbaikan SPL diperlukan suatu metode pengujian yang sesuai. Pengujian berdasarkan metode lendutan (*deflection method*) yang menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) dapat memenuhi untuk keperluan ini. Metode ini telah digunakan secara meluas di seluruh dunia seperti Denmark (Berg et al., 1986; Ullidz & Stubstand, 1985), Inggris (Brown et al., 1986), Belanda (Humer et al., 1986; Molennar & Beuving, 1986), Jepang (Miura & Tube, 1977), Australia (Ullidz, 1984), Indonesia (DPU, 1993) dan Malaysia (JKR, 1994) hingga sekarang. Pengujian dengan menggunakan alat FWD telah memberikan hasil yang baik untuk pengujian perkerasan lentur (AASHTO, 1993; Asphalt Institute,

1981; FHWA, 2003; Huang, 2004; Kosasih, 2003; Shell, 1978). Penghitungan dan analisis lendutan pada pengujian FWD telah dijalankan menggunakan metode element terhingga stokastik (Stolle & David, 2002). Kini metode FWD untuk menilai kondisi SPL semakin meluas digunakan (Choi et al, 2010; Gedafa et al., 2009; Tawfiq, 2003; TxDOT, 2008).

Dalam penelitian ini akan dilakukan penghitungan tebal perkerasan dengan menggunakan metode Boussinesq-EXEL untuk melihat tegangan dan regangan yang terjadi di kedalaman titik perkerasan yang dikehendaki dan melihat korelasinya dengan hasil perhitungan menggunakan metode FWD.

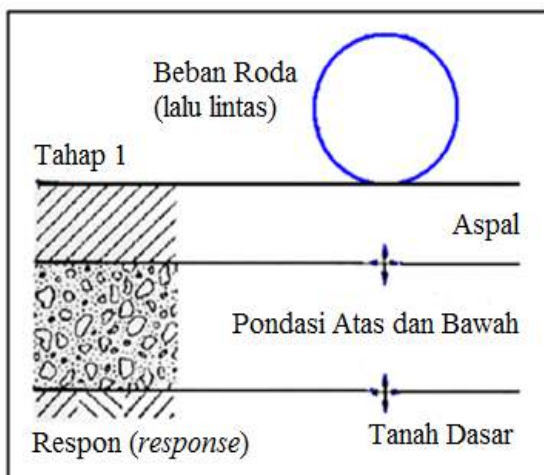
### *Sistem Perkerasan Lentur*

Sistem Perkerasan Lentur (SPL) didesain, dibuat dan selanjutnya digunakan untuk menanggung beban lalu lintas dalam jangka waktu yang diharapkan. Setelah selesai dibuat kondisi SPL dapat dianggap baik jika memenuhi semua persyaratan desain. Selanjutnya perkerasan akan mengalami penurunan kualitas, yaitu respon dan performa yang terus berkurang hingga batas akhir waktu pelayanannya (Kosasih, 2003).

Pada dasarnya terdapat tiga metode desain SPL, yaitu secara empirik (*empirical*), mekanik (*mechanistic*) dan gabungan kedua metode. Secara umum metode empirik menggunakan persamaan, tabel dan gambar untuk menilai keadaan SPL. Metode mekanik biasa menggunakan komputer dalam menghitung dan mendesain keadaan SPL. Gabungan kedua metode dinamakan metode mekanik-empirik (*mechanistic-empirical*) yang banyak digunakan untuk penyelenggaraan, pemulihan dan perbaikan SPL (Huang, 1993; Ullidtz, 1987).

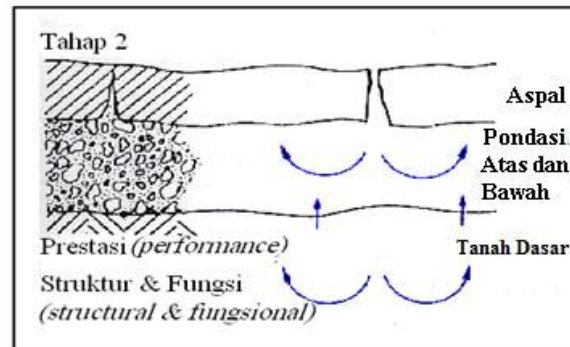
Beban lalu lintas yang bekerja pada SPL direspon oleh perkerasan yang melibatkan mampatan tegangan (*compressive stresses*), regangan tensil (*tensile strains*) dan lendutan (*deflection*). Performa perkerasan juga melibatkan fungsi pelayanan dan keadaan struktur SPL. Pengetahuan perilaku pergerakan lalu lintas, sentuhan roda, modulus, rasio Poisson, tegangan, regangan, redaman, suhu dan keadaan lingkungan diperlukan untuk menghitung respon dan performa SPL.

Metode mekanik-empirik untuk desain SPL memerlukan dua tahap penghitungan. Tahap pertama menghitung respon perkerasan yang berupa tegangan, regangan dan lendutan kritis setiap lapisan SPL dengan menggunakan analisis metode mekanik yang berdasarkan prinsip-prinsip teori elastis. Seterusnya respon perkerasan ditunjukkan pada Gambar 1.



GAMBAR 1. Respon SPL (Ullidtz, 1987)

Tahap kedua (Gambar 2) meramal performa keadaan struktur dan fungsi perkerasan di masa depan. Ini adalah fungsi beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan yang ada.



GAMBAR 2. Performa SPL (Ullidtz, 1987)

Respon perkerasan dipengaruhi oleh beban lalu lintas dinamik yang bergerak, redaman dan sentuhan roda pada permukaan perkerasan. Bahan perkerasan umumnya anisotropis dan butirannya heterogen yang perilakunya dapat dimodelkan secara liquid Newtonian dan solid Hookean (Ullidtz, 1998).

Metode yang paling umum untuk menggambarkan sifat respon dalam suatu struktur perkerasan (*half space yang homogen*) adalah melalui pondasi atas Boussinesq (van Cauwelaert, 1993).

Dalam desain perkerasan lentur, Burmister (1943, 1944) memberikan sumbangan penting melalui penyelesaian penghitungan SPL untuk dua dan tiga lapisan. Odemark (1949) memperkenalkan suatu cara yang memungkinkan sistem banyak lapisan (*multi layers*) diubah ke dalam suatu lapisan takterhingga, dengan memanfaatkan persamaan Boussinesq. Seterusnya, berdasarkan penyelesaian analisis Burmister (1943, 1944), banyak penyelesaian penghitungan dalam bentuk grafik dan tabel tegangan dan perubahan bentuk pada sistem dua dan tiga lapisan SPL telah diperkenalkan oleh Acum & Fox (1951), Huang (1969) dan Peattie (1962). Penyelesaian penghitungan ini dapat dibuat melalui analisis komputer yang menghasilkan perangkat lunak seperti ELMOD (Ullidtz, 1998). Hampir semua perangkat lunak yang dibuat menganggap bahwa bahan bersifat elastik linier, tetapi ada pula pada batas tertentu yang mempertimbangkan pengaruh non elastik (Irwin, 1991). Beban tunggal yang dikenakan termasuk dipertimbangkan dan letaknya bersimetri dengan satu baris normal pada permukaan perkerasan (Loannides et al, 1998). Walaupun teori lapisan Burmister (1943, 1944) berasaskan bahan elastik linier, dapat juga digunakan untuk analisis bahan non linier elastik dengan menggunakan kesetaraan elastik dan non elastik.

### Alat Falling Weight Deflectometer

Pengujian alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) mudah dilaksanakan dengan hasil yang baik (Huang, 1993; Park & Kim, 2003; Tawfiq et al, 2000; Xu et al, 2002; Zhou, 2000).

Sebagai beban gandar standar lalulintas adalah 8,2 Ton (AASHTO 1993; Puslitbang 2003) dan beban setengah gandar standar 4,1 ton atau 41 kN juga bisa digunakan. Nilai tekanan P (dalam FWD) adalah sama dengan 580 kPa yang diperoleh dari beban 41 kN yang dikenakan pada permukaan perkerasan dan terus menyebar hingga lapisan tanah dasar melalui plat baja bulat (luas =  $1/4 \pi D^2$  dan D adalah garis tengah bernilai 300 mm). Nilai P ini adalah level tegangan puncak yang juga digunakan oleh banyak negara (Ullidtz dan Peattie, 1980).

Deflector adalah alat menyerupai geofon (*geophone*) perekam yang dipasang pada alat FWD. Geofon pertama dipasang berdekatan dengan plat beban jatuh dan seterusnya 7 hingga 9 geofon dipasang berjajar hingga ujung batang pengukur FWD (Dynaflect, 2001; WSDOT, 2009).

### Penghitungan Balik Perangkat Lunak ELMOD pada Pengujian FWD

Analisis modulus perkerasan menganggap bahwa SPL mempunyai lapisan tipis, sederhana dan tebal (Linda, 1999). Anggapan tipis, sederhana, tebal dan banyak lapisan pada struktur perkerasan sangat mempengaruhi hasil modulus perkerasan yang didapat. Perangkat lunak lain seperti PADAL, ELSYM5, BISTRO, CHEVRON, MODCOMP, BOUSDEF, ILLI-PAVE, EFROMD, dll yang dihasilkan oleh banyak peneliti sebelum ini (Fwa & Rani 2005; Huang 1993; Uzan et al. 1989; Zhou et al. 1992) semuanya bertujuan menghitung modulus lapisan perkerasan *in situ* menggunakan analisis penghitungan balik dari lendutan hasil pengujian FWD.

Perubahan suhu berpengaruh pada lapisan aspal (AASHTO 1993; Ehrola et al. 1990; Shao et al. 1997). Pengujian yang sama juga dilakukan oleh Park et al. (2001) yang membuat model koreksi suhu keadaan normal dari pengukuran lendutan untuk rujukan suhu perkerasan.

Kekuatan tanah dasar dipengaruhi oleh musim, hal ini telah dikaji oleh AASHTO (1993) (Chen et al, 2000). Alat FWD sangat sensitif dengan keadaan lingkungan seperti musim, suhu dan curah hujan. Oleh karena itu pengujian *in situ* perlu dilakukan lebih dari satu kali untuk mendapatkan hasil pengujian FWD yang paling baik (Watson et al, 2004)

### Batas Toleransi Beban pada Pengujian FWD

Toleransi maksimum lendutan d tidak boleh melebihi 2%. Nilai daya maksimum pengujian alat FWD ditunjukkan dalam Persamaan (1).

$$P = \sqrt{2mghc} \quad (1)$$

dengan:

P : nilai daya maksimum dari beban (kPa)

m : berat beban yang dijatuhkan (kg)

g : gravitasi ( $m/s^2$ )

h : ketinggian jatuh (m)

c : konstanta pegas (N/m)

### Jarak Geofon pada Pengujian FWD

Jarak geofon ditentukan berdasarkan tebal keseluruhan perkerasan (Danida, 1990) yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

### Tinjauan Parameter Pada Pengujian Fwd-Elmod

ELMOD adalah satu perangkat lunak komputer yang digunakan untuk menilai modulus elastis setiap lapisan perkerasan dan tanah dasar melalui analisis data lendutan pengujian FWD.

TABEL 1. Jarak geofon untuk tebal keseluruhan perkerasan (Danida, 1990)

Tebal seluruh lapisan perkerasan (mm)	Jarak geofon yang digunakan (mm)						
< 500 (nipis)	0	200	300	450	600	900	1200
300 – 700 (normal)	0	300	600	750	900	1200	1500
>700 (tebal)	0	300	600	900	1200	1500	1800
Perkerasan lentur	0	200	300	450	600	900	1500

Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk mendesain perkerasan baru, tebal lapisan tambah (*overlay design*) atau sisa waktu pelayanan perkerasan. Persamaan dan parameter yang digunakan dalam ELMOD untuk menilai lendutan pengujian FWD ialah persamaan Boussinesq (1885) dan persamaan ketebalan setara metode Odemark (1949), pengaruh lingkungan, pengaruh keretakan lapisan aspal, batas tegangan-regangan dalam lapisan perkerasan dan kekuatan tanah dasar.

#### Lendutan Permukaan ( $d_0$ ) dan Modulus Elastis Permukaan ( $E_0$ )

Beban yang dikenakan pada permukaan perkerasan terbagi seragam pada pusat beban dinyatakan dalam persamaan lendutan permukaan (Persamaan 2) yang berdasarkan hukum Hooke, persamaan modulus Young dan persamaan Boussinesq. Lendutan pada pusat beban dan jarak  $r$  ditunjukkan dalam Persamaan (2) dan (3).

$$d_0(0) = [2(1 - \mu^2)] \left[ \frac{a \cdot \sigma_0}{E_0(0)} \right] \quad (2)$$

$$d_0(r) = [1 - \mu^2] \left[ \frac{\sigma_0 \cdot a^2}{(r \cdot E_0(r))} \right] \quad (3)$$

Lendutan di pusat plat beban adalah lendutan permukaan perkerasan umumnya lendutan maksimum *in situ*. Penghitungan lendutan ini dapat dilakukan menggunakan Persamaan (2). Lendutan yang terjadi pada jarak  $r$  dari pusat beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (3). Modulus elastis permukaan ( $E_0$ ) merupakan modulus rata-rata tertimbang pada setengah bagian (*half space*). Modulus elastik permukaan ( $E_0$ ) ini dapat dihitung dari lendutan permukaan ( $d_0$ ) menggunakan persamaan Boussinesq. Modulus ( $E_0$ ) adalah modulus elastik keseluruhan dengan anggapan bahwa perkerasan terdiri dari satu lapisan bahan saja. Persamaan modulus elastis permukaan ( $E_0$ ) pada pusat beban dan pada jarak  $r$  dari pusat beban ditunjukkan dalam Persamaan (4) dan (5).

$$E_0(0) = [2(1 - \mu^2)] \left[ \frac{a \cdot \sigma_0}{d_0(0)} \right] \quad (4)$$

$$E_0(r) = [1 - \mu^2] \left[ \frac{\sigma_0 \cdot a^2}{(r \cdot d_0(r))} \right] \quad (5)$$

dengan:

$E_0(r)$  = modulus elastis permukaan pada jarak  $r$  dari pusat beban

$\mu$  = rasio Poisson (biasanya = 0,35)

$\sigma_0$  = tegangan di bawah plat pembebanan

$a$  = jari-jari plat pembebanan

$d(r)$  = lendutan pada jarak  $r$

Lendutan  $d_1, d_2, d_0(0)$  dan  $d_0(r)$  pada Persamaan (2), (3), (4) dan (5) adalah data yang bisa didapatkan dari lendutan perkerasan pengujian FWD. Modulus permukaan perkerasan  $E_0(0)$  pada lendutan ( $d_1$ ) dapat dihitung menggunakan Persamaan (3). Enam modulus permukaan perkerasan yang lain yaitu  $E_0(r_2)$  pada lendutan ( $d_2$ ),  $E_0(r_3)$  pada lendutan ( $d_3$ ),  $E_0(r_4)$  pada lendutan ( $d_4$ ),  $E_0(r_5)$  pada lendutan ( $d_5$ ),  $E_0(r_6)$  pada lendutan ( $d_6$ ) dan  $E_0(r_7)$  pada lendutan ( $d_7$ ) dihitung menggunakan Persamaan (4). Modulus permukaan perkerasan  $E_0$  merupakan modulus rata-rata tertimbang keseluruhan SPL yang dihitung dari lendutan permukaan ( $d_0$ ) menggunakan persamaan Boussinesq (Ullidtz 1987). Ini berarti  $E_0$  adalah modulus elastis yang sebenarnya secara keseluruhan dengan anggapan bahwa perkerasan hanya mempunyai bahan satu lapisan saja.

#### METODE PENELITIAN

##### Prosedur Pengujian FWD di Lapangan

Tujuan utama pengujian FWD *in situ* adalah untuk mendapatkan lendutan perkerasan yang terjadi.

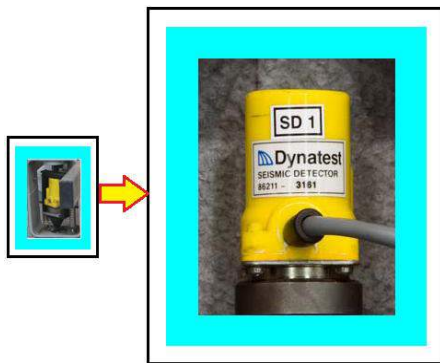
Alat *Falling Weight Deflectometer* ditunjukkan pada Gambar 3.



GAMBAR 3. *Falling Weight Deflectometer* jenis Dynatest 8000 yang digunakan dalam pengujian

Berikut ini dijelaskan semua peralatan yang digunakan dalam pengujian FWD.

- a. Berat beban jatuh untuk mendapatkan lendutan perkerasan yang dikenakan pada SPL ialah 4,1 Ton. Beban dikenakan ke atas plat bulat berjari-jari 150 mm dan menghasilkan tegangan normal permukaan perkerasan ( $\sigma_0$ ) 580 kPa. Beban ini hampir setengah dari beban gandar roda belakang kendaraan standar. Untuk melihat pengaruh beban pada SPL berat beban pengujian FWD dapat disesuaikan menurut kekuatan SPL.
- b. Geofon dipasang pada batang ukur FWD seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4 (Dynatest, 2008).



GAMBAR 4. Geofon (Dynatest, 2008)

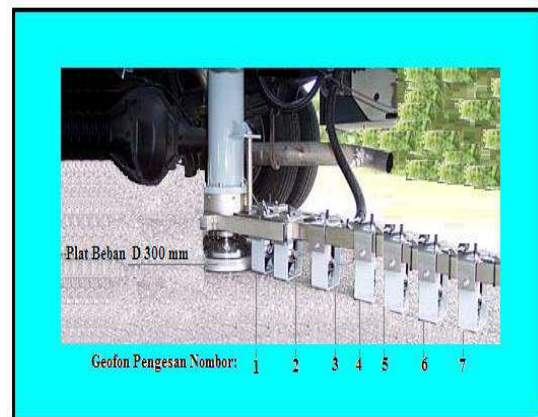
- c. Susunan geofon dalam pengukuran lendutan perkerasan di lapangan ditunjukkan dalam Gambar 5.
- d. Suhu udara dan suhu perkerasan senantiasa direkam saat pengujian FWD dijalankan *in situ*. Data suhu ini diperlukan bagi analisis lanjutan yang berkorelasi dengan faktor koreksi lendutan dan modulus lapisan perkerasan aspal.
- e. Musim dalam satu tahun dipertimbangkan untuk mendapatkan modulus dan batas tegangan, regangan tanah dasar, lapisan pondasi bawah dan lapisan pondasi atas

dalam analisis lanjutan menggunakan perangkat lunak ELMOD.

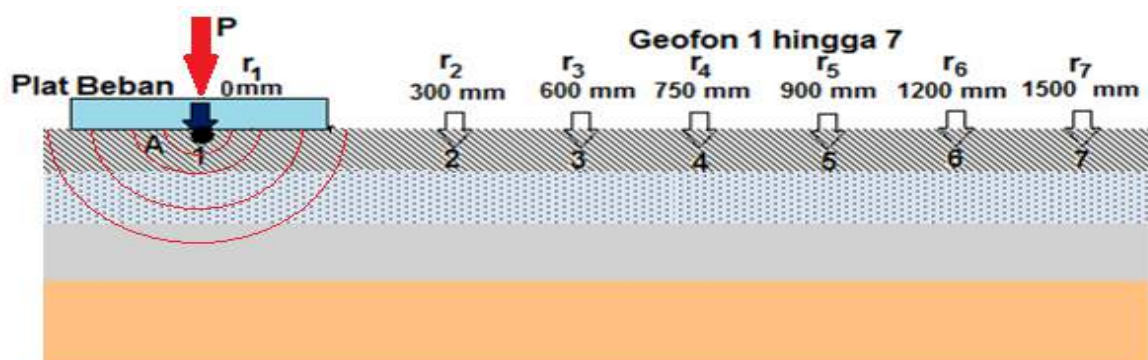
- f. Data pengujian cor drill untuk mendapatkan tebal setiap lapisan bahan perkerasan dan data desain perkerasan yang ada digunakan untuk pertimbangan dalam analisis tebal dan modulus lapisan bahan perkerasan menggunakan perangkat lunak ELMOD.

#### Pemasangan Jarak Geofon pada Alat FWD

Dalam penelitian ini dipasang tujuh geofon pada alat FWD. Seluruh lapisan SPL yang diuji mempunyai ketebalan lapisan bahan aspal antara 15 cm hingga 20 cm, pondasi atas antara 15 cm hingga 20 cm, pondasi bawah antara 30 cm hingga 40 cm dan tanah dasar tebal tak terhingga (tebal perkerasan antara 650 hingga 700 mm) dan masuk dalam penilaian perkerasan normal. Pengaturan jarak ketujuh geofon perekam lendutan dalam pengujian FWD untuk STBL normal diletakkan dalam kedudukan  $r_1 = 0$  mm,  $r_2 = 300$  mm,  $r_3 = 600$  mm,  $r_4 = 750$  mm,  $r_5 = 900$  mm,  $r_6 = 1200$  mm, dan  $r_7 = 1500$  mm dari pusat beban yang ditunjukkan dalam Gambar 6.



GAMBAR 6. Susunan plat beban dan geofon (Dynatest, 2008, disesuaikan)



GAMBAR 5. Susunan geofon dalam pengujian FWD di lapangan

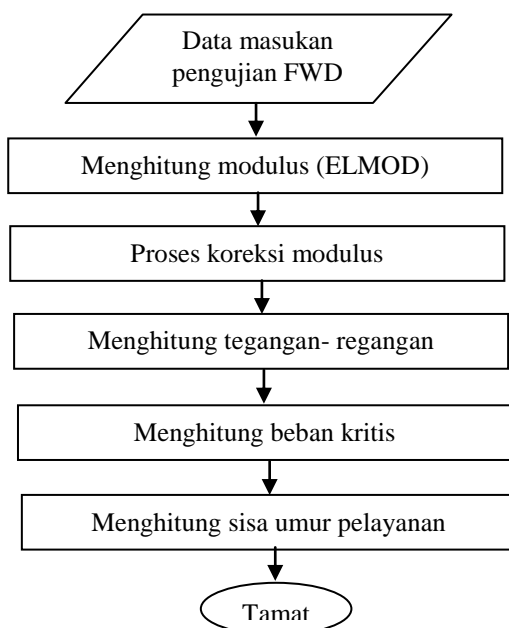
Seterusnya, lendutan perkerasan yang dihasilkan pada pengujian FWD direkam oleh geofon  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$  dan  $d_7$  sebagai data asal (*raw data*) dan disimpan dalam CD atau komputer atau kedua-duanya untuk penggunaan analisis lanjutan (Danida, 1990).

Satu titik tegangan dalam bahan tidak linier lapisan perkerasan dapat dihitung melalui data lendutan yang berada tepat dibawah geofon pertama. Metode ini valid apabila digunakan untuk satu titik dalam satu lapisan perkerasan (Huang 1993).

#### Metode Perhitungan ELMOD dalam Pengujian FWD

Perangkat lunak ELMOD memasukkan metode analitik dan empirik yang digunakan dalam pengujian FWD. Bagian analitik digunakan untuk menghitung respon perkerasan dalam bentuk tegangan, regangan atau lendutan. Bagian empirik digunakan untuk menghitung performa perkerasan dalam bentuk keretakan, jejak roda, perubahan bentuk dan dapat juga digunakan untuk menghitung sisa waktu pelayanan perkerasan untuk perbaikan di masa depan.

Penghitungan menggunakan perangkat lunak ELMOD dilakukan dalam beberapa langkah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.



GAMBAR 7. Bagan alir penghitungan menggunakan perangkat lunak ELMOD

#### Penghitungan Modulus Lapisan Perkerasan Menggunakan Metode FWD

Lendutan dalam SPL dipengaruhi oleh susunan dan tebal lapisan perkerasan, sifat bahan perkerasan (modulus elastis dan rasio Poisson), susunan beban roda kendaraan dan keadaan lingkungan waktu pengujian FWD dijalankan. Gambar lendutan ( $d_i$ ) versus jarak ( $r$ ) dari pengujian FWD *in situ* dapat memberikan informasi untuk penghitungan modulus elastis  $E$  setiap lapisan perkerasan dan tanah dasar. Banyak metode dapat digunakan untuk menghitung modulus elastis  $E$  setiap lapisan perkerasan. Antara lain adalah metode penghitungan balik (TRB 1991; Kosasih 2003) untuk mendapatkan modulus elastis ( $E$ ) setiap lapisan perkerasan. Metode ini membuat penghitungan kurva teori yang dioptimalkan supaya mendekati data kurva lendutan dari pengujian FWD untuk perkerasan *in situ*.

Lendutan juga dapat dihitung menggunakan metode tebal setara dan persamaan Boussinesq dimana tanah dasar dianggap bahan yang elastis tak linier menggunakan Persamaan (6) (ELMOD):

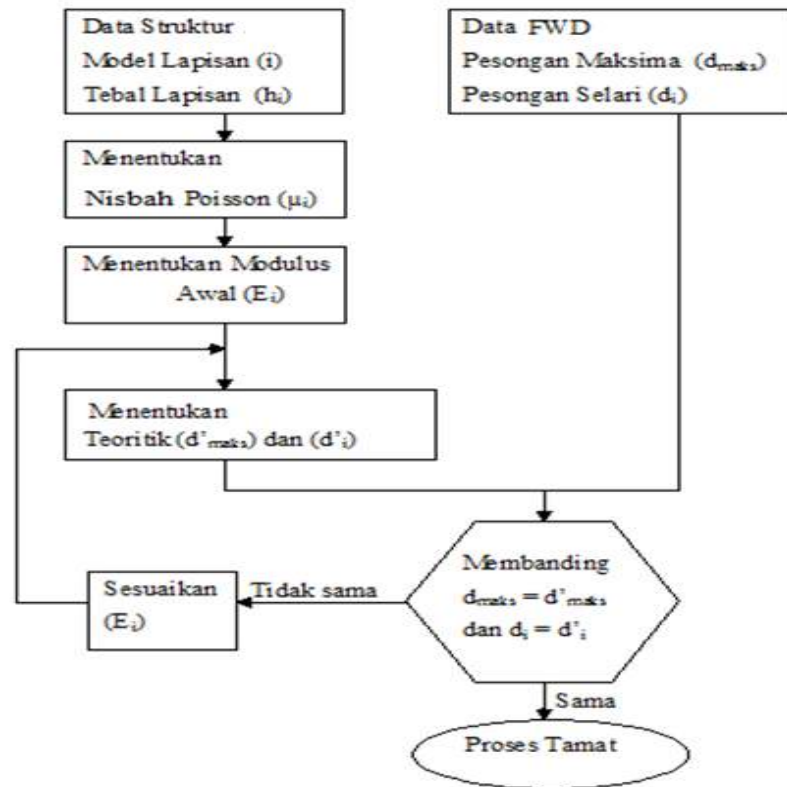
$$E_m = C_0 * (S_1/0,1)^N \quad (6)$$

dengan:

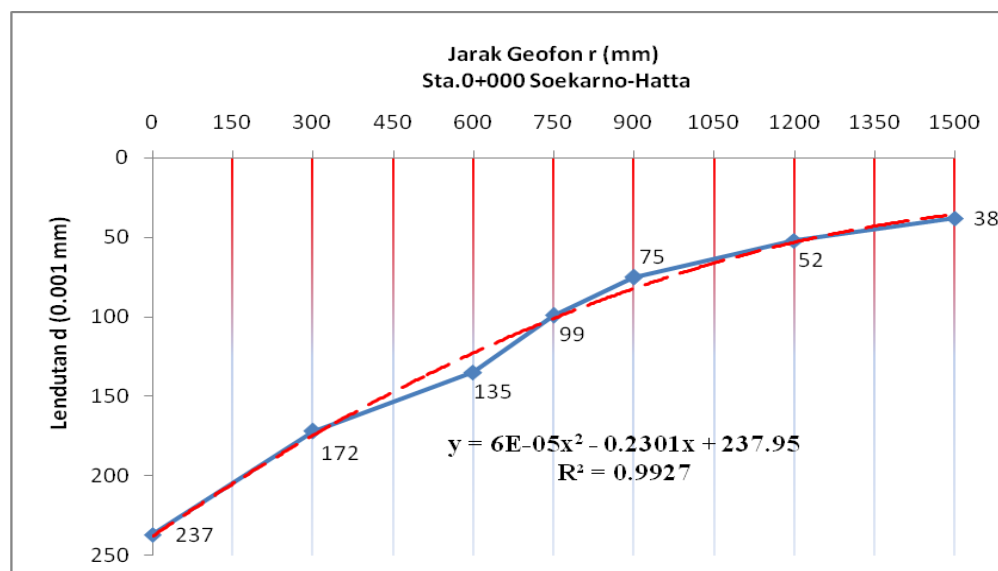
- $E_m$  = modulus tanah dasar gabungan
- $S_1$  = tegangan pada permukaan bagian atas tanah dasar
- $C_0, N$  = bilangan konstan dan nilai  $N \leq 0$

Iterasi dilakukan hingga mendapatkan lendutan teori yang sama atau mendekati lendutan pengujian FWD *in situ*. Bagan alir penghitungan balik untuk mendapatkan modulus elastis setiap lapisan perkerasan ditunjukkan dalam Gambar 8. Gambar 9 adalah satu contoh lendutan ( $d_i$ ) versus jarak geofon ( $r_i$ ) pada Sta.0+000 jalan raya Soekarno-Hatta. Pada gambar ini ditunjukkan bahwa garis penuh ialah lendutan pengujian FWD (lendutan lapangan) dan garis putus-putus adalah persamaan matematik lendutan teori yang mendekati lendutan lapangan.

Penumpuan persamaan lendutan teori dengan lendutan lapangan didapatkan pada  $r_1 = 0$  atau di pusat beban dan pada:  $r_2 = 300$  mm,  $r_4 = 750$  mm,  $r_6 = 1200$  mm dan  $r_7 = 1500$  mm. Titik penumpuan ini membantu proses iterasi pada ELMOD untuk mendapatkan modulus SPL.



GAMBAR 8. Bagan alir proses penghitungan balik



GAMBAR 9. Lendutan (d) versus jarak geofon (r)

#### Pengambilan Data Lapangan Alat FWD

Dalam kajian ini ada tiga alat utama dalam sistem pengujian pengambilan data lapangan yang menggunakan alat FWD Dynatest 8000 dengan 7 geofon, plat beban bulat D 300 mm, prosesor 9000 dan satu unit komputer yang dipasang perangkat lunak ELMOD dan satu

unit pencetak. Data yang didapatkan dari pengujian FWD dapat terus dihitung menggunakan perangkat lunak ELMOD untuk mendapatkan modulus setiap lapisan bahan perkerasan.

Nilai tekanan P beban setengah gandar standar 4,1 Ton dapat menyebabkan tegangan permukaan ( $\sigma_0$ ) perkerasan bernilai 580 kPa.

Apabila tegangan permukaan bernilai 580 kPa dikehendaki, persamaan empirik untuk mendapatkan tinggi ( $h$ ) jatuh dari berat beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (7) dan Tabel 2.

$$h = \left( \frac{\sigma}{k} \right)^2 \quad (7)$$

dengan:

$h$  = tinggi jatuh berat beban FWD, mm

$\sigma$  = tegangan permukaan yang dikehendaki, kPa

$k$  = koefisien empirik

Jika tegangan permukaan perkerasan bernilai 580 kPa dikehendaki merujuk kepada Tabel 2. untuk plat baja D 300 mm dan berat beban 200 kg didapatkan tegangan permukaan berada diantara 425-950 kPa. Seterusnya dengan menggunakan Persamaan (7) tinggi jatuh  $h \approx 135$  mm bisa didapatkan. Tegangan permukaan perkerasan yang seterusnya bisa didapatkan dari Persamaan (7) dan Tabel 2.

TABEL 2. Hubungan beban plat baja, tegangan permukaan  $\sigma$  dan koefisien  $k$

Beban Plat (kg)	$\sigma$ (kPa)		$k$	
	D 300 mm	D 450 mm	D 300 mm	D 450 mm
350	850-	380-750	86	38
200	1700	190-430	50	22
100	425-950	95-215	25	11
50	210-480	45-105	13	5.8
	100-240			

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Penghitungan dan Penilaian Modulus Elastis Menggunakan ELMOD*

Penghitungan modulus menggunakan ELMOD mengambil model perkerasan empat lapisan. Hasil penghitungan modulus elastis lapisan perkerasan beraspal ( $E_1$ ), lapisan pondasi atas (batu pecah) ( $E_2$ ), lapisan pondasi bawah (pasir batu) ( $E_3$ ) dan lapisan tanah dasar (tanah baik) ( $E_4$ ) menggunakan ELMOD pada kedua jalan raya berdasarkan prosedur pengujian FWD ditunjukkan dalam Tabel 3 dan 4.

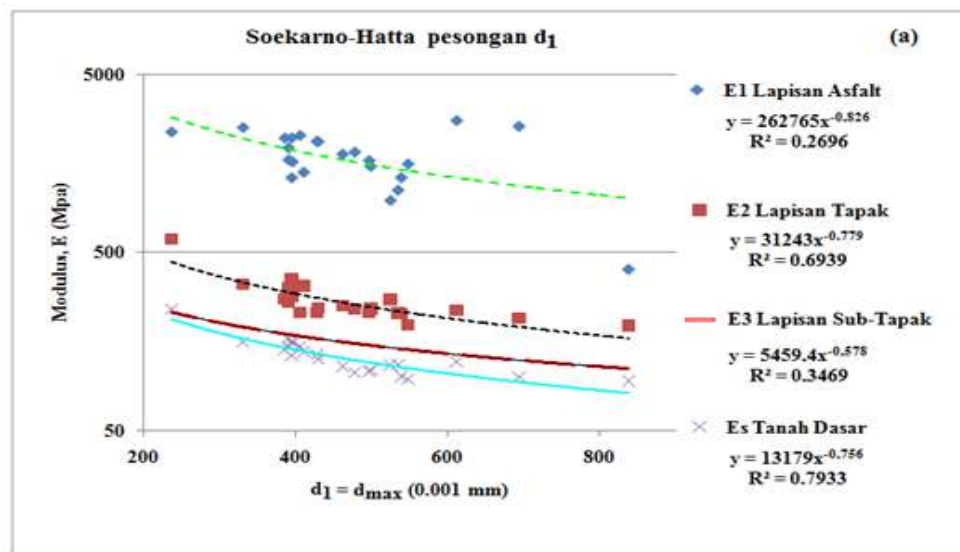
TABEL 3. Lendutan dan Modulus elastis SPL Soekarno-Hatta

Ttk	Sta	Pengujian FWD Soekarno - Hatta								Modulus Elastik Evaluasi ELMOD				
		$(\sigma)$ In situ (kPa)	Lendutan ( 0.001 mm)								$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
											AC 150 mm	Batu pecah (200 mm)	Pasir batu (300 mm)	Tanah baik ( $\infty$ )
1	0+000	582	237	172	135	99	75	52	38	2362	596	346	240	
2	0+020	580	396	283	229	170	125	81	52	1610	307	178	154	
3	0+040	569	331	248	209	163	123	78	50	2499	331	192	157	
4	0+060	578	391	291	232	170	121	74	48	1924	264	164	153	
5	0+080	587	395	271	215	157	116	79	51	1311	358	208	160	
6	0+100	578	428	328	269	203	147	85	54	2091	230	173	134	
7	0+120	580	406	318	254	184	129	74	45	2259	230	183	149	
8	0+140	578	391	283	229	174	130	80	50	1648	316	180	145	
9	0+160	583	395	304	251	192	143	89	53	2187	282	164	132	
10	0+180	574	411	295	236	177	132	89	55	1407	325	189	139	
11	0+200	574	386	296	242	182	135	86	54	2184	273	159	142	
12	0+220	584	525	365	287	212	160	107	64	1979	272	158	117	
13	0+240	588	462	354	290	221	162	100	57	1776	252	146	115	
14	0+260	578	535	381	302	222	165	104	66	1118	229	133	118	
15	0+280	585	478	367	306	236	177	110	64	1824	240	139	106	
16	0+300	576	539	402	327	248	180	111	63	1313	227	132	101	
17	0+320	584	497	382	311	235	174	108	63	1636	231	134	108	
18	0+340	586	499	375	307	232	173	109	64	1516	242	140	109	
19	0+360	587	838	517	366	251	187	122	68	1404	195	113	95	
20	0+380	582	430	331	273	207	157	96	62	2090	243	141	127	
21	0+400	577	548	422	347	258	188	115	65	1565	196	114	97	
22	0+500	580	612	335	161	121	97	74	61	2732	236	143	122	
23	1+000	578	694	337	177	139	115	92	77	2538	213	241	100	

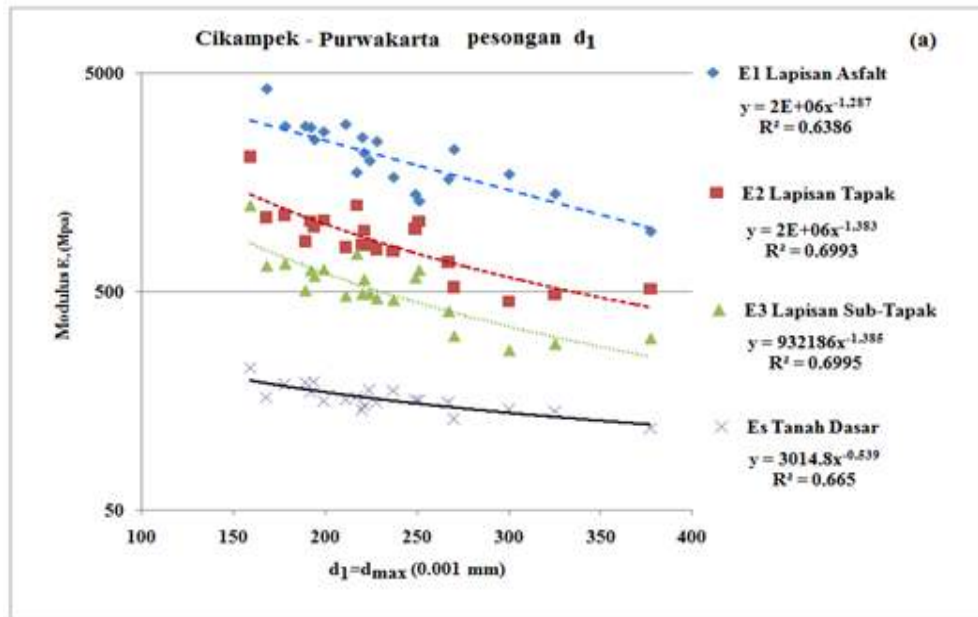


TABEL 4. Lendutan dan Modulus elastis SPL Cikampek-Purwakarta

Ttk	Sta	Penguujian FWD Cikampek-Purwakarta								Modulus Elastik Evaluasi ELMOD				
		(σ) In situ (kPa)	Lendutan (0.001 mm)								E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)	E <sub>4</sub> (MPa)
											AC	Batu pecah	Pasir batu	Tanah baik
			d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>	d <sub>8</sub>	150 mm	(200 mm)	(300 mm)	(∞)
1	0+000	568	189	139	125	106	88	64	38	2858	848	505	191	
2	0+010	565	237	163	141	118	98	69	42	1669	768	458	176	
3	0+020	579	178	130	118	103	89	66	43	2858	1122	669	188	
4	0+030	574	168	137	122	109	96	75	49	4238	1096	654	164	
5	0+040	584	211	162	145	125	107	79	48	2915	800	477	159	
6	0+050	571	221	162	145	128	111	82	51	2156	953	568	150	
7	0+060	565	220	166	150	131	113	84	50	2539	819	488	144	
8	0+070	574	267	192	163	135	111	79	47	1637	682	406	156	
9	0+080	564	300	222	189	150	121	84	50	1724	452	269	144	
10	0+095	557	270	209	183	156	130	91	55	2237	525	313	131	
11	0+105	564	377	248	214	179	148	103	63	1945	514	306	118	
12	0+115	576	325	232	196	158	128	88	55	1405	483	288	141	
13	0+145	580	199	151	135	118	103	79	50	2697	1059	631	158	
14	0+165	577	249	164	145	124	105	78	48	1395	970	578	159	
15	0+175	591	217	150	133	117	102	77	49	1757	1244	742	165	
16	0+185	580	251	161	143	123	105	78	47	1299	1050	626	160	
17	0+195	588	228	173	152	130	109	81	46	2433	779	465	156	
18	0+205	590	192	143	129	113	97	73	44	2820	1047	624	174	
19	0+215	593	159	106	94	83	73	57	39	2072	1236	720	223	
20	0+225	588	194	141	124	106	89	65	40	2477	985	587	194	
21	0+235	577	224	155	139	119	100	70	41	1985	819	488	177	
22	0+380	576	350	285	251	212	169	110	50	2483	678	413	193	



GAMBAR 10. Modulus perkerasan dan tanah dasar E<sub>i</sub> versus lendutan d<sub>i</sub> di jalan raya Soekarno-Hatta

GAMBAR 11. Modulus perkerasan dan tanah dasar  $E_i$  versus lendutan  $d_i$  di jalan raya Cikampek-Purwakarta.

TABEL 5. Hubungan antara modulus perkerasan dan lendutan pengujian FWD di jalan raya Soekarno - Hatta

$r_i$ (mm)	$d_i$ ( $10^{-3}$ ) (mm)	$E_1$ (MPa)	$R^2_1$	$E_2$ (MPa)	$R^2_2$	$E_3$ (MPa)	$R^2_3$	$E_s$ (MPa)	$R^2_s$
0	$d_1$	$262765d_1^{-0.826}$	0.2696	$31243d_1^{-0.779}$	0.6939	$5459.4d_1^{-0.578}$	0.3469	$13179d_1^{-0.756}$	0.7933
300	$d_2$	$1.10^6 d_2^{-1.119}$	0.3472	$93999d_2^{-1.015}$	0.8264	$49436d_2^{-0.992}$	0.718	$31111d_2^{-0.948}$	0.8766
600	$d_3$	$477841d_3^{-1.023}$	0.3734	$10494d_3^{-0.665}$	0.4573	$18414 d_3^{-0.86}$	0.6937	$4087.3d_3^{-0.625}$	0.4904
750	$d_4$	$210341d_4^{-0.923}$	0.2932	$9711.3 d_4^{-0.687}$	0.4708	$4059.3 d_4^{-0.65}$	0.5248	$14641d_4^{-0.864}$	0.6751
900	$d_5$	$213210d_5^{-0.98}$	0.2930	$11922 d_5^{-0.77}$	0.5243	$13835 d_5^{-0.904}$	0.6563	$5744.1d_5^{-0.768}$	0.6337
1200	$d_6$	$401332d_6^{-1.217}$	0.3441	$16932 d_6^{-0.923}$	0.5729	$9913.2 d_6^{-0.918}$	0.5149	$12524d_6^{-1.016}$	0.8432
1500	$d_7$	$95675d_7^{-1.001}$	0.1066	$6423.2d_7^{-0.795}$	0.4077	$487.57d_7^{-1.168}$	0.0404	$14347d_7^{-1.168}$	0.8022

TABEL 6. Hubungan antara modulus perkerasan dan lendutan pengujian FWD di jalan raya Cikampek-Purwakarta

$r_i$ (mm)	$d_i$ ( $10^{-3}$ ) (mm)	$E_1$ (MPa)	$R^2_1$	$E_2$ (MPa)	$R^2_2$	$E_3$ (MPa)	$R^2_3$	$E_s$ (MPa)	$R^2_s$
0	$d_1$	$2.10^6 d_1^{-1.287}$	0.6386	$2.10^6 d_1^{-1.383}$	0.6993	$932186d_1^{-1.385}$	0.6995	$932186d_1^{-1.385}$	0.665
300	$d_2$	$369589d_2^{-1.016}$	0.3571	$3.10^6 d_2^{-1.625}$	0.8653	$2.10^6 d_2^{-1.627}$	0.8653	$3883d_2^{-0.624}$	0.797
600	$d_3$	$393178d_3^{-1.054}$	0.3313	$5.10^6 d_3^{-1.749}$	0.8645	$3.10^6 d_3^{-1.751}$	0.8645	$4929.4d_3^{-0.687}$	0.8347
750	$d_4$	$450576d_4^{-1.117}$	0.2976	$8.10^6 d_4^{-1.886}$	0.8049	$5.10^6 d_4^{-1.888}$	0.8048	$7651.1d_4^{-0.801}$	0.9073
900	$d_5$	$448752d_5^{-1.156}$	0.2638	$7.10^6 d_5^{-1.95}$	0.712	$4.10^6 d_5^{-1.952}$	0.7118	$10933d_5^{-0.906}$	0.9615
1200	$d_6$	$284988d_6^{-1.134}$	0.1896	$4.10^6 d_6^{-1.948}$	0.5303	$2.10^6 d_6^{-1.95}$	0.5301	$16273d_6^{-1.063}$	0.9872
1500	$d_7$	$178251d_7^{-1.156}$	0.1705	$517813d_7^{-1.664}$	0.3348	$309872d_7^{-1.079}$	0.3345	$10319d_7^{-1.079}$	0.8811

Korelasi empirikal penghitungan ELMOD untuk modulus setiap lapisan perkerasan dengan lendutan hasil pengujian FWD di kedua jalan raya ditunjukkan dalam Gambar

10 dan 11 untuk lendutan  $d_1$  dan untuk lendutan yang lain.

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa lendutan ( $d_1=d_0=d_{\max}$ ) mempunyai korelasi yang baik dengan modulus lapisan pondasi atas ( $E_2$ ) ( $R^2 = 0,6939$  dan  $0,6993$ ), demikian juga dengan modulus lapisan tanah dasar ( $E_3$ ) ( $R^2 = 0,7933$  dan  $0,665$ ). Lendutan ( $d_1= d_0 = d_{\max}$ ) tidak menunjukkan korelasi yang baik dengan modulus lapisan aspal ( $E_1$ ) ( $R^2 = 0,2696$ ) dan modulus lapisan pondasi bawah ( $E_3$ ) ( $R^2 = 0,3469$ ).

Hubungan antara modulus dan lendutan yang lengkap ditunjukkan dalam Tabel 5 dan 6. Kosasih (2003) memperoleh hubungan antara modulus aspal perkerasan dan lendutan  $d_{\max}$  ( $d_1=d_0= d_{\max}$ ), dan juga hubungan antara modulus tanah dasar dan lendutan  $d_{750}$  ( $d_4= d_{750}$ ) seperti ditunjukkan dalam Persamaan (8) dan (9).

$$E_{\text{Lapisan-aspal}} = 3,817,850.97d_{\max}^{-1,4165} \quad (8)$$

$$E_{\text{Lapisan-Tanah-dasar}} = 21,417.22d_{750}^{-1,0} \quad (9)$$

Dalam kajian ini hubungan antara modulus aspal perkerasan dan lendutan  $d_1$  ( $d_1=d_0=d_{\max}$ ), serta hubungan antara modulus tanah dasar dan lendutan  $d_4$  ( $d_4= d_{750}$ ) ditunjukkan dalam persamaan (10) dan (11):

$$E_{\text{Lapisan-aspal}} = 2,000,000d_1^{-1,287} \quad (10)$$

$$(R^2 = 0,6386)$$

$$E_{\text{Lapisan-aspal}} = 7651.1d_4^{-0,801} \quad (11)$$

$$(R^2 = 0,9073)$$

Ada dua perbedaan utama pada Persamaan (8) dibandingkan dengan Persamaan (10) dan untuk Persamaan (9) dibandingkan dengan Persamaan (11) dalam korelasi antara lapisan aspal dengan lendutan maksimum ( $d_{\max}$ ). Begitu juga perbedaan didapat bagi lapisan tanah dasar dengan lendutan  $d_4$  ( $d_{750}$ ) yang didapati oleh Kosasih (2003) dan yang didapatkan dalam penelitian ini. Pertama adalah beda suhu dan ketebalan lapisan aspal dan yang kedua adalah beda kekuatan tanah dasar perkerasan. Persamaan (8) didapatkan dalam keadaan suhu perkerasan  $34^{\circ}\text{C}$  dan ketebalan lapisan beraspal 385 mm dengan selang data lendutan yang lebar yaitu antara 160 hingga  $800 \times 0,001$  mm dan rata-rata lendutan  $400 \times 0,001$  mm. Nilai lendutan yang besar dengan selang antara 400 hingga  $> 600 \times 0,001$  mm dalam pengujian FWD dapat menunjukkan lapisan pondasi atas, pondasi bawah dan tanah dasar yang lemah (Brown

1986). Penghitungan modulus kekuatan denyutan dan dinamik dalam beban standar (4,1 Ton) yang didapatkan Kosasih (2003) adalah 5,125 Ton/mm. Dalam penelitian ini Persamaan (10) digunakan untuk keadaan suhu perkerasan  $39^{\circ}\text{C}$  dan ketebalan lapisan beraspal 200 mm dengan selang data lendutan yang pendek antara 159 hingga  $377 \times 0,001$  mm dan rata-rata lendutan  $255 \times 0,001$  mm. Lendutan yang diperoleh menunjukkan bahwa lapisan pondasi atas, pondasi bawah dan tanah dasar adalah kuat (Brown 1986). Penghitungan modulus kekuatan denyutan dan dinamik dalam beban standar (4,1 Ton) yang didapatkan dalam kajian ini adalah 10,88 Ton/mm  $> 5,125$  Ton/mm (Kosasih 2003). Ini adalah sebab utama perbedaan bagi persamaan yang telah disebutkan. Kedua persamaan mendapatkan nilai modulus aspal adalah 3175,65 MPa pada lendutan  $d_{\max}=149,61 \times 0,001$  mm. Pada lendutan  $d_{\max}= 0,1$  mm (Persamaan 8) modulus aspal adalah 5618,48 MPa yakni lebih besar daripada modulus aspal penelitian ini yaitu 5333,72 MPa (Persamaan 10) dengan deviasi +5%. Untuk nilai lendutan  $d_{\max}= 0,225$  mm juga didapatkan deviasi -5% dengan nilai modulus aspal 1781,94 MPa (Persamaan 8) yakni lebih kecil daripada modulus aspal kajian ini yaitu 1878,33 MPa (Persamaan 10). Ini menunjukkan bahwa modulus lapisan aspal yang didapatkan dalam penghitungan Persamaan (8) (Kosasih 2003) lebih besar daripada Persamaan (10) (hasil penelitian ini) untuk lendutan yang kurang daripada nilai  $d_{\max}=0,149$  mm dan begitu juga sebaliknya.

Hubungan korelasi tanah dasar dengan lendutan maksimum ( $d_{750} = d_4$ ) yang ditunjukkan oleh Persamaan (9) (Kosasih, 2003) dan (11) (penelitian ini) didapatkan pada musim kering. Kekuatan tanah dasar kedua persamaan tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu, hanya dipengaruhi oleh perubahan musim. Kekuatan tanah dasar dan lapisan pondasi atas yang didapatkan Kosasih (2003) mempunyai nilai sama, yaitu 192,67 MPa. Dalam penelitian ini lapisan pondasi atas, pondasi bawah dan tanah dasar mempunyai nilai modulus 860, 513 dan 160 MPa. Ini menyebabkan perbedaan yang didapatkan antara kedua persamaan tersebut. Kedua persamaan mendapatkan nilai modulus tanah dasar yang sama untuk lendutan  $d_{750}=73,413 \times 0,001$  mm yaitu 245,04 MPa. Deviasi +5% didapatkan untuk nilai lendutan  $d_{750}= 59,88 \times 0,001$  mm dengan modulus tanah dasar 302,92

MPa (Persamaan 9) yang lebih besar daripada 288,48 MPa (Persamaan 11).

Didapatkan juga deviasi  $-5\%$  untuk nilai lendutan  $d_{750} = 90,95 \times 0.001$  mm (Persamaan 10) dengan modulus tanah dasar 196,08 MPa yang lebih besar daripada 206,41 MPa hasil penelitian ini (Persamaan 11). Ini menunjukkan corak yang sama seperti pembahasan dalam penghitungan lapisan beraspal untuk kedua persamaan. Tambahan lagi dalam SPL standar empat lapisan rasio modulus pondasi atas dengan modulus tanah dasar untuk kelas sempurna adalah  $> 1,5$ . Dalam Persamaan (9) didapatkan rasio pondasi atas dengan modulus tanah dasar adalah 1 (kelas memuaskan) dan untuk Persamaan (11) adalah 3,2 (kelas sempurna) (JKRM, 1994). Perbedaan kelas kekuatan untuk tanah dasar memberi andil dalam meningkatkan perbedaan antara Persamaan (8) (Kosasih 2003) dengan Persamaan (11). Lendutan  $d_4$  yang didapatkan Kosasih (2003) adalah titik perubahan kurva (*point of inflection*) dari seri lendutan  $d_1$  hingga  $d_7$  pengujian FWD yang berkorelasi dengan modulus tanah dasar. Kajian ini menunjukkan bahwa semua lendutan  $d_i$  berkorelasi dengan modulus tanah dasar dengan  $R^2 > 0,65$  seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 7 dan 8.

## KESIMPULAN

- Semua hasil pengujian lendutan yang menggunakan alat FWD mempunyai korelasi dengan lapisan perkerasan yang terdiri dari empat lapisan yaitu lapisan permukaan beraspal, lapisan pondasi atas, lapisan pondasi bawah dan lapisan tanah dasar dengan nilai  $R^2$  yang berbeda-beda. Korelasi yang mempunyai nilai  $R^2 > 0,5$  ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$E_{\text{Lapisan-aspal}} = 2,000,000d_1^{-1,287}$$

$$(R^2 = 0.6386)$$

$$E_{\text{Lapisan-aspal}} = 7651.1d_4^{-0,801}$$

$$(R^2 = 0.9073)$$

- Lendutan  $d_4$  yang didapatkan Kosasih (2003) adalah titik perubahan kurva (*point of inflection*) dari seri lendutan  $d_1$  hingga  $d_7$  pengujian FWD yang berkorelasi dengan modulus tanah dasar. Kajian ini menunjukkan bahwa semua lendutan di

berkorelasi dengan modulus tanah dasar dengan  $R^2 > 0,65$ .

TABEL 7. Hubungan lendutan dengan modulus tanah dasar jalan raya Soekarno-Hatta Sta.0+000 hingga Sta. 1+000

No	$d_i$	$E_s$	$R^2$
1	$d_1$	$13179 d_1^{-0.756}$	0.7933
2	$d_2$	$31111 d_2^{-0.948}$	0.8766
3	$d_3$	$4087.3 d_3^{-0.625}$	0.4904
4	$d_4$	$14641 d_4^{-0.864}$	0.6751
5	$d_5$	$5744.1 d_5^{-0.768}$	0.6337
6	$d_6$	$12524 d_6^{-1.016}$	0.8432
7	$d_7$	$14347 d_7^{-1.168}$	0.8022

TABEL 8. Hubungan lendutan dengan modulus tanah dasar jalan raya Cikampek-Purwakarta Sta.0+000 hingga Sta.0+235

No	$d_i$	$E_s$	$R^2$
1	$d_1$	$3014.8 d_1^{-0.539}$	0.6650
2	$d_2$	$3883 d_2^{-0.624}$	0.7970
3	$d_3$	$4929.4 d_3^{-0.0687}$	0.8347
4	$d_4$	$7651.1 d_4^{-0.801}$	0.9073
5	$d_5$	$10933 d_5^{-0.906}$	0.9615
6	$d_6$	$16273 d_6^{-1.063}$	0.9872
7	$d_7$	$10319 d_7^{-1.079}$	0.8811

## DAFTAR PUSTAKA

- Acum, W.E.A. and Fox, L. (1951). Computation of road stresses in a three-layer elastic system, *Geotechnique*. London, U.K.:293-300.
- 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.
- Asphalt Institute (1981). *Thickness Design, Asphalt Pavement Structure for Highway and Streets (MS-1)*: College Park, Maryland 20740,USA.
- Berg, F. Jansen, J. and Larsen, H. (1986). Structural Pavement analysis based on FWD, georadar and/or Geosonar data. *Proc. 2nd Int. Conf. On The Bearing*

- Capacity of Roads and Airfields*. Playmonth, England.
- Boussinesq (1885). *Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides 'elastiques*. Paris: Gauthier Villars.
- Brown, S.F., Tam, W.S., Brunton, J.M. (1986). Development of an analytical method for the structural evaluation of pavement, *Proc. 2nd Int. Conf. On the Bearing Capacity of Road and Airfields*. Playmonth, England.
- Chen, D., Bilyeu, J., Lin, H. and Murphy, M. (2000). Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements. *In Transportation Research Record. 1716*. Transportation Research Board, Washington, DC.:30-39.
- Choi, J.W., Wu, R., Pestana J.M. and Harvey (2010). New Layer-Moduli Back-Calculation Method Based on the Constrained Extended Kalman Filter. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE.Vol. 136: No.1.
- Danida dan Pusat Litbang Jalan (1990). *Study of Improved Bearing Capacity Evaluation and Strengthenen Design of Road*. Technical Report No. 2. FWD Calibration, Bandung: Puslitbang P.U.
- DPU (1993). *Faktor Ekuivalen Beban (ESA) Untuk Perencanaan Perkerasan Lentur Dengan Alat Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Laporan Penelitian No. 11-010-TJ-92. Departemen Pekerjaan Umum Badan Penelitian Dan Pengembangan PU : Pusat Penelitian Dan Pengembangan Jalan. Bandung, Indonesia.
- Dynaflect (2001). *Dynamic Deflection Determination System*. Geo-Log. Inc. 220: Industrial Avenue Granbury, Texas 76049, U. S. A.
- Dynatest (2008). *Technical Advisory. Construction and Bridge Divisions*. Typical TxDOT FWD and Major components of the FWD unit: Texas Department of Transportation. U.S.A.
- Ehrola., Belt, J., Ryynanen, T. (1990). Influence of Asphalt Pavements, *Proc. Of the 3rd Int. Conf. On Bearing Capacity of Roads and Airfields*. Trondein: Norway.
- FHWA (U.S. Federal Highway Administration) (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Publication: No. FHWA-RD-03-031, Washington D.C.
- Fwa, T., and Rani, T. (2005). Seed Modulus Generation Algorithm for Backcalculation of Flexible Pavement Moduli. *Transportation Research Record*, 1905(-1): 117-127.
- Gedafa, D.S., Hossein, M., Miller, R., and Steele, D. (2009). Network Level Pavement Structural Evaluation Using Rolling Wheel Deflectometer. *In Transportation Research Board Annual Meeting: Preprin DVD*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Huang, Y.H. (1969). Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory. *Hwy. Res. Rec. 291. Hwy. Res. Board*: 144-155.
- Huang, Y.H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. University of Kentucky. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632. U. S. A.
- Huang, Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Humer, R.P., Koole, R.C., Bosch, G.R. (1986). Airport Pavement Evaluation measurements and the BISAR computer programme. *Proc. 2nd Int. Conf. On the Bearing Capacity of Roads and Airfield*: Playmonth, England.
- Irwin, L.H. (1991). Report of the Discussion Group on Practical Limitations and What can be Done to Overcome Them, *TRR-1377, Proceedings of a Symposium*: Washington DC.
- Jabatan Kerja Raya Malaysia (1994). *Interim Guide to Evaluation and Rehabilitation of Flexible Road Pavements*. Guide Line. Jabatan Kerja Raya Malaysia.
- Kosasih, D. (2003). The Effects of Pavement Structure Modeling and Deflection Bowl Analysis on Calculated Layer Moduli. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Vol 5: 927-939.

- Linda, M.P. (1999). Development of a Computer Program for the Determination of the Area Value and Subgrade Modulus using the Dynatest FWD. *Pavement and Soils Engineer*: Washington State Department of Transportation.
- Loanides, A.M., Khazanovich, L. (1998). General formulation for multilayered pavement systems. *ASCE Journal of transportation engineering*. Vol.124 No.1.
- Miura, Y., Tobe, T. (1977). Evaluation of Existing pavement based on deflection and radius of curvature and overlay design. *Proc. 4th. Int. Conf. On Structural Design of Asphalt Pavements*: Ann Arbor, Michigan.
- Molennar, A., Beuving, E. (1986). Assessment of stress dependent and soft layers in pavement structural by means of deflection measurements. *Proc. 2nd. Int. Conf. On the Bearing Capacity of Roads and Airfield*: Plymouth, England.
- Odemark, N. (1949). *Investigations as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity*.: Statens Väginstytut, Stockholm.
- Park, D.Y., Buch, N., and Chatti, K. (2001). Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections. *Transportasi Research Record*. 1764: 97-106.
- Park, H.M., and Kim, Y.R. (2003). Prediction of remaining life of asphalt pavement with falling-weight deflectometer multiload-level deflections. *Transportation Research Record*.1860: 48-56.
- Peatti, K.R. (1962). A fundamental method for the design of flexible roads: The basis of the method. *Thornton Research Centre*. Report: M 215.
- Puslitbang (2003). *Pengkajian Metoda Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur Dengan Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Laporan No: 03-1-01-4-21-03. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah Badan Penelitian dan Pengembangan Permukiman dan Prasarana Wilayah: Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Bandung, Indonesia
- Shao, L., Park, S.W., and Kim, Y.R. (1997). Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperature Based on Heat Transfer Theories. In *Transportation Research Record 1568*, Transportation Research Board, Washington, D. C: 114-123
- Shell International Petroleum Company (1978). *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlay for Road Traffic*.. Shell International Petroleum Co.: London.
- Stolle, D.F.E. and David, K.H. (2002). Assessment of the Impact of Layer Moduli on Measured Surface Deflections. *Paper prepared for presentation at Pavement Evaluation*. A Joint Conference of the FWD and Road Profilers User Groups: Roanoke, Virginia.
- Tawfiq K. (2003). Utilizing the Falling Weight Deflectometer in Evaluating Soil Support Values of Pavement Layers. *Summary of Report, BC352-01* of the Florida A and M University: Florida State University College of Engineering.
- TxDOT. (2008). *Frequently Asked Questions about the Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Technical Advisory: Texas Department of Transportation.
- Ullidtz, P. (1984). *Prediction of Pavement Response Using Non-Classical Theories of Elasticity*, Notat 81-1, The Institute of Roads, Transport and Town Planning: The Technical University of Denmark.
- Ullidtz, P. (1989). *A New Mechanistic-Empirical Design for Flexible Pavement and Rehabilitation Programme*. Research Product from the 34 SHRP Program: Virginia.
- Ullidtz, P. and Peattie, K.R. (1980). Pavement Analysis by Programmable Calculators, *Transportation Engineering Journal*, American Society of Civil Engineers. U.S.A.
- Ullidtz, P. (1987). *Pavement Analysis, Development in Civil Eng.* Vol 19 Amsterdam, the Netherlands.

- Ullidtz, P. (1998). *Modelling flexible pavement response and performance*. Teknikal University of Denmark.
- Ullidtz, P., Stubstand, R.N. (1985). Analytical-Empirical Pavement Evaluation using the Falling Weight Deflectometer, *Transportation Research Record 1022*, TRB Washington, DC.
- Uzan J., Lytton R.L. Germann F.P. (1989). General procedur for backcalculating layer moduli. In: Bush A. J., Baladi G. Y., editor. *NDT of pavements and backcalculation of maduli, 1. Special technical publication, STP 1026*. Pensilvania: ASTM Publication: 7-38.
- van Cauwelaert, F. (1993). *The story of rational design of Pavements*.(ed. Nilsson. R) Division of Highway Engineering. TRITA-IP FR 99-51: Royal Institute of Technology. Sweden.
- Watson, D.E., Zhang, J., and Powell, R.B. (2004). Analysis of Temperature Data for the National Center for Asphalt Technology Test Track. In *Transportation Research Record 1891*. *Transportation Research Board*. Washington, D C: 68-75.
- WSDOT. (2009). *Pavement Guide For Design, Evaluation and Rehabilitation*. Washington State Department of Transportation: Washington. U.S.A.
- Xu, B., Ranjithan, S.R. and Kim, Y.R. (2002). New relationship between falling weight deflectometer deflections and asphalt pavement layer condition indicators. *Transportation Research Record*. 1806: 48-56.
- Zhou, H. (2000). Comparison of backcalculated and laboratory measured moduli on AC and granular base layers materials. In: Tayabji SD, Lukanen EO, editors. *NDT of Pavements and backcalculation of moduli, 3. Special technical publication, STP 1375*, vol. 3-37. Pensilvania. ASTM Publication: 161-172
- Zhou, H., Hicks, R.G., Bell, C.A. (1992). Development of a backcalculation program and its verification. In: *Proceedings of the seventh international conference on asphalt pavements*. Vol. 1.:391-400. U.K.

---

 PENULIS:

Sentot Hardwiyono✉

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

✉Email: sentot\_hardwiyono@yahoo.com