

EVALUASI PREDIKSI UMUR SISA PERKERASAN LENTUR METODE PEDOMAN 2005, AASHTO 1993, DAN BACKCALCULATION (EVALUATION OF REMAINING LIFE PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT BASED ON PEDOMAN 2005, AASHTO 1993, AND BACKCALCULATION)

Aloysius Tjan

Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung 40114
e-mail: aloysius@unpar.ac.id

Diterima: 11 Juni 2021 ; direvisi: 05 November 2021; disetujui: 29 November 2021.

ABSTRAK

Evaluasi kondisi perkerasan lentur antara lain dapat dilakukan berdasarkan pengukuran lendutan vertikal di permukaan perkerasan. Alat FWD adalah salah satu yang dapat digunakan untuk tujuan ini. Analisis pengujian lendutan yang diperoleh antara lain metode backcalculation, AASHTO 1993, maupun Pedoman 2005. Analisis umur sisa perkerasan dari Pedoman 2005 berdasarkan sebuah lendutan di pusat beban pada temperatur standar 35°C dan beban standar 4.08 ton serta kondisi muka air tanah lapis tanah dasar – tanpa melalui proses evaluasi modulus dari struktur perkerasan eksisting. Sedangkan AASHTO menggunakan dua buah lendutan, yaitu sebuah lendutan yang cukup jauh dari pusat beban dan lendutan di pusat beban pada temperatur standar 68°F. AASHTO mengevaluasi modulus lapis tanah dasar dan modulus struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar – sebelum akhirnya tiba pada prediksi umur sisa. Backcalculation menghasilkan prediksi modulus setiap lapis struktur perkerasan yang dimodelkan. Umur sisa dihitung dengan menggunakan korelasi repetisi beban dan nilai struktur AASHTO 1993. Hasil modulus lapis tanah dasar MICHBACK lebih besar (114.6%) daripada metode AASHTO. Nilai structural efektif di atas lapis tanah dasar MICHBACK lebih kecil (92.32%) daripada AASHTO, Kombinasi perbedaan ini menghasilkan umur sisa MICHBACK sebesar 70.6% AASHTO. Sedangkan umur sisa Pedoman 2005 sebesar 125.8% MICHBACK. Jika hasil backcalculation dijadikan acuan, maka umur sisa AASHTO perlu dikalikan dengan faktor 0.706, sedangkan Pedoman 2005 dengan faktor 0.78.

Kata Kunci: lendutan, FWD, AASHTO 1993, Pedoman 2005, backcalculation, MICHBACK.

ABSTRACT

Structural flexible pavement evaluation can be performed by measuring vertical deflection on the pavement surface. FWD (Falling Weight Deflectometer) is one of the available apparatus for this purpose. There are several different methods to analyze the deflections such as backcalculation, AASHTO 1993, and Pedoman 2005. Remaining life of the existing pavement on Pedoman 2005 based on solely the deflection at the center of the loading plate at standard pavement temperature (35°C), standard loading (4.08 tons), and depends on water ground level – without evaluating structural layers moduli. On the other hand, AASHTO method based on a deflection relatively far from the center, and a deflection at the center of the loading plate at standard pavement temperature (68°F). The AASHTO evaluates resilient modulus of subgrade, and effective modulus of pavement structure above the subgrade – and later the pavement remaining life. Other than the previous methods, output of backcalculation method are every and each pavement layers moduli that has been modelled. The remaining life is determined by using AASHTO relationship number of load repetitions and effective structural number. As the results of MICHBACK subgrade resilient modulus is greater (114.6%) than the AASHTO. Effective structural number of MICHBACK is less (92.32%) than the AASHTO. The combined differences on subgrade resilient modulus dan effective structural number on remaining life of the MICHBACK is 70.6% of the AASHTO. While remaining life of Pedoman 2005 is 125.8% of MICHBACK. When results of MICHBACK backcalculation is considered as referenced, calibration factor for remaining life of AASHTO is 0.706, and Pedoman is 0.78.

Key words: deflection, FWD, AASHTO 1993, Pedoman 2005, backcalculation, MICHBACK.

PENDAHULUAN

Evaluasi kondisi perkerasan lentur eksisting merupakan langkah yang harus dilakukan dalam proses penentuan program pemeliharaan perkerasan, terutama untuk program peningkatan. Evaluasi perkerasan itu dapat berdasarkan penilaian kondisi visual, atau penilaian kondisi berdasarkan kemampuan struktur menerima beban – dalam hal ini lendutan. Pengukuran lendutan dapat berdasarkan beban statis, dinamis, impuls dimana alat pengukur dalam keadaan diam seperti antara lain LWD (Siegfried 2018), bahkan pengukuran lendutan dapat dilakukan ketika kendaraan penguji lendutan sambil tetap melaju (Flintsch, Bryce and Katicha 2014).

Penilaian kondisi perkerasan berdasarkan lendutan berhubungan dengan respon struktur terhadap beban. Respon tersebut berkorelasi dengan tebal dan modulus lapis-lapis struktur perkerasan. Lendutan sebagai data untuk evaluasi struktur perkerasan dapat dilihat antara lain pada Pedoman 2005 (Pd T-05-2005-B 2005), AASHTO 1993 (AASHTO 1993), dan Austroads (Austroads 2011). AASHTO 1993 memproses data lendutan sehingga diperoleh modulus lapis tanah dasar, modulus efektif lapis (atau lapis-lapis) struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar, dan yang pada akhirnya mendapatkan kekuatan struktur efektif dan umur sisa.

Modulus lapis-lapis perkerasan juga dapat diperoleh dari data lendutan dengan cara backcalculation (perhitungan balik). Backcalculation memerlukan alat bantu (program komputer) untuk melakukan perhitungan. Berdasarkan analisis backcalculation itu, AASHTO 1993 menyederhanakan proses perhitungannya dengan cara sederhana (yang perhitungannya tidak memerlukan program komputer khusus). Penyederhanaan memberi dampak positif (menjadi dapat dilakukan tanpa alat bantu khusus), namun juga negatif (akurasi hasil menjadi berkurang).

Apakah penyederhanaan AASHTO 1993 memberikan hasil yang berbeda dibandingkan dengan analisis backcalculation pada suatu data lendutan (dalam hal ini digunakan data lendutan FWD pada Pedoman 2005). Umur sisa

berdasarkan AASHTO 1993, dan backcalculation juga dibandingkan dengan umur sisa Pedoman 2005.

HIPOTESIS

Akan terjadi perbedaan antara modulus resilien lapis tanah dasar maupun modulus efektif struktur di atas lapis tanah dasar yang diperoleh menurut metode AASHTO 1993, dan backcalculation. Perbedaan itu akan menyebabkan perbedaan yang besar pada prediksi umur sisanya. Kedua umur sisa itu juga akan dibandingkan dengan umur sisa Pedoman 2005.

Penyederhanaan Apakah penyederhanaan AASHTO 1993 memberikan hasil yang berbeda dibandingkan dengan analisis backcalculation pada suatu data lendutan (dalam hal ini digunakan data lendutan FWD pada Pedoman 2005). Umur sisa berdasarkan AASHTO 1993, dan backcalculation juga dibandingkan dengan umur sisa Pedoman 2005.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan data sekunder, yaitu data lendutan FWD yang terdapat pada Pedoman 2005. Untuk metode AASHTO 1993 (menggunakan rumus-rumus): data lendutan digunakan untuk menghitung modulus resilien lapis tanah dasar, serta modulus efektif lapis di atas lapis tanah dasar. Kemudian modulus efektif digunakan memprediksi nilai struktur efektif. Berdasarkan modulus resilien lapis tanah dasar dan nilai struktur efektif diprediksi umur sisa berdasarkan korelasi antara jumlah repetisi beban dan nilai struktur.

Untuk backcalculation digunakan program MICHBACK: data lendutan yang diukur pada berbagai posisi dari pusat beban sebagai input program, dan outputnya adalah modulus tiap lapis struktur perkerasan yang dimodelkan. Modulus resilien lapis tanah dasar akan dibandingkan dengan hasil metode AASHTO 1993. Modulus lapis-lapis struktur di atas tanah dasar akan dihitung menjadi modulus satu lapis homogen yang disebut sebagai modulus efektif (setelah menyesuaikan

modulus lapis campuran beraspal pada temperatur standar AASHTO, yaitu 68°F). Penyesuaian modulus campuran beraspal menjadi 68°F menggunakan bantuan metode master curve. Modulus efektif ini akan dibandingkan dengan hasil AASHTO 1993. Berdasarkan modulus efektif ini, dihitung nilai struktur efektif, serta umur sisa backcalculation dengan menggunakan hubungan W_{18} dan SN dari AASHTO.

Untuk Pedoman 2005: data lendutan di pusat beban pada temperatur standar (35°C) dan beban standar (4.08 ton) serta tinggi muka air tanah digunakan untuk menghitung umur sisa. Umur sisa Pedoman 2005 ini dibandingkan dengan umur sisa dari ke dua metode sebelumnya.

Pedoman 2005

Pedoman 2005 (Pd T-05-2005-B 2005) adalah pedoman untuk mendesain tebal lapis tambah campuran beraspal pada perkerasan lentur. Evaluasi kondisi perkerasan berdasarkan hasil uji lendutan vertikal pada permukaan perkerasan, antara lain Falling Weight Deflectometer (FWD).

Pedoman 2005 memberikan korelasi antara besarnya lendutan dengan umur perkerasan (dalam hal ini sama dengan repetisi sumbu standar 18 kips atau 8.16 ton). Pada pengukuran lendutan dengan FWD, hanya diperlukan satu lendutan saja, yaitu di pusat beban. Lendutan pada korelasi tersebut adalah lendutan pada temperatur standar 35°C (akibat lapis permukaan campuran beraspal bersifat viskoelastik), dan beban 4.08 ton, dan kondisi lapis tanah dasar dengan memperhitungkan pengaruh dari muka air tanah (atau musim). Penyesuaian secara linier pada lendutan akibat beban tidak standar diadopsi pada Pedoman 2005. Menurut Smith, et al. (2017) lendutan dan beban tidak berkorelasi linier.

Korelasi lendutan dan repetisi beban adalah seperti Pers (1). Pers (2) adalah menggunakan korelasi yang sama, namun dengan format repetisi beban sebagai fungsi lendutan.

$$d_L = 17.004 \times W_{18}^{-0.2307} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_{18} = 10^{\left(\frac{\log 17.004 - \log d_L}{0.2307}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- d_L : lendutan di pusat beban pada temperatur standar 35°C, beban standar 4.08 ton dan disesuaikan dengan musim (mm)
- W_{18} : jumlah repetisi sumbu standar 18 kips atau 8.16 ton sampai perkerasan menjadi rusak

Apabila pengukuran lendutan tidak dilakukan pada kondisi standar, maka Pedoman 2005 telah memberikan cara untuk menyesuaikan lendutan, beban maupun musim tersebut. Detail penyesuaian itu tidak diuraikan di sini, karena data yang dipakai sudah mencantumkan juga lendutan pada kondisi standar.

Aashto 1993

AASHTO 1993 (AASHTO 1993) mempublikasikan metode evaluasi perkerasan lentur berdasarkan hasil uji lendutan dengan FWD. AASHTO mendasarkan evaluasi struktur perkerasan berdasarkan prinsip backcalculation. Selain besarnya beban, lendutan di pusat beban dipengaruhi oleh modulus dan tebal lapis perkerasan. Lendutan yang makin jauh dari pusat beban, semakin tidak dipengaruhi oleh lapis-lapis struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar. Pada suatu posisi tertentu yang “jauh” dimana modulus lapis-lapis perkerasan di atas lapis tanah dasar, maka lendutan pada posisi itu hanya dipengaruhi oleh modulus lapis tanah dasar.

Berdasarkan prinsip lendutan sudah cukup “jauh” tersebut, diprediksi modulus lapis tanah dasar dengan Pers 3. Sehingga pada Pers 3 tidak ada lagi parameter di atas lapis tanah dasar.

$$E_3 = \frac{0.24(P)}{d_r(r)} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- E_3 : modulus resilien lapis tanah dasar (psi)
- P : beban FWD (lbs)
- d_r : lendutan vertikal pada posisi jarak r dari pusat beban (in)
- r : jarak yang dihitung dari pusat beban (in)

Posisi cukup “jauh” itu oleh AASHTO 1993 ditentukan dengan syarat seperti Pers 4. Pada posisi tersebut lendutan vertikalnya dianggap tidak dipengaruhi oleh struktur di atas lapis tanah dasar. Besarnya a_e yaitu radius stress bulb pada interface lapis tanah dasar dengan lapis di atasnya dihitung dengan Pers 5.

Untuk menghitung a_e , parameter E_p harus dihitung terlebih dahulu. E_p sebagai modulus efektif tergantung pada lendutan di pusat beban. E_p dihitung dengan Pers 6. Lendutan di pusat beban harus yang digunakan harus pada temperatur standar, yaitu 68°F.

$$r \geq 0.7 * a_e \dots \dots \dots (4)$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{E_3}} \right)^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$d_0 = 1.5(p)(a) \left\{ \frac{1}{E_3 \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{E_3}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_3} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

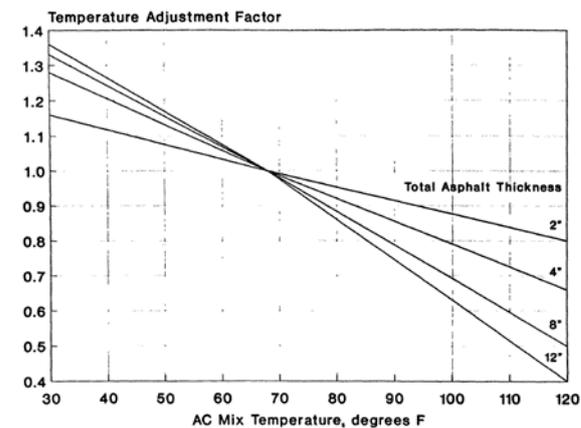
- a_e : radius stress bulk pada interface lapis tanah dasar (in)
- a : radius pelat FWD (in)
- D : tebal total lapis-lapis struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar (in)
- E_p : modulus efektif, yaitu modulus lapis-lapis di atas lapis tanah dasar sebagai sebuah lapis homogen dengan tebal D (psi)
- d_0 : lendutan vertikal di pusat beban pada temperatur 68°F (in)
- p : tekanan pada bidang kontak pelat FWD (psi)

Apabila lendutan yang diukur tidak pada temperatur standar, maka lendutan hasil pengukuran harus disesuaikan dengan cara

mengalikan lendutan dengan faktor yang diperoleh dari Gambar 1.

Perhitungan Pers 3 dimulai dengan lendutan yang paling dekat dengan pusat beban. Apabila posisi lendutan itu tidak memenuhi syarat Pers 4, maka semua perhitungan harus diulang dengan menggunakan lendutan berikutnya yang lebih jauh dari pusat. Ketika posisi lendutan memenuhi syarat, maka telah diperoleh E_3 dan sekaligus E_p .

Modulus resilien lapis tanah dasar yang diperoleh dari proses backcalculation yang disederhanakan ini hampir pasti mempunyai deviator stress kurang dari 6 psi. Ketika tanah mempunyai deviator stress kurang dari 6 psi, maka modulus resiliennya nilainya meningkat. Sehingga modulus yang diprediksi itu menjadi terlalu besar dan tidak sesuai dengan modulus resilien tanah dasar yang dipakai ketika membuat hubungan W_{18} dan nilai struktural (AASHTO 1993). Oleh karena itu untuk desain tebal lapis tambah atau menggunakan hubungan W_{18} dan nilai struktural, dianjurkan menggunakan faktor $C = 0.33$.



Gambar 1. Faktor Penyesuaian Lendutan Menjadi pada Temperatur Standar 68°F (AASHTO 1993)

Nilai struktural efektif juga dapat diprediksi berdasarkan hubungan tebal struktur perkerasan dan modulus efektifnya, seperti Pers 7.

$$SN_{eff} = 0.0045 * D^3 \sqrt{E_p} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- SN_{eff} : nilai struktural efektif
- D : tebal lapis struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar (in)
- E_p : modulus efektif struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar (psi)

Untuk menghitung umur sisa perkerasan yang dievaluasi ini, digunakan Pers 8 (AASHTO 1993) dengan menggunakan M_R = E₃, dan SN = SN_{eff}. Selain itu perlu ditentukan besarnya konstanta berikut: p_o, p_t, z_r, dan s_o.

$$\begin{aligned} \log W_{18} = & z_r s_o + 9.36 \times \log(SN + 1) \dots (8) \\ & - 0.20 \\ & + \frac{\log \frac{p_o - p_t}{4.2 - 1.5}}{1094} \\ & 0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \\ & + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \end{aligned}$$

Keterangan:

- W₁₈ : repetisi sumbu standar 18 kips (8.16 ton) sehingga perkerasan menjadi rusak
- z_r : diperoleh dari tabel normalized no rmal distribution – yang tergantung pada tingkat keandalan yang ditetapkan
- s_o : standar deviasi dari prediksi lalu lintas dan prediksi kinerja perkerasan
- p_o : tingkat kerataan perkerasan pada saat awal
- p_t : tingkat kerataan perkerasan pada saat rusak (failure)
- M_R : modulus resilien lapis tanah dasar (psi)
- SN : nilai struktural

Backcalculation - Michback

Metode backcalculation adalah kebalikan dari metode forward calculation. Pada forward calculation, berdasarkan informasi tebal lapis struktur perkerasan dan modulus tiap lapis, dihitung lendutan akibat suatu beban, Backcalculation adalah proses sebaliknya, yaitu mencari besarnya modulus tiap lapis struktur perkerasan berdasarkan lendutan di permukaan perkerasan yang diukur.

Pada proses backcalculation, lendutan yang diukur pada posisi yang berbeda minimal sebanyak jumlah lapis yang modulusnya ingin dicari. Pengukuran lendutan dengan alat FWD memungkinkan pengukuran lendutan pada 7 posisi. Modulus yang dicari dengan proses iterasi. Modulus lapis yang dicari telah

diperoleh ketika lendutan yang dihitung secara forward calculation sudah sama dengan lendutan yang diukur. Proses perhitungan yang berulang-ulang ini memerlukan alat bantu program komputer.

Program komputer MICHBACK digunakan pada penelitian ini, karena menghasilkan output berupa modulus lapis yang lebih konsisten dibandingkan dengan program lain seperti MODULUS atau EVERCALC (Mahmood 1993). Kesalahan input tebal lapis permukaan dan lapis pondasi juga tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap modulus yang diperoleh. Pemilihan MICHBACK ini menjadi lebih tepat lagi disebabkan tidak ada informasi tebal lapis pondasi pada data lendutan yang dianalisis (Pd T-05-2005-B 2005).

Input yang dimasukkan ke dalam program MICHBACK adalah ke tujuh lendutan yang diukur, tekanan bidang kontak pada pelat FWD, radius pelat FWD dan tebal lapis perkerasan dan angka Poisson tiap lapis. Modulus menjadi output dari MICHBACK.

Master Curve

Modulus lapis permukaan campuran beraspal dipengaruhi oleh frekuensi beban dan temperatur, karena campuran beraspal bersifat viskoelastik. Modulus campuran beraspal yang diperoleh dari backcalculation – MICHBACK, sangat tergantung pada temperatur perkerasan pada saat pengukuran lendutan. Untuk analisis E_p sebagai gabungan modulus lapis permukaan dan lapis pondasi, AASHTO menggunakan temperatur standar 68°F, dan modulus yang dihasilkan dari pengujian FWD adalah akibat frekuensi 18 Hz.

Untuk menyesuaikan modulus campuran beraspal menjadi kondisi standar menggunakan konsep master curve (Bonaquist 2008). Model dari master curve berbentuk sigmoidal dengan Pers 9.

$$\log(E_1) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \times \log(T_R)}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \log(T_R) \quad (10) \\ & = \frac{1}{\log(\omega) + \log(\alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3)} \end{aligned}$$

Keterangan:

- ω : frekuensi beban (Hz)
- T : temperatur campuran beraspal yang ingin dianalisis ($^{\circ}\text{C}$)
- $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ adalah konstanta dari fitting curve

Modulus Kombinasi Lapis

Modulus efektif pada metode AASHTO adalah penggabungan lapis-lapis di atas lapis tanah dasar dengan asumsi semua lapis itu menjadi satu jenis bahan yang sama dan homogen. Ketebalannya adalah sama dengan jumlah tebal lapis-lapis. Penggabungan ini adalah cara penyederhanaan metode backcalculation yang diambil oleh AASHTO. Kombinasi modulus lapis-lapis tersebut dicari dengan prinsip lendutan yang diperoleh dari struktur yang asli sama dengan lapis hasil penggabungan.

Modulus yang menghasilkan lendutan yang sama itu disebut sebagai modulus efektif dan diperoleh dengan menggunakan Pers 11, berdasarkan prinsip yang sama seperti pada Pedoman 2013 (No 12-SE-M-2013 2013).

$$E_p = \left[\frac{\sum h_i \times E_i^{0.333}}{\sum h_i} \right]^3 \quad (11)$$

Keterangan:

- E_p : modulus efektif sebagai kombinasi semua sub lapis (psi)
- h_i : tebal sub lapis ke i (in)
- E_i : modulus lapis ke i (psi)

Data Lendutan Fwd

Data lendutan yang dianalisis adalah data sekunder, diambil dari Pedoman 2005 (Pd T-05-2005-B 2005). Lokasi pengukuran lendutan berada pada ruas Jalan Arteri Purwakarta – Plered. Selain tebal lapis permukaan 20 cm, tidak ada informasi tebal lapis lainnya. Dalam penelitian ini diasumsikan tebal lapis pondasi batu pecah sebesar 30 cm (12 in). Sehingga model perkerasan MICHBACK adalah 3 lapis. Untuk keperluan perhitungan metode AASHTO 1993 dan MICHBACK, maka data pada Tabel 1 diubah satuannya menjadi in, mils, psi, dan $^{\circ}\text{F}$ seperti Tabel 2.

HASIL DAN ANALISIS

Hasil perhitungan metode AASHTO 1993 dan MICHBACK disajikan pada Tabel 3.

Tabel 1. Lendutan dengan FWD (metrik)

Km	Teg (kPa)	Lendutan langsung FWD (mm)								Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)				Beban (ton)	FI	Ca	FKI-fwd (mm)	dL
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	Tu	Tp	Tt	Tb	Tl					
82.000	578	0.237	0.181	0.163	0.148	0.119	0.089	0.052	31.0	48.1	39.3	36.5	41.3	4.10	0.9	1.2	1.00	0.250
82.100	579	0.271	0.208	0.181	0.160	0.124	0.086	0.053	31.0	46.0	38.3	35.5	39.9	4.11	0.9	1.2	0.99	0.293
82.200	578	0.278	0.197	0.175	0.153	0.124	0.086	0.053	32.0	47.1	39.3	36.5	40.9	4.10	0.9	1.2	1.00	0.295
82.300	575	0.338	0.238	0.210	0.190	0.147	0.104	0.060	32.0	44.6	38.1	35.3	39.3	4.08	0.9	1.2	1.00	0.372
82.400	575	0.257	0.228	0.215	0.202	0.168	0.128	0.076	32.0	39.3	35.5	32.9	35.9	4.08	1.0	1.2	1.00	0.303
82.500	578	0.223	0.178	0.168	0.156	0.131	0.100	0.058	32.0	44.7	38.1	35.4	39.4	4.10	0.9	1.2	1.00	0.244
82.600	577	0.422	0.280	0.238	0.207	0.156	0.112	0.069	33.0	48.9	40.6	37.8	42.4	4.09	0.9	1.2	1.00	0.437
82.700	584	0.219	0.168	0.156	0.140	0.118	0.087	0.061	33.0	47.2	39.8	37.0	41.3	4.14	0.9	1.2	0.99	0.229
82.800	579	0.352	0.235	0.201	0.173	0.130	0.093	0.057	33.0	47.6	40.0	37.2	41.6	4.11	0.9	1.2	0.99	0.369
82.900	583	0.220	0.170	0.154	0.137	0.114	0.082	0.052	33.0	37.5	35.1	32.5	35.0	4.13	1.0	1.2	0.99	0.261
83.000	585	0.264	0.180	0.157	0.141	0.114	0.081	0.055	33.0	45.7	39.1	36.3	40.4	4.15	0.9	1.2	0.98	0.280
83.100	583	0.189	0.154	0.136	0.123	0.100	0.079	0.049	33.0	43.8	38.2	35.4	39.1	4.13	0.9	1.2	0.99	0.206
83.200	581	0.185	0.150	0.135	0.119	0.095	0.071	0.049	34.0	47.5	40.4	37.6	41.8	4.12	0.9	1.2	0.99	0.192
83.300	579	0.278	0.196	0.165	0.142	0.108	0.077	0.048	34.0	46.6	40.0	37.2	41.3	4.11	0.9	1.2	0.99	0.293
83.400	580	0.252	0.186	0.164	0.146	0.120	0.091	0.056	34.0	45.3	39.4	36.6	40.4	4.11	0.9	1.2	0.99	0.269
83.500	578	0.290	0.215	0.179	0.155	0.118	0.084	0.053	34.0	44.2	38.8	36.1	39.7	4.10	0.9	1.2	1.00	0.315
83.600	576	0.334	0.275	0.235	0.204	0.142	0.096	0.058	34.0	44.5	39.0	36.2	39.9	4.09	0.9	1.2	1.00	0.363
83.700	579	0.401	0.329	0.286	0.251	0.182	0.116	0.064	34.0	44.0	38.7	36.0	39.6	4.11	0.9	1.2	0.99	0.436
83.800	579	0.433	0.340	0.294	0.251	0.227	0.150	0.075	34.0	39.4	36.5	33.9	36.6	4.11	1.0	1.2	0.99	0.500
83.900	579	0.334	0.284	0.251	0.221	0.170	0.115	0.066	34.0	41.5	37.5	34.8	38.0	4.11	0.9	1.2	0.99	0.375
84.000	580	0.277	0.195	0.170	0.149	0.122	0.088	0.055	34.0	45.4	39.4	36.6	40.5	4.11	0.9	1.2	0.99	0.296

Sumber: Pedoman 2005 (Pd T-05-2005-B 2005)

Tabel 2. Lendutan dengan FWD (imperial)

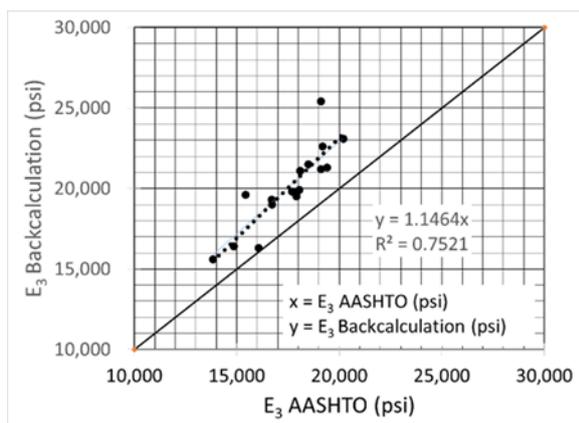
Km	Teg (psi)	Lendutan langsung FWD (mils)							TL ($^{\circ}\text{F}$)
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	
82.000	83.83	9.33	7.13	6.42	5.83	4.69	3.50	2.05	106.3
82.100	83.98	10.67	8.19	7.13	6.30	4.88	3.39	2.09	103.8
82.200	83.83	10.94	7.76	6.89	6.02	4.88	3.39	2.09	105.6
82.300	83.40	13.31	9.37	8.27	7.48	5.79	4.09	2.36	102.7
82.400	83.40	10.12	8.98	8.46	7.95	6.61	5.04	2.76	96.6
82.500	83.83	8.78	6.93	6.54	6.14	5.16	3.94	2.28	102.9
82.600	83.69	16.61	11.02	9.37	8.15	6.14	4.41	2.72	108.3
82.700	84.70	8.62	6.61	6.14	5.51	4.65	3.43	2.40	106.3
82.800	83.98	13.86	9.25	7.91	6.81	5.12	3.66	2.24	106.9
82.900	84.56	8.66	6.69	6.06	5.39	4.49	3.23	2.05	95.0
83.000	84.85	10.39	7.09	6.18	5.55	4.49	3.19	2.17	104.7
83.100	84.56	7.44	6.06	5.35	4.84	3.94	3.11	1.93	102.4
83.200	84.27	7.28	5.91	5.31	4.69	3.74	2.80	1.93	107.2
83.300	83.98	10.94	7.72	6.50	5.59	4.25	3.03	1.89	106.3
83.400	84.12	9.92	7.32	6.46	5.75	4.72	3.58	2.20	104.7
83.500	83.83	11.42	8.46	7.05	6.10	4.65	3.31	2.09	103.5
83.600	83.54	13.15	10.83	9.25	8.03	5.59	3.78	2.28	103.8
83.700	83.98	15.79	12.95	11.26	9.88	7.17	4.57	2.52	103.3
83.800	83.98	17.05	14.88	13.19	11.85	8.94	5.91	2.95	97.9
83.900	83.98	13.15	11.18	9.88	8.70	6.69	4.53	2.60	100.4
84.000	84.12	10.91	7.68	6.69	5.87	4.80	3.46	2.17	104.9

Analisis Modulus Resilien Lapis Tanah Dasar

Modulus resilien, E_3 , dihasilkan dari metode AASHTO 1993 maupun dari backcalculation dengan program MICHBACK, seperti tercantum pada Tabel 2. Secara visual, dari Gambar 2 tampak bahwa modulus resilien MICHBACK lebih besar daripada hasil yang diperoleh dari AASHTO 1993, yaitu 114.6% dari nilai AASHTO.

Tabel 3. Hasil Perhitungan AASHTO dan MICHBACK

Km	E ₃	E _p	SN _{eff}	E ₃	E ₂	E ₁	FK	E ₁ 68F	E _p Back	SN _{eff}
	(psi)	(psi)		(psi)	(psi)	(psi)	68°F	(ksi)	(psi)	
	AASHTO 1993			MICHBACK Backcalculation						
82.000	17,912	404,339	6.66	19,500	85,400	372,600	3.14	1,169	322,227	6.17
82.100	18,082	282,703	5.91	21,100	40,700	380,100	2.98	1,132	242,153	5.61
82.200	18,051	284,798	5.92	19,900	70,700	240,000	3.09	742	227,260	5.49
82.300	14,850	211,517	5.36	16,400	57,800	194,400	2.91	566	178,266	5.07
82.500	16,059	459,008	6.94	16,300	122,300	484,500	2.92	1,415	416,735	6.72
82.600	13,837	178,414	5.07	15,600	48,700	118,800	3.26	387	133,118	4.60
82.700	15,428	579,928	7.51	19,600	106,300	426,500	3.14	1,338	381,054	6.52
82.800	16,721	203,940	5.30	19,000	53,700	150,700	3.17	478	156,646	4.85
82.900	19,096	313,209	6.11	21,200	82,600	450,900	2.41	1,086	304,154	6.05
83.000	19,398	292,516	5.97	21,300	100,900	197,100	3.04	598	234,195	5.55
83.100	19,173	534,247	7.30	22,600	102,500	569,900	2.89	1,645	426,970	6.78
83.200	19,108	665,275	7.86	25,400	67,400	696,500	3.19	2,223	449,889	6.90
83.300	20,196	264,303	5.78	23,100	58,000	223,300	3.14	700	202,774	5.29
83.400	16,690	365,481	6.43	19,300	100,800	262,800	3.04	798	274,912	5.85
83.500	18,481	240,169	5.59	21,500	46,900	256,200	2.96	757	196,102	5.23
84.000	17,702	287,198	5.94	19,800	84,300	209,800	3.05	639	224,387	5.47



Gambar 2. Perbandingan Modulus Resilien AASHTO dan MICHBACK

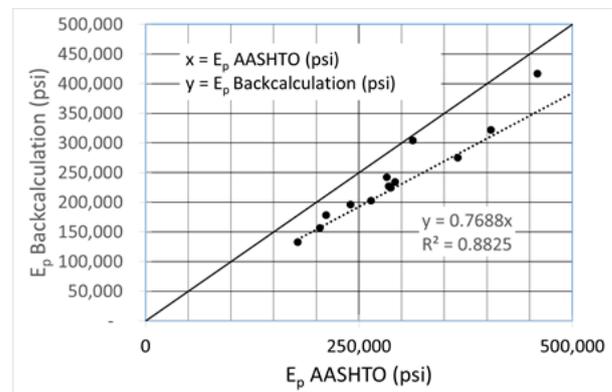
Analisis Modulus Efektif AASHTO dan MICHBACK

Pada proses backcalculation MICHBACK ini perkerasan dimodelkan 3 lapis, yaitu lapis permukaan, lapis pondasi dan lapis tanah dasar. Sehingga akan diperoleh E₁ dan E₂, yaitu dua lapis yang berada di atas lapis tanah dasar. Sebelum modulus ke dua lapis tersebut dapat digabungkan, maka modulus lapis permukaan yang diperoleh (pada temperatur uji lendutan) harus disesuaikan menjadi temperatur standar 68°F, yaitu temperature standar yang digunakan oleh AASHTO. Penyesuaian E₁ pada temperatur standar 68°F dengan prosedur master curve, yaitu menggunakan Pers 9 dan 10.

Konstanta campuran yang diperoleh dari LTPP (Long Term Pavement Performance), yaitu $\delta = 0.711$, $\alpha = 6.261$, $\beta = -1.19$, $\Upsilon = 0.214$, $\alpha_1 = 0.003$, $\alpha_2 = -0.312$, $\alpha_3 = 5.322$. Sedangkan frekuensi beban akibat FWD adalah 18 Hz menurut AASHTO (1993).

Faktor konversi modulus pada temperatur yang bukan standar menjadi standar diperoleh dari rasio modulus temperatur standar terhadap temperatur tertentu. Faktor konversi (FK 68°F) ini ditampilkan pada Tabel 3. Sehingga untuk menyesuaikan modulus campuran beraspal dari MICHBACK pada temperatur pengujian lendutan menjadi pada temperatur standar diperoleh dengan mengalikailah modulus tersebut dengan FK 68°F.

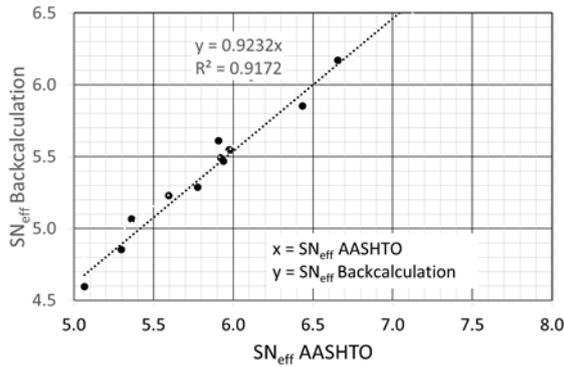
Kemudian ke dua modulus, yaitu E₁ dan E₂ itu digabung menjadi sebuah modulus efektif. Tujuan penggabungan ini, agar modulus dari MICHBACK dapat dibandingkan dengan modulus efektif AASHTO, E_p. Modulus efektif MICHBACK dihitung dengan Pers 11. Perbandingan modulus efektif MICHBACK dengan E_p, seperti terlihat pada Gambar 3. Hasilnya modulus efektif MICHBACK sebesar 76.9% hasil AASHTO.



Gambar 3. Perbandingan Modulus Efektif AASHTO dan MICHBACK

Analisis Nilai Struktur Efektif AASHTO dan MICHBACK

Nilai struktural efektif dihitung dari modulus efektif struktur di atas lapis tanah dasar untuk kedua metode, dengan menggunakan Pers 7. Hasil perbandingan dari keduanya disajikan pada Gambar 4. Dari gambar tampak bahwa nilai struktural efektif backcalculation besarnya 91.7% AASHTO.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Struktural Efektif AASHTO dan MICHBACK

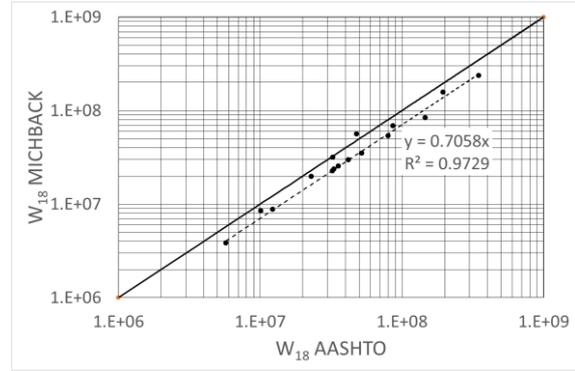
Analisis Umur Sisa AASHTO, MICHBACK dan Pedoman 2005

Nilai SN_{eff} dari masing-masing metode dihitung berdasarkan nilai modulus efektif struktur perkerasan di atas lapis tanah dasar, sesuai dengan Pers. 7. Nilai SN_{eff} MICHBACK lebih kecil daripada AASHTO. Sehingga SN_{eff} AASHTO harus dikalikan dengan faktor 0.9232, agar nilai SN_{eff} AASHTO sama seperti hasil dari MICHBACK.

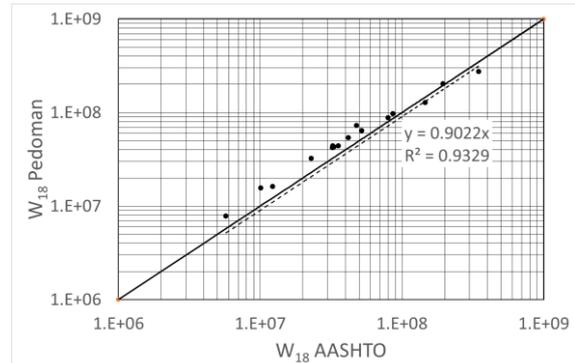
Umur sisa AASHTO dan MICHBACK dihitung menggunakan Pers 8, dengan $p_o = 4.2$, $p_t = 2.5$, tingkat keandalan 90%, serta standar deviasi 0.3. Faktor penyesuaian modulus resilien 0.33 digunakan untuk memperoleh modulus resilien desain. Umur sisa dihitung berdasarkan masing-masing nilai SN_{eff} -nya. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 5. Akhirnya diperoleh umur sisa MICHBACK sebesar 70.5% AASHTO.

Untuk menghitung umur sisa menurut Pedoman 2005, digunakan data lendutan di pusat beban yang telah disesuaikan dengan temperatur standar 35°C, beban standar 4.08 ton dan pengaruh musim, yaitu d_L yang tercantum pada Tabel 1. Umur sisa dihitung dengan Pers 2. Umur sisa Pedoman 90.2% AASHTO, seperti terlihat pada Gambar 6.

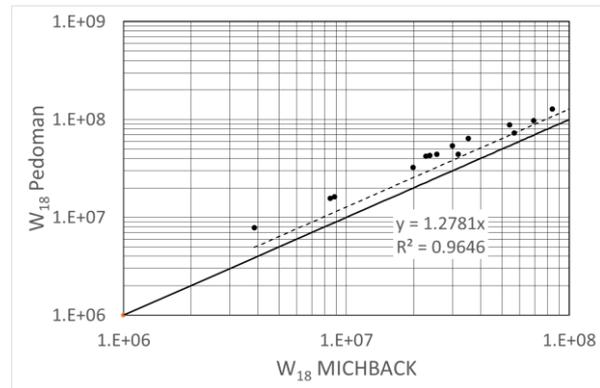
Umur sisa Pedoman 2005 juga dibandingkan dengan umur sisa MICHBACK, dan disajikan pada Gambar 7. Terlihat bahwa umur sisa Pedoman 127.8% umur sisa MICHBACK.



Gambar 5. Perbandingan Umur Sisa AASHTO dan MICHBACK



Gambar 6. Perbandingan Umur Sisa AASHTO dan Pedoman 2005



Gambar 7. Perbandingan Umur Sisa MICHBACK dan Pedoman 2005

PEMBAHASAN

Modulus resilien lapis tanah dasar yang dihitung dengan metode backcalculation MICHBACK, memberikan hasil yang stabil dan tidak banyak dipengaruhi model struktur perkerasan, seperti jumlah lapis dan tebal lapis struktur perkerasan. Sehingga modulus resilien lapis tanah dasar yang diperoleh mempunyai tingkat kepercayaan yang tinggi. Berdasarkan hasil MICHBACK, apabila tujuan evaluasi

perkerasan lentur dengan pengukuran lendutan FWD dengan Metode AASHTO, adalah mengevaluasi modulus resiliensi lapis tanah dasar, maka modulus resiliensi AASHTO perlu dikali dengan faktor 1.146.

Modulus efektif antara AASHTO dan MICHBACK juga berbeda, sehingga SN_{eff} yang dihasilkan AASHTO harus dikalikan dengan faktor 0.9232, agar nilai SN_{eff} -nya seperti yang diperoleh dari MICHBACK. Perbedaan SN_{eff} AASHTO yang harus dikalikan dengan faktor 0.9232 ini berdampak terhadap desain tebal lapis tambah yang harus lebih tebal pada metode AASHTO.

Namun dalam desain, umur sisa perkerasan lebih menjadi perhatian dibandingkan modulus efektif. Maka dihitung umur sisa berdasarkan modulus perkerasan yang diperoleh dari masing-masing metode. Umur sisa dihitung menggunakan rumus yang sama yaitu AASHTO, agar umur sisa yang diperoleh tidak disebabkan oleh perbedaan transfer function.

Hasilnya adalah umur sisa MICHBACK 70.6% umur sisa AASHTO. Apabila metode backcalculation dijadikan acuan, maka prediksi umur sisa AASHTO perlu dikoreksi dengan faktor 0.706.

Pedoman 2005 dan AASHTO 1993 berdasarkan pendekatan. Namun demikian, jika umur sisa keduanya diperbandingkan, maka umur sisa Pedoman lebih kecil daripada AASHTO, yaitu 90% umur sisa AASHTO.

Dibandingkan dengan prediksi umur sisa MICHBACK, prediksi umur sisa Pedoman 2005 lebih besar daripada metode backcalculation, yaitu 127.8% umur sisa MICHBACK. Apabila umur sisa MICHBACK dijadikan acuan, maka prediksi umur sisa Pedoman 2005 perlu dikoreksi dengan faktor 0.78.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Metode AASHTO yang berasal dari prinsip backcalculation yang disederhanakan ternyata memberi hasil akhir yang berbeda dibandingkan dengan metode backcalculation yang sesungguhnya (MICHBACK). Hasil yang berbeda diperoleh untuk modulus resiliensi, modulus efektif, serta nilai struktural efektif.

Untuk modulus resiliensi lapis tanah dasar, prediksi AASHTO perlu dikoreksi dengan faktor 1.146. Nilai struktural efektif AASHTO perlu dikoreksi dengan faktor 0.9232, dengan akibat tebal lapis tambah harus lebih tebal.

Dampak perbedaan hasil modulus perkerasan (yaitu modulus resiliensi dan modulus efektif struktur perkerasan) mengakibatkan umur sisa AASHTO lebih besar daripada umur sisa MICHBACK. Agar prediksi umur sisa AASHTO menjadi sama dengan umur sisa MICHBACK, maka perlu digunakan faktor 0.706.

Teori dasar Pedoman 2005 berbeda daripada metode AASHTO dan backcalculation. Namun begitu, jika umur sisa Pedoman disamakan dengan umur sisa MICHBACK, maka umur sisa Pedoman perlu dikoreksi dengan faktor 0.78.

Saran

Data yang lebih banyak dari berbagai kondisi struktur perkerasan lentur akan memberi keyakinan yang lebih besar dari kesimpulan yang diambil dari data yang terbatas pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Austroroads. 2011. *Guide to Pavement Technology Part 5, Pavement Evaluation and Treatment Design*. Sydney, Australia: Austroroads.
- Bonaquist, R. 2008. *Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice, NCHRP Report 614*. Washington, DC: Transport Research Board.
- Flintsch, G W, J Bryce, and S Katicha. 2014. "Capabilities and Potential Applications of Continuous Pavement Deflection Measuring Devices." *Geo-Congress*. ASCE. 2365-2381.

- Mahmood, T. 1993. *Backcalculation of Pavement Layer Properties from Deflection Data*. East Lansing, MI: Michigan State University.
- No 12-SE-M-2013. 2013. *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- 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.
- Siegfried. 2018. "LWD Pusjatan Sebagai Alat Alternatif Dalam Mengevaluasi Perkerasan Lentur." *Jurnal Jalan-Jembatan, Vol 35 No 2* 75-83.
- Smith, KD, JE Bruinsma, MJ Wade, K Chatti, JM Vande, and HT Yu. 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report, FHWA-HRT-16-009*. McLean, VA: FHWA, Research, Development, and Technology, Turner Fairbank Highway Research Center.