

PENENTUAN NILAI MODULUS ELASTISITAS PERKERASAN LENTUR MENGGUNAKAN METODE PERHITUNGAN BALIK

Rizky Rahmawati
MSTT DTSL FT
Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika 2, Kampus UGM
Sleman DIY 55281
rizky.rahmaw@mail.ugm.ac.id

Latif Budi Suparma
MSTT DTSL FT
Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika 2, Kampus UGM
Sleman DIY 55281
lbsuparma@ugm.ac.id

Suryo Hapsoro Tri Utomo
MSTT DTSL FT
Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika 2, Kampus UGM
Sleman DIY 55281
suryohapsoro@ugm.ac.id

Abstract

Back-calculation is a method of analyzing the material properties of a pavement, which is supported by field testing in the form of Non-Destructive Testing using the Falling Weight Deflectometer. Analysis of the material properties gives the value of the modulus of elasticity, with the input data in the form of deflection of the results of the Falling Weight Deflectometer test. The back calculation in this study was carried out with the support of the ELMOD 6.0 computer program, and resulted in the root means square and backcalculated moduli values. As a case study, the Janti (Yogyakarta)-Prambanan (Central Java Province Boundary) road section was selected. The results obtained indicate that the modulus of elasticity in the north section for the Hot Mix Asphalt layer is 1401.31 MPa, for the base layer is 597.75 MPa, for the subbase layer is 116.79 MPa, and for the subgrade layer is 96.15 MPa. While in the south section, the modulus of elasticity for the Hot Mix Asphalt layer, base layer, subbase layer, and subgrade layer are 976.80 MPa, 128.22 MPa, 104.59 MPa, and 75.68 MPa, respectively.

Keywords: back-calculation; road pavement; material properties; deflection; modulus of elasticity

Abstrak

Perhitungan balik merupakan suatu metode analisis *material properties* suatu perkerasan jalan, yang didukung dengan pengujian lapangan berupa *Non-Destructive Testing* menggunakan alat Falling Weight Deflectometer. Analisis terhadap *material properties* memberikan nilai modulus elastisitas, dengan *input* data berupa lendutan hasil pengujian Falling Weight Deflectometer. Perhitungan balik pada studi ini dilakukan dengan bantuan program komputer ELMOD 6.0, dan menghasilkan nilai *root means square* dan *backcalculated moduli*. Sebagai studi kasus dipilih ruas Jalan Janti (Yogyakarta)-Prambanan (Batas Provinsi Jawa Tengah). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas pada ruas utara untuk lapis Hot Mix Asphalt sebesar 1401,31 MPa, untuk lapis base sebesar 597,75 MPa, untuk lapis subbase sebesar 116,79 MPa, dan untuk lapis subgrade sebesar 96,15 MPa. Sedangkan pada ruas selatan, nilai modulus elastisitas pada lapis Hot Mix Asphalt, lapis base, lapis subbase, dan lapis subgrade berturut-turut adalah 976,80 MPa, 128,22 MPa, 104,59 MPa, dan 75,68 MPa.

Kata-kata kunci: perhitungan balik; perkerasan jalan; *material properties*; lendutan; modulus elastisitas

PENDAHULUAN

Material properties merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam perancangan perkerasan. *Material properties* tersebut dapat merepresentasikan kondisi perkerasan eksisting. Berbagai metode dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *material properties*, dan salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode perhitungan balik (*backcalculation*).

Perhitungan balik secara sistematis merupakan pendekatan probabilistik dalam melakukan estimasi *material properties*, yang dalam hal ini adalah nilai modulus elastisitas perkerasan. Nilai modulus ini harus semaksimal mungkin sesuai dengan kondisi eksisting, dan diperoleh dengan menggunakan cara *Non-Destructive Testing* (NDT), yang merupakan pengujian perkerasan lentur yang bersifat tidak merusak (Guzzarlapudi et al., 2017).

Falling Weight Deflectometer (FWD) digunakan sebagai alat uji permukaan perkerasan yang termasuk dalam pengujian NDT, dengan menggunakan sensor *geophone* untuk mengetahui nilai lendutan pada perkerasan lentur. Sensor pada *geophone* merekam rambatan getaran, yang kemudian dibaca sebagai lendutan, yang dipengaruhi oleh jarak, waktu, dan temperatur. Faktor utama yang memengaruhi lendutan perkerasan saat menggunakan alat uji FWD adalah ketebalan lapisan perkerasan, jenis material lapisan, kualitas bahan, dukungan tanah dasar, faktor lingkungan, diskontinuitas perkerasan, dan variabilitas dalam struktur perkerasan.

Output dari FWD berupa nilai *deflection* pada setiap *geophone*, yang dapat digambarkan dengan *deflection basin*, sehingga lebih memudahkan dalam pembacaan nilai *deflection* pada perkerasan di tiap titik pengujian. *Deflection basin* merupakan suatu grafik dengan sumbu x menyatakan jarak antar *geophone* dan sumbu y menyatakan nilai *deflection* pada tiap titik dengan satuan *micron*. Nilai *deflection* menjadi *input* untuk analisis perhitungan balik, yang pada studi ini menggunakan program pengolahan komputer ELMOD 6.0.

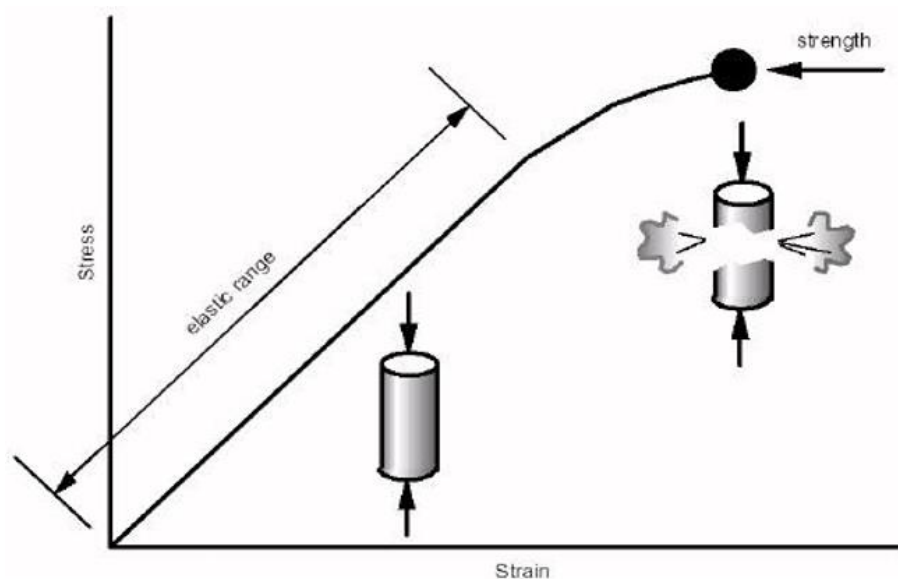
ELMOD 6.0 dikembangkan oleh Dynatest Amerika Serikat, yang digunakan untuk menganalisis nilai *deflection* di permukaan dengan menggunakan berbagai metode pengukuran, seperti *Finite Element Module* (FEM) dengan Teori Linear Elastis (LET) atau *Method of Equivalent Thickness* (MET), modul *deflection basin*, dan modul radius kelengkungan (*radius of curvature module*). ELMOD 6.0 merupakan salah satu contoh modul radius kelengkungan dengan metode iteratif untuk memperkirakan *layer moduli* pada metode perhitungan balik yang mengadaptasi teori pendekatan *equivalent thicknesses* oleh Odemark-Boussinesq. *Input* dalam analisis menggunakan ELMOD 6.0 adalah nilai *seed moduli* atau nilai modulus elastisitas asumsi yang digunakan dalam perancangan suatu ruas jalan, nilai *Poisson's ratio*, tebal dan jenis perkerasan, dan temperatur perkerasan pada saat pengujian lapangan. *Output* yang dihasilkan berupa *back-calculated moduli* tiap lapis dan *root means square* (RMS). Nilai RMS ini merupakan perbandingan *measured moduli* dan *calculated moduli*.

Nilai *back-calculated moduli* dan RMS kemudian diklasifikasi dalam kelompok skenario dengan berlandaskan pada Bruinsma (2017). Klasifikasi skenario didasarkan pada nilai RMS dan *back-calculated moduli* yang masuk dalam nilai ambang batas. Bruinsma (2017) memberikan syarat nilai ambang batas untuk RMS adalah maksimal 2% hingga 3% terhadap nilai ambang dan nilai *back-calculated moduli* adalah 0,25 hingga 5 kali *seed moduli* yang digunakan. Nilai modulus elastisitas diperoleh dengan perhitungan nilai persentil kesepuluh (10th *percentile*) *back-calculated moduli* pada tiap lapis perkerasan. Persentil kesepuluh mempunyai arti bahwa terdapat 10% data bernilai lebih kecil atau sama

dengan nilai modulus elastisitas pada *percentile* tersebut, atau 90% keseluruhan data bernilai lebih besar atau sama dengan nilai modulus elastisitas pada persentile kesepuluh tersebut (Wirawan, 2016). Hal ini dilaksanakan untuk mengetahui nilai *back-calclated moduli* yang mewakili nilai modulus elastisitas tiap lapis.

Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas (E) atau disebut juga Young Modulus dikembangkan oleh Thomas Young pada tahun 1807. Modulus elastisitas ini dapat digunakan pada setiap material padat yang merepresentasikan nilai rasio yang konstan pada tegangan dan regangan. Suatu material dikatakan bersifat elastis jika material tersebut dapat kembali ke bentuk atau ukuran semula setelah diberi tegangan atau beban. Semua material memiliki sifat elastis pada derajat tertentu, selama beban yang diberikan tidak menimbulkan deformasi atau perubahan bentuk secara permanen. Modulus elastisitas suatu material umumnya merupakan *slope* atau kemiringan, yang merupakan gambaran tegangan dan regangan pada rentang elastis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Sumber: Pavement Interactive (2021)

Gambar 1 Tegangan dan Regangan yang Digambarkan pada Rentang Elastis

Garis awal kurva menunjukkan bahwa material tersebut berada pada rentang elastis. Ketika beban diberikan kepada material dengan nilai tertentu pada garis kurva yang termasuk pada rentang elastis, material tersebut akan kembali ke bentuk semula. Nilai modulus dikatakan rendah ketika material meregang banyak saat diberikan tegangan, atau sebaliknya, material yang meregang sangat sedikit memiliki nilai modulus yang tinggi.

Nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*) merupakan *input* nilai modulus elastisitas awal yang digunakan sebagai asumsi dalam analisis perhitungan balik dengan ELMOD 6.0. Nilai *seed moduli* didasarkan pada nilai yang dikeluarkan oleh Federal

Highway Administration (FHWA) pada tahun 2017. Bruinsma (2017) mengelompokkan nilai *seed moduli* berdasarkan lapis perkerasan. *Initial modulus* merupakan nilai *seed moduli* yang diasumsikan sebagai modulus elastisitas eksisting dan *range moduli* atau *back-calculated moduli* merupakan nilai hasil analisis perhitungan balik. Bruinsma (2017) mengeluarkan nilai *seed moduli* untuk lapis pondasi atas (*base*) untuk kondisi tanah stabil (*stabilized material*) dan kondisi tanah tidak stabil (*unstabilized material*). Tabel 1 menunjukkan nilai modulus elastisitas pada kondisi tanah *stabilized material*, sedangkan Tabel 2 menunjukkan nilai modulus elastisitas pada lapis tanah dasar (*subgrade*). Bruinsma (2017) mensyaratkan bahwa lapis *Hot Mixed Asphalt* (HMA), yang pada studi ini berupa lapis AC-WC dan AC-BC, yang mengalami *fatigue* memiliki nilai *back-calculated moduli* berkisar antara 700 MPa hingga 1400 MPa pada temperatur normal 25°C (77°F). Estimasi nilai modulus elastisitas lapis HMA berada pada rentang 0,25 hingga 5 kali nilai *initial moduli*.

Tabel 1 Nilai *Seed Moduli* Lapis *Base* pada *Stabilized Material*

Type Material	Initial Moduli (MPa)	Moduli Range (MPa)
<i>Asphalt treated</i>	700–1.400	700–25.000
<i>Sand asphalt</i>	700–1.400	700–25.000
<i>Fracture PCC</i>	3.000–3.500	700–20.000
<i>Cement aggregate mixture</i>	3.000–3.500	2.000–20.000
<i>Lean concrete</i>	4.000–5.000	4.500–45.000
<i>Cement treated</i>	1.400–2.000	700–3.000
<i>Lime treated</i>	200–300	35–1.500
<i>Soil cement</i>	2.000–3.500	1.000–7.000

Sumber: Bruinsma (2017)

Tabel 1 Nilai *Seed Moduli* pada Lapis *Subgrade*

Material	Dry (MPa)	Wet-No Freeze (MPa)	Wet-Freeze Unfrozen (MPa)	Wet-Freeze Frozen (MPa)
<i>Clay</i>	103	41	41	345
<i>Silt</i>	103	41	34	345
<i>Silty or clayey sand</i>	138	69	34	345
<i>Sand</i>	172	172	172	345
<i>Silty or clayey gravel</i>	276	207	138	345
<i>Gravel</i>	345	345	276	345

Sumber: FHWA (2017)

Poisson's Ratio

Poisson's ratio didefinisikan sebagai rasio regangan horizontal (*lateral strain*) dan regangan vertikal (*axial strain*), yang disebabkan oleh beban sejajar sumbu dan regangan aksial (Yoder and Witczak, 1975). Umumnya material akan memberikan nilai *Poisson's ratio* lebih rendah jika material tersebut bersifat lebih kaku, sedangkan material dengan bahan yang lebih lembut atau lunak akan memberikan nilai *Poisson's ratio* yang lebih besar.

Nilai *Poisson's ratio* yang digunakan pada analisis perhitungan balik menggunakan Metode FHWA (Bruinsma, 2017) ditunjukkan pada Tabel 3. Karakterisasi material perkerasan umumnya berdasarkan nilai modulus elastisitas dan nilai *poisson's ratio*. Asumsi nilai *poisson's ratio* dapat digunakan dalam desain dengan perhitungan mekanistik–empirik, karena perhitungan dalam perancangan menghasilkan nilai yang tidak terlalu sensitif.

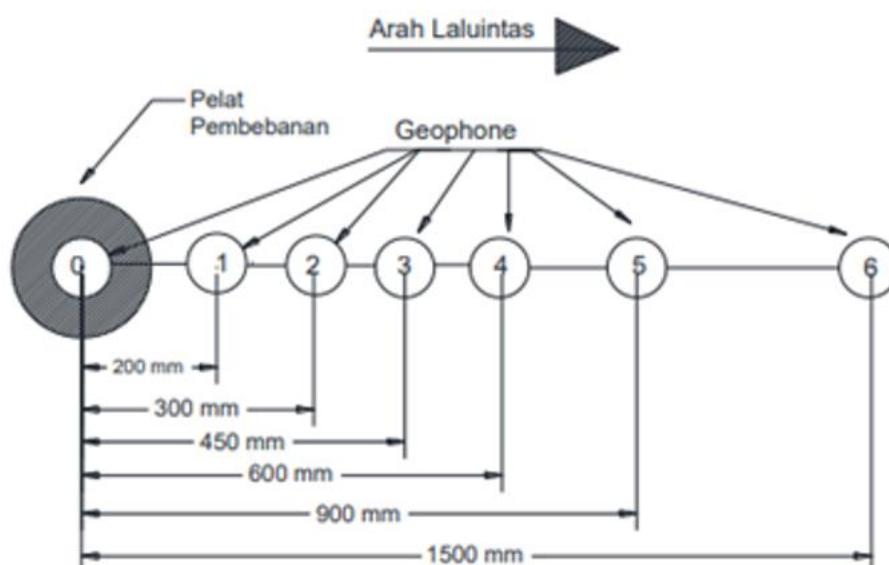
Tabel 3 Nilai Poisson's Ratio

Typical Material	Poisson's Ratio
HMA	0,35
PCC	0,15–0,20
Stabilized base or subbase	0,25–0,35
Unstabilized base or subbase	0,35
Cohesive (fine grain) subgrade soils	0,45
Cohesion less (coarse grain) subgrade soils	0,35–0,40
Stiff layer	0,35 or less

Sumber: FHWA (2017)

Falling Weight Deflectometer

Falling Weight Deflectometer (FWD) digunakan sebagai alat uji permukaan perkerasan yang termasuk dalam pengujian yang bersifat tidak merusak atau *non-destructive testing* (NDT). Alat ini menggunakan sensor *geophone* untuk mengetahui nilai lendutan pada perkerasan lentur. FWD terdiri atas pelat pembebanan dengan diameter 30 cm, *load cell*, *geophone*, *odometer*, sensor untuk mengukur temperatur, dan sebuah prosesor. Proses pengujian FWD pada perkerasan lentur menggunakan 7 buah *geophone* dengan konfigurasi 0 mm, 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm, dan 1500 mm, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2 (Kementerian PUPR, 2019).



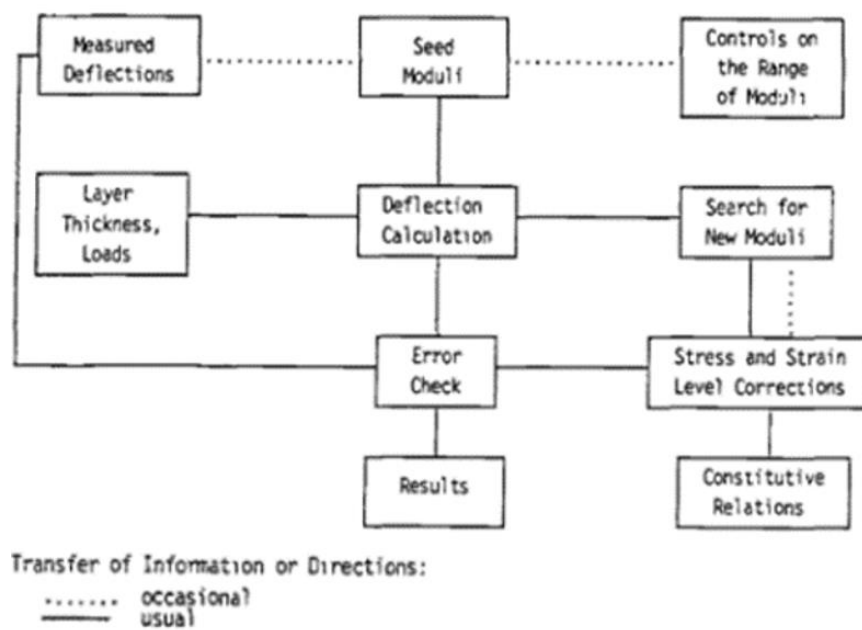
Sumber: Kementerian PUPR (2019)

Gambar 2 Konfigurasi Pengujian FWD dengan Geophone

Faktor utama yang memengaruhi lendutan perkerasan saat menggunakan alat uji FWD adalah ketebalan lapisan perkerasan, jenis material lapisan, kualitas bahan, dukungan tanah dasar, faktor lingkungan, diskontinuitas perkerasan, dan variabilitas dalam struktur perkerasan. Selain itu, kualitas data yang diperoleh juga dipengaruhi oleh peralatan yang digunakan, sehingga pemeliharaan dan perawatan peralatan FWD perlu dilakukan secara teratur.

Perhitungan Balik

Lytton (1989) menerangkan bahwa metode perhitungan balik (*backcalculation*) merupakan suatu metode analisis material *Non-Destructive Testing* (NDT) dengan prosedur *in-situ* (*in-place*), sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat menggambarkan keadaan asli di lapangan. Perhitungan balik pada NDT menghasilkan properti material perkerasan yang terkait dengan penentuan korelasi yang sesuai dalam pembuatan *deflection bowl*. Tahapan perhitungan balik dengan program komputer dapat dilihat pada Gambar 3 (Lytton, 1989).



Sumber: Lytton (1989)

Gambar 3 Tahapan Perhitungan Balik dengan Program Computer

Lytton (1989) menjelaskan tentang parameter dan alur prosedur perhitungan dalam perhitungan balik, yang ditunjukkan pada Gambar 3, dengan memperhatikan lendutan terukur (*measured deflection*), tebal lapis perkerasan, nilai beban kendaraan, nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*), lendutan teranalisis (*calculated moduli*), *error check* yang dalam hal ini menggunakan penjumlahan kuadrat diferensiasi antara *measured deflection* dan *calculated deflection*, dan hasil yang terdiri atas hasil pengukuran dan perhitungan lendutan (*measured and calculated moduli*), diferensiasi, persentase diferensiasi, hasil perhitungan modulus elastisitas (*backcalculated moduli*), dan penjumlahan kesalahan.

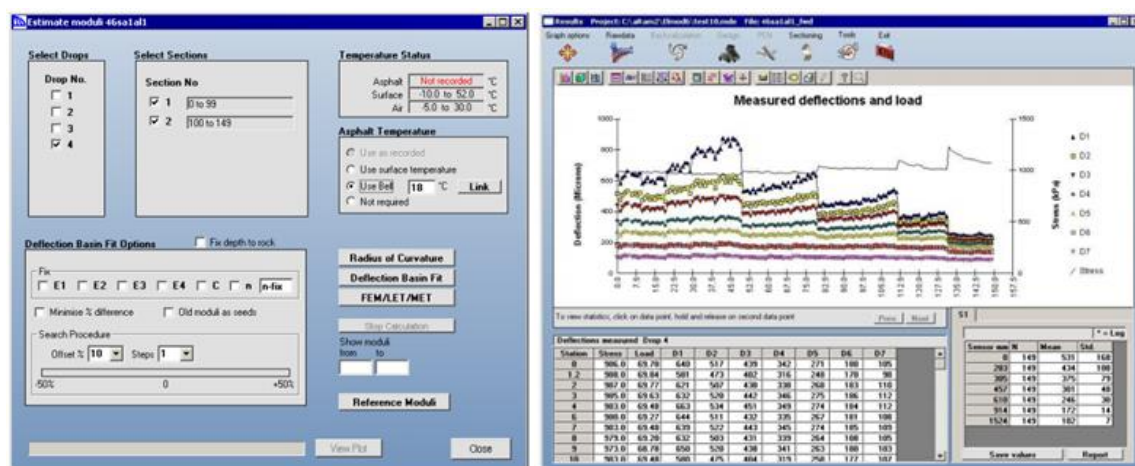
ELMOD 6.0

Program ELMOD 6.0 merupakan program untuk menganalisis defleksi permukaan dengan menggunakan berbagai modul pengukuran, seperti *Finite Element Module* (FEM) dengan teori linear elastis (LET) atau *Method of Equivalent Thickness* (MET), modul *deflection basin*, dan modul radius kelengkungan (*radius of curvature module*). ELMOD 6.0 merupakan salah satu contoh modul radius kelengkungan dengan metode iteratif untuk memperkirakan *layer moduli* pada metode perhitungan balik. Metode ini mengadaptasi teori pendekatan *equivalent thicknesses* oleh Odemark-Boussinesq. *Layer moduli* dihitung berdasarkan defleksi perkerasan keseluruhan terhadap beban yang diberikan, yang dapat diperkirakan setelah pelaksanaan kalibrasi nilai ketebalan *seed values* dan defleksi sesuai dengan persamaan transformasi yang dikembangkan oleh Odemark pada tahun 1949 (Drenth, 2006).

Dalam *multi-layered elastic system*, model pada struktur perkerasan merupakan *linear elastic*, yang mana material dikarakterisasi dengan Young's Modulus of Elasticity (E) dan Poisson's ratio (ν). Kriteria utama dalam analisis desain mempertimbangkan:

- 1) *the horizontal tensile strain* yang terletak di bawah lapisan beraspal atau *flexural stress* pada permukaan perkerasan kaku;
- 2) *the horizontal tensile strain or flexural stress* yang terletak di bawah *cement bound* pada lapisan *base* atau lapisan *subbase*;
- 3) *the vertical compressive stress* yang terletak di atas *cement bound* pada lapisan *base* atau lapisan *subbase*;
- 4) *the vertical compressive strain* yang terletak di atas *unbound base* dan *subbase*; dan
- 5) *the vertical compressive strain* yang terletak di atas lapisan *subgrade*.

Menurut *Quick Start Manual* ELMOD 6.0, yang diterbitkan oleh Dynatest, parameter yang dapat digunakan sebagai input ELMOD 6.0 mendefinisikan lingkungan lokal, karakteristik lalulintas, dan karakteristik kinerja material. ELMOD 6.0 memungkinkan pengguna untuk dapat membuat dan menyesuaikan parameter di hampir segala kondisi (lihat Gambar 4).



Gambar 4 Perhitungan Balik dengan Program ELMOD 6.0

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data dan literatur yang terkait dengan perhitungan balik yang menggunakan hasil pengujian lapangan berupa *non-destructive testing* (NDT). Penelitian ini menggunakan pengujian NDT, dengan menggunakan alat Falling Weight Deflectometer (FWD), yang menganalisis data lendutan (*deflection*) sebanyak 24 titik pengujian di ruas Jalan Janti (Yogyakarta)-Prambanan (Batas Provinsi Jawa Tengah) di kedua arah. *Output* pengujian dengan alat FWD tersebut adalah data nilai lendutan di tiap titik pengujian yang menjadi *parameter input* pada ELMOD 6.0.

ELMOD 6.0 merupakan sebuah program komputer yang digunakan dalam analisis *material properties* perkerasan, yaitu nilai modulus elastisitas yang sesuai dan menggambarkan kondisi eksisting. *Input* pada ELMOD 6.0 adalah *material properties*, yang terdiri atas nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*), nilai *poisson's ratio*, *deflection data*, temperatur perkerasan pada saat pengujian FWD, dan tebal tiap lapis perkerasan. Nilai-nilai *seed moduli* dan *poisson's ratio* berlandaskan pada FHWA (2017), yang disesuaikan dengan penggunaannya di Indonesia. *Deflection data* dan temperatur perkerasan merupakan *output* pengujian FWD.

Analisis dengan ELMOD 6.0 menggunakan metode *deflection basin fit*, dengan *output* berupa nilai *backcalculated moduli* dan nilai RMS yang menggambarkan nilai *convergence error* dengan landasan FHWA (2017). Analisis nilai RMS umumnya berkisar antara 1% hingga 3% dari nilai ambang. Nilai *backcalculated moduli* divalidasi dengan menggunakan landasan FHWA (2017), dengan mempertimbangkan kesesuaian nilai modulus elastisitas atau *reasonable backcalculated moduli*. *Reasonable backcalculated moduli* menggunakan syarat nilai yang berada pada rentang 0,25 hingga 5 kali nilai *initial moduli* atau *seed moduli*. Hasil analisis dikelompokkan dalam beberapa skenario untuk kemudahan dalam pembacaan hasil analisis.

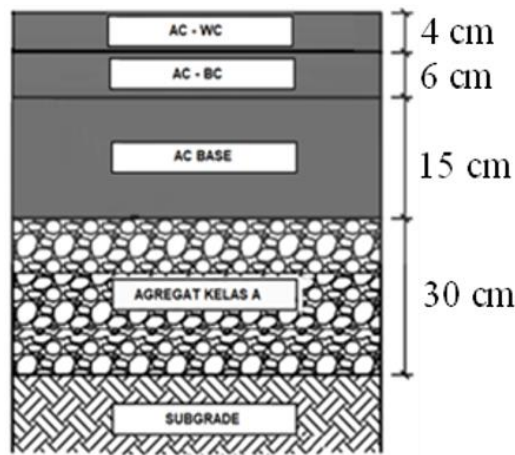
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Lendutan

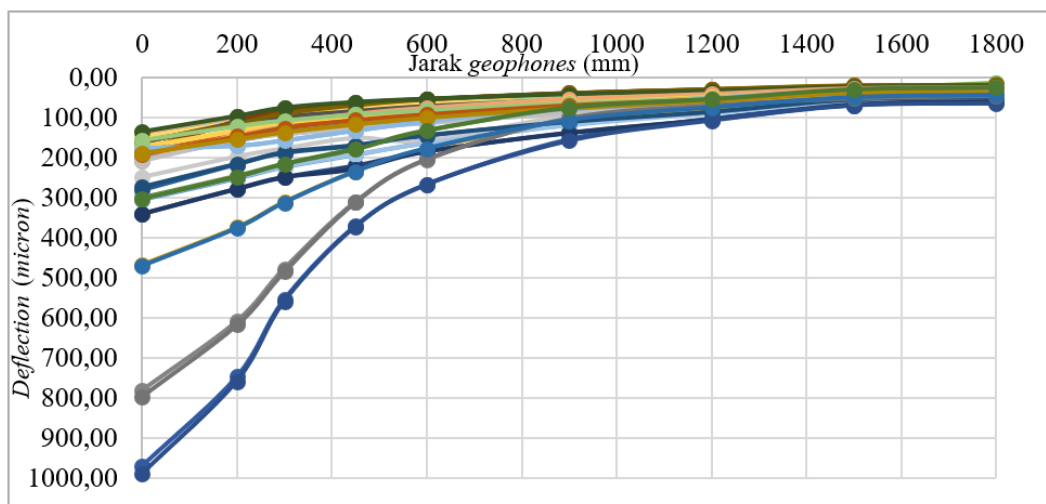
Data lendutan *output* pengujian lapangan berupa data *Microsoft access*. Data lendutan ini terdiri atas hasil pembacaan lendutan melalui *geophones*, yang diletakkan pada jarak 0 mm, 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm, 1500 mm, dan 1800 mm. Temperatur perkerasan terukur di tiap titik pengujian FWD, yang terdiri atas temperatur perkerasan beraspal, permukaan perkerasan, dan udara. Pada pengujian FWD, nilai *force* dan *stress* yang diberikan pada permukaan perkerasan ditunjukkan pada tiap titik pengujian. Nilai *force* yang digunakan menggunakan landasan Pedoman Cara Uji Lendutan Permukaan Jalan dengan Falling Weight Deflectometer (FWD) Pd 03-2018-B (2018), yaitu sebesar 41 kN. Pada penelitian ini diunakan nilai *force* rata-rata sebesar 41,35 kN. *Drop* yang dilaksanakan sebanyak 2 kali, dengan *drop* pertama berlaku sebagai penyesuaian perletakan

pelat pembebanan pada permukaan perkerasan, sedangkan *drop* kedua untuk pengambilan data pengujian.

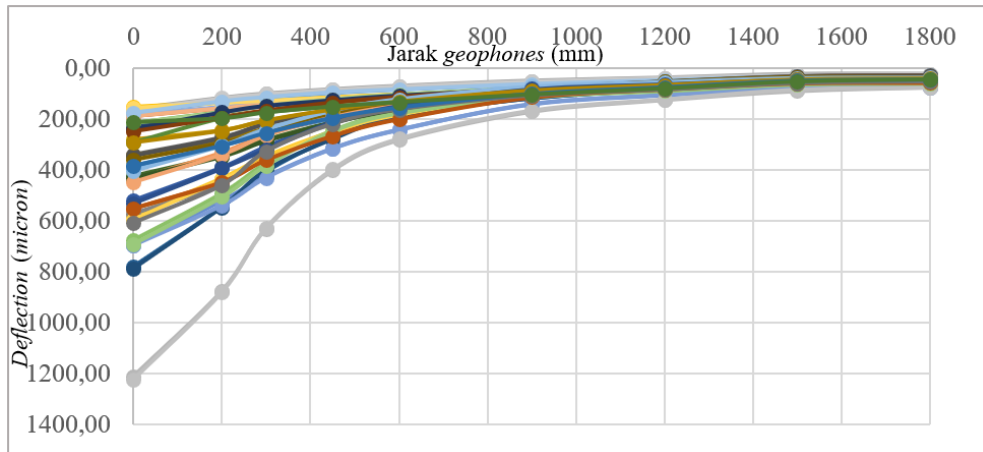
FWD dilaksanakan pada perkerasan lentur dengan ketebalan tiap lapis sesuai dengan yang terdapat pada Gambar 5. Pembacaan data *deflection* dikonversikan menjadi *deflection basin* untuk menunjukkan detail analisis pembacaan hasil FWD. *Deflection basin* membaca grafik data *deflection* dengan menggambarkan sisi luar *deflection basin*, yang menunjukkan sifat kekakuan pada *subgrade*, sedangkan bentuk *deflection basin* yang dekat dengan *loading plate* atau sumber beban menunjukkan kekakuan lapis permukaan. Nilai *deflection* ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu komposisi dan kekuatan struktur perkerasan, ukuran beban pada *contact area*, *long magnitude*, durasi beban, *the measuring device used*, dan temperatur, sehingga memengaruhi bentuk dan ukuran *deflection basin* (Horak, 2008). Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan *deflection basin* pengujian FWD lapangan di tiap ruas jalan.



Gambar 5 Tebal tiap lapis perkerasan lentur

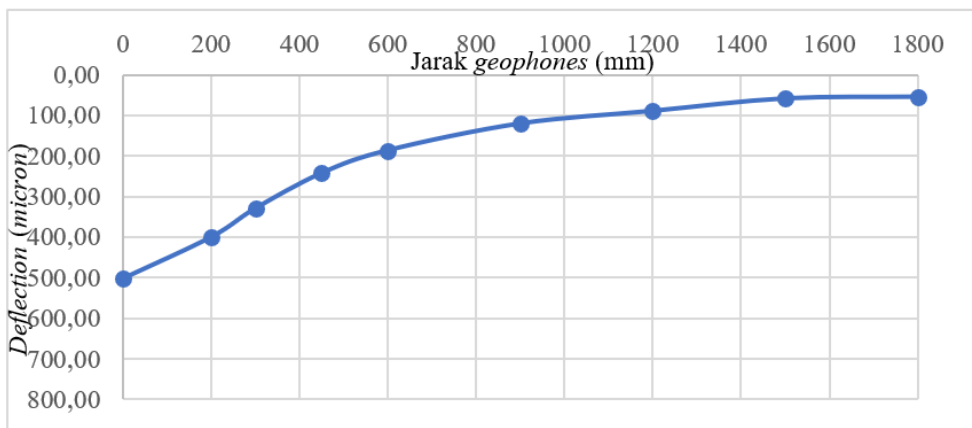


Gambar 6 Deflection Basin Ruas Utara

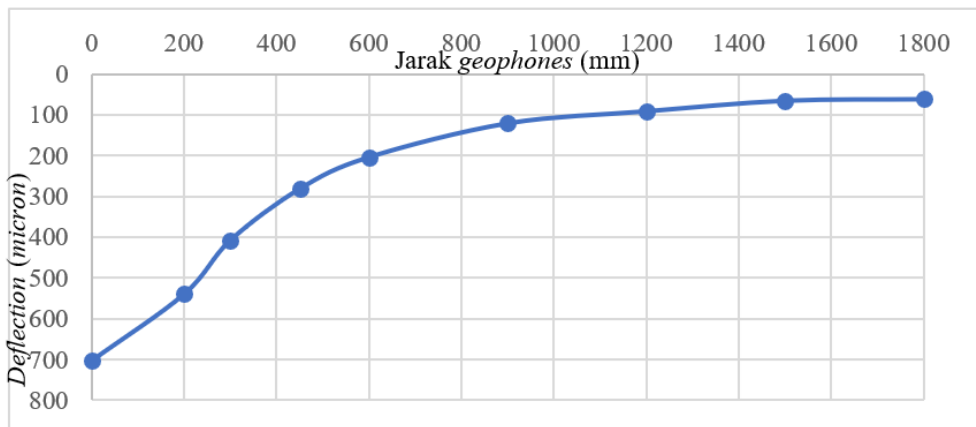


Gambar 7 Deflection Basin Ruas Selatan

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 terlihat bahwa dengan menggunakan persentil ke-10 data FWD, ruas selatan memiliki sifat perkerasan yang lebih kaku pada permukaan. Perbandingan hasil analisis persentil ke-10 data FWD ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8 Persentil Ke-10 Data FWD pada Ruas Utara



Gambar 9 Persentil Ke-10 Data FWD pada Ruas Selatan

Parameter Input ELMOD 6.0

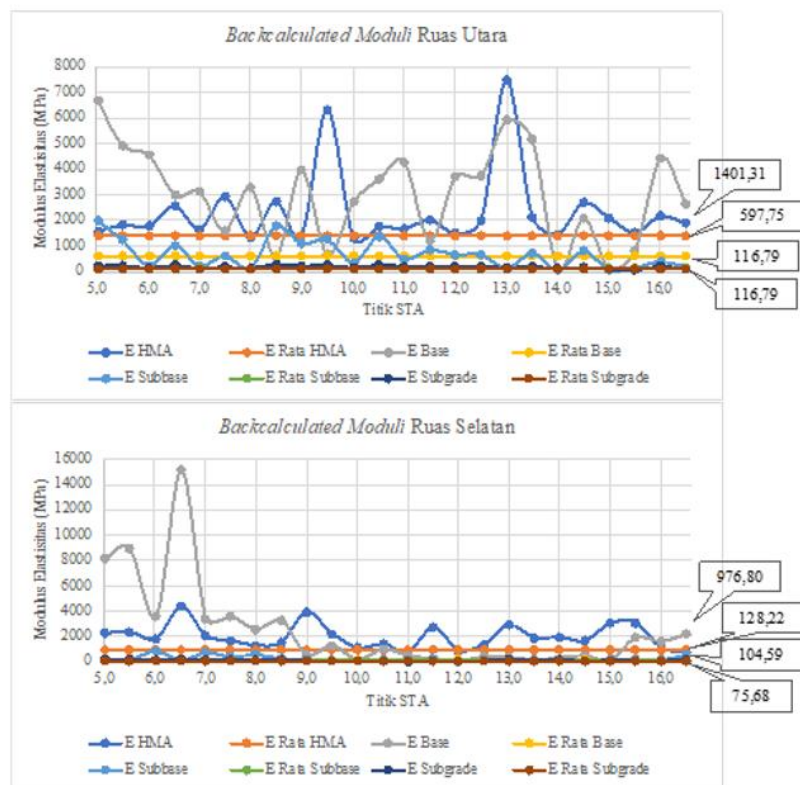
Program ELMOD 6.0 menggunakan data *output* FWD dengan *extention* berupa *Microsoft Access*. Data FWD kemudian dimasukan dan secara otomatis akan terbaca oleh ELMOD 6.0 pada halaman utama. Data FWD dapat dikontrol pada *review data* yang tertera pada *option window*. *Review data* ini menampilkan beberapa detail data pembacaan hasil FWD, yang di antaranya adalah nilai defleksi FWD, *station*, temperatur, *stress*, *load*, *drop*, dan jarak antar *geophones*. *Input* data pada ELMOD 6.0 dilakukan pada bagian *structure* (lihat Tabel 4).

Tabel 4 Parameter *Input* Program ELMOD 6.0

Layer	Deskripsi	Poisson's Ratio	Seed Moduli (Mpa)	Tebal Tiap Lapis (cm)	Temperatur Ruas Utara (°C)	Temperatur Ruas Selatan (°C)
1	HMA	0,35	1400	10		
2	Base	0,35	1000	15		
3	Aggregate kelas A	0,35	200	30	48,39	44,13
4	Subgrade	0,45	60	-		

Output ELMOD 6.0

Produk hasil analisis dengan program ELMOD 6.0 adalah *backcalculated moduli* dan nilai RMS. Hasil analisis menggunakan ELMOD 6.0 ini ditampilkan dalam bentuk grafik, sehingga memudahkan dalam pengambilan kesimpulan nilai modulus elastisitas yang sesuai dengan kondisi eksisting atau *backcalculated moduli*.



Gambar 10 *Backcalculated Moduli* pada Ruas Utara dan Ruas Selatan

Gambar 10 menunjukkan fluktuasi *back-calculated moduli* pada ruas utara (a) dan ruas selatan (b). Grafik untuk ruas utara menunjukkan fluktuasi yang lebih variatif dengan nilai modulus elastisitas yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi eksisting perkerasan lentur pada ruas utara memiliki sifat lebih elastis. Faktor utama yang memengaruhi sifat elastisitas perkerasan tersebut adalah kondisi eksisting perkerasan saat dilaksanakan pengujian FWD.

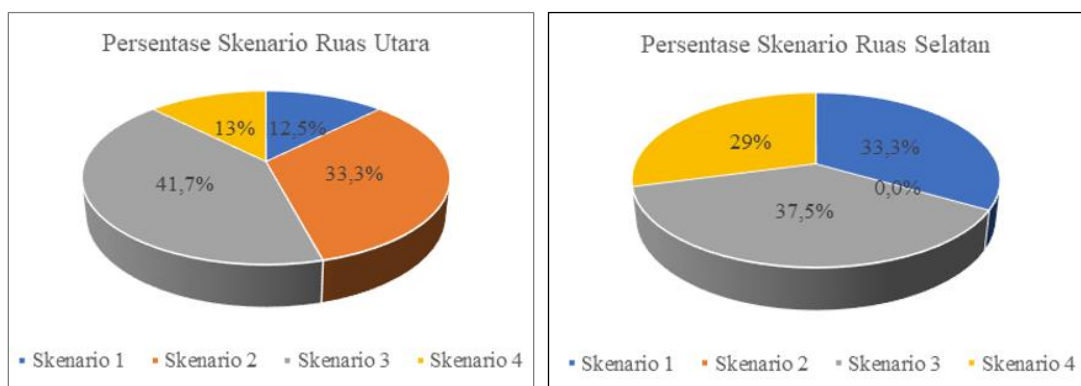
Bruinsma (2017) mengklasifikasikan *output* analisis *backcalculation* dalam beberapa skenario. Klasifikasi hasil pengelompokan dalam beberapa skenario untuk ruas utara dan ruas selatan ditunjukkan pada Gambar 11, dengan Tabel 5 menjelaskan skenario yang digunakan. Nilai ambang batas rentang yang digunakan sebagai pertimbangan dalam klasifikasi skenario ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5 Penjabaran Klasifikasi Skenario

Skenario	Keterangan
1	Nilai RMS ≤ 3 dan nilai <i>backcalculated moduli</i> berada pada rentang nilai syarat rekomendasi FHWA
2	Nilai RMS ≤ 3 dan nilai <i>backcalculated moduli</i> tidak berada pada rentang nilai syarat rekomendasi FHWA
3	Nilai RMS > 3 dan nilai <i>backcalculated moduli</i> berada pada rentang nilai syarat rekomendasi FHWA
4	Nilai RMS > 3 dan nilai <i>backcalculated moduli</i> tidak berada pada rentang nilai syarat rekomendasi FHWA

Tabel 6 Nilai Ambang Batas Penetapan *Back-Calculated Moduli*

Lapis	Seed Moduli (MPa)	Nilai Batas (MPa)	
		0,25 x Seed Moduli	5 x Seed Moduli
HMA	1.400	350	7.000
Base	1.000	250	5.000
Subbase	200	50	1.000
Subgrade	60	15	300



Gambar 11 Persentase Skenario pada Ruas Utara dan Ruas Selatan

Nilai ambang batas pada Tabel 6 digunakan sebagai salah satu pertimbangan pada penentuan klasifikasi skenario. *Back-calculated moduli* hasil ELMOD 6.0 yang tidak mem-

nuhi nilai ambang batas RMS pada Tabel 5 dianalisis kembali, sehingga dapat dipertimbangkan penggunaannya sesuai FHWA (Bruinsma, 2017). Nilai ambang batas modulus elastisitas adalah 0,25 kali hingga 5 kali nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*).

Gambar 11 menjelaskan bahwa kondisi ruas selatan, yang lebih kaku pada permukaan, menghasilkan persentase skenario 1 yang lebih tinggi. Semakin kaku lapis permukaan, semakin besar nilai RMS yang dihasilkan. Penentuan nilai modulus elastisitas dilaksanakan dengan menggunakan nilai data persentil ke-10, yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Nilai Modulus Elastisitas

Ruas	E HMA (MPa)	E Base (MPa)	E Subbase (MPa)	E Subgarde (MPa)
Utara	1.401,31	597,75	116,79	96,15
Selatan	976,80	128,22	104,59	75,68

KESIMPULAN

Pada studi ini dikaji kondisi perkerasan di ruas Jalan Janti (Yogyakarta)-Prambanan (Batas Provinsi Jawa Tengah) untuk kedua arah lalu lintas. Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa nilai modulus elastisitas (E) pada lapis HMA adalah sebesar 1401,31 MPa, pada lapis *base* adalah sebesar 597,75 MPa, pada lapis *subbase* adalah sebesar 116,79 MPa, dan pada lapis *subgrade* adalah sebesar 96,15 MPa. Untuk ruas selatan, nilai E pada lapis HMA sebesar 976,80 MPa, pada lapis *base* sebesar 128,22 MPa, pada lapis *subbase* sebesar 104,59 MPa, dan pada lapis *subgrade* sebesar 75,68 MPa.

Metode klasifikasi modulus elastisitas yang dikeluarkan oleh FHWA (2017) menyatakan bahwa nilai RMS dan *backcalculated moduli* tiap lapis yang masuk dalam skenario 1 pada ruas utara adalah sebesar 12,5%. Sedangkan pada ruas selatan, nilai RMS dan *backcalculated moduli* tiap lapis yang masuk dalam skenario 1 adalah sebesar 33,3%.

DAFTAR PUSTAKA

- Bruinsma, J.E. 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic–Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation*. Federal Highway Administration. Washington, DC.
- Drenth, K.P. 2006. *ELMOD 6: The Design and Structural Evaluation Package for Road, Airport, and Industrial Pavements*. The 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, CA.
- Dynatest International. 2021. *ELMOD 6 Quick Start Manual*. Gainesville, FL.
- Guzzarlapudi, S.D., Adigopula, V.K., dan Kumar, R. 2017. *Comparative Study of Flexible Pavement Layers Moduli Backcalculation Using Approximate and Static Approach*.

- Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Engineering and Material Sciences (ICEMS), 4 (9): 9812–9816.
- Horak, E. 2008. *Benchmarking the Structural Condition of Flexible Pavements with Deflection Bowl Parameters*. Journal of the South African Institution of Civil Engineers, 50: 2–9.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2019. Surat Edaran No. 14/SE/M/2019, *Cara Uji Lendutan Permukaan Jalan dengan Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Jakarta.
- Lytton, R.L. 1989. *Backcalculation of Pavement Layer Properties, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*. ASTM STP 1026. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Pavement Interactive. 2021. *Elastic Modulus*. (Online), (<https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/elastic-modulus/>, diakses 25 Januari 2021).
- Wirawan, N. 2016. *Statistika Ekonomi dan Bisnis (Statistika Deskriptif)*. Denpasar: Keraras Mas.
- Yoder, E.J. dan Witczak, M.W. 1975. *Principles of Pavement Design*. Second Edition. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.