

Analisa Hubungan Antara Nilai Lentutan Dengan Modulus Elastisitas Perkerasan Lentur Akibat Beban Berlebih Dengan Metode Boussinesq

Andi Sahrul Hidayat^{1,*}, Catur Arif Prastyanto²

Departement Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
Koresponden*, Email: andi_sahrul93@yahoo.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	06 Pebruari 2019	<i>Testing of pavement deflection using the Falling Weight Deflectometer is a test that has been used extensively throughout the world. The purpose of this study was to determine the elastic modulus of flexible pavement in the Flexible Pavement Systems (FPS) profile with the Boussinesq method. The testing location in this study was at the Raya Ngelom City of Surabaya, East Java Province. The results of this study obtained the elastic modulus equation for each pavement layer which had a good correlation with FWD testing deflection. A good model equation is a power regression model with a value of $Y = 216.51x^{-1}$ where Y is a pavement elastic modulus and X is a pavement deflection value.</i>
Diperbaiki	13 Pebruari 2019	
Disetujui	25 Pebruari 2019	

Keywords: pavement modulus, FWD, Boussinesq method, overloaded, deflection

Abstrak
Pengujian lentutan perkerasan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* merupakan pengujian yang telah digunakan secara luas diseluruh dunia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan modulus elastis perkerasan lentur diprofil *Flexible Pavement Systems (FPS)* dengan metode *Boussinesq*. Lokasi pengujian pada penelitian ini adalah di ruas jalan Raya Ngelom Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Hasil dari penelitian ini diperoleh persamaan modulus elastisitas setiap lapisan perkerasan yang memiliki korelasi yang baik terhadap nilai lentutan pengujian FWD. Persamaan model yang baik adalah model regresi power dengan nilai $Y = 216.51x^{-1}$ dimana Y adalah modulus elastisitas perkerasan dan X adalah nilai lentutan perkerasan.

Kata kunci: modulus perkerasan, FWD, metode *Boussinesq*, muatan lebih, lentutan

1. Pendahuluan

Untuk merencanakan perbaikan maupun pemulihan sistem perkerasan lentur dibutuhkan metode yang sesuai. Metode yang paling sering digunakan di Indonesia maupun di Dunia adalah metode lentutan (*deflection method*). Untuk pengujian metode ini bisa menggunakan alat *Bengkleman Beam (BB)* maupun alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)*.

Pengujian nilai lentutan perkerasan lentur menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)* telah digunakan secara luas diseluruh dunia. Pengujian dengan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)* telah memberikan hasil yang cukup baik untuk pengujian nilai lentutan struktur perkerasan lentur [1],[2],[3]. Penghitungan dan analisis lentutan pada pengujian *Falling Weight Deflectometer (FWD)* telah dijalankan menggunakan metode *probabilitas peluang (stokastik)* [4]. Sekarang pengujian nilai lentutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)* sudah sangat *ve miliar* digunakan untuk menilai kondisi struktur perkerasan lentur [5].

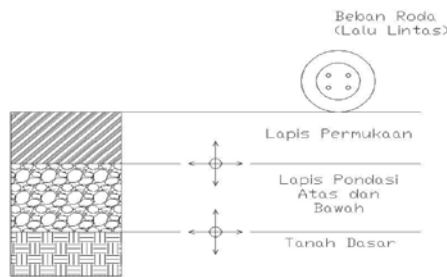
Sistem Perkerasan Lentur didesain, dibuat dan selanjutnya digunakan untuk menanggung beban lalulintas dalam jangka waktu yang diharapkan. Setelah selesai dibuat kondisi struktur perkerasan lentur dapat dianggap baik jika

memenuhi semua persyaratan desain. Selanjutnya perkerasan akan mengalami penurunan kualitas, yaitu respon dan performa yang terus berkurang hingga batas akhir waktu pelayanannya [2].

Metode yang sering digunakan untuk untuk penyelenggaraan, pemulihan dan perbaikan struktur perkerasan lentur yaitu mekanik-empirik (*mechanistic-empirical*) [3], [6].

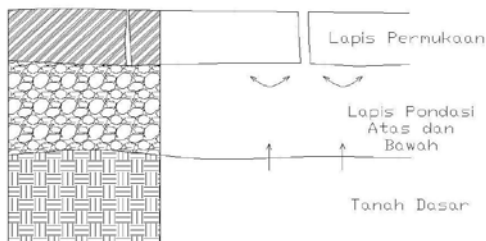
Beban lalu lintas yang bekerja pada struktur perkerasan lentur struktur perkerasan lentur direspon oleh perkerasan yang melibatkan mampatan tegangan (*compressive stresses*), regangan tensil (*tensile strains*) dan lentutan (*deflection*). Performa perkerasan juga melibatkan fungsi pelayanan dan keadaan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

Untuk mendesain perkerasan lentur menggunakan metode *mekanik-empirik* memerlukan dua tahapan perhitungan [6]. Tahap pertama yaitu menghitung respon perkerasan berdasarkan nilai tegangan, regangan dan lentutan. Respon perkerasan yang di peroleh dianalisis menggunakan metode mekanik berdasarkan prinsip-prinsip teori elastis. Seterusnya respon perkerasan ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Respon perkerasan lentur [6]

Tahap kedua yaitu menganalisa kemampuan struktur perkerasan dan kemampuan layanan jalan rencana. Ini adalah berdasarkan cesa rencana dan faktor lingkungan sekitar. Untuk performa perkerasan lentur dapat di lihat pada **Gambar 2.**



Gambar 2. Performa Perkerasan Lentur [6]

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* [7].

Metode yang paling umum untuk menggambarkan sifat respon dalam suatu struktur perkerasan (*half space* yang *homogen*) adalah melalui pondasi atas *Boussinesq* [8]. Pengujian menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) mudah dilaksanakan dengan hasil yang baik [3].

Sebagai beban gandar standar lalu lintas adalah 8,16 Ton [9], [10] 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 = $1/4 D$ dan D adalah garis tengah bernilai 300 mm). Nilai P ini adalah level tegangan puncak yang juga digunakan oleh banyak negara [11]. *Deflector* adalah alat menyerupai *geofon* (*geophone*) perekam yang dipasang pada alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD). *Geofon* pertama dipasang berdekatan dengan plat beban jatuh dan seterusnya 7 hingga

9 *geofon* dipasang berjajar hingga ujung batang pengukur *Falling Weight Deflectometer* (FWD) [12], [13].

Menurut kajian [9] kekuatan tanah dasar dipengaruhi oleh musim, suhu dan curah hujan. Oleh karena itu pengujian lendutan perkerasan lentur perlu dilakukan lebih dari satu kali untuk mendapatkan hasil pengujian *Falling Weight Deflectometer* (FWD) yang paling baik [14].

Jarak *geofon* ditentukan berdasarkan tebal keseluruhan perkerasan [15] yang ditunjukkan dalam **Tabel 1** Tinjauan Parameter Pada Pengujian *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Tabel 1. Jarak geofon untuk tebal keseluruhan perkerasan [15]

Tebal seluruh lapisan perkerasan (mm)	Jarak geofon yang digunakan (mm)						
<500 (Tipis)	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

Salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam melakukan perencanaan tebal lapis tambah (*overlay*) adalah nilai *Equivalent Axle Load* (EAL). Hal ini dikarenakan nilai *Equivalent Axle Load* (EAL) merupakan salah satu faktor yang dominan dalam penentuan tebal lapisan struktur perkerasan. Besarnya nilai *Equivalent Axle Load* (EAL) sangat dipengaruhi oleh berat total kendaraan, beban as, dan konfigurasi as kendaraan. *Association of State Highway and Transportation Officials*, AASHTO (1972) telah menetapkan beban as standard (*Standard Axle Load*) sebesar 18000 lbs, atau 8.16 ton [16].

Besarnya nilai *Equivalent Axle Load* (EAL) yang didasarkan pada teori deformasi permanen pada perkerasan lentur sangat tergantung pada besarnya nilai modulus elastisitas (E) struktur perkerasan jalan, regangan vertikal (ϵ_z), dan lendutan (d) tepat di bawah ban dengan beban dan tekanan ban (q) tertentu [1]. Pada perencanaan perkerasan lentur, deformasi permanen merupakan salah satu faktor penting. Deformasi permanen (dalam bentuk rutting) adalah penurunan perkerasan yang berbentuk alur memanjang pada jalur tapak roda kendaraan. Kedalaman rutting tergantung pada tiga faktor yaitu ketebalan dan kualitas material konstruksi perkerasan, beban kendaraan dan kondisi lingkungan [1].

Berdasarkan teori tersebut maka diduga dengan adanya beban berlebih maka akan mempengaruhi nilai lendutan dan juga modulus elastisitas perkerasan jalan. Dengan mengetahui hubungan nilai lendutan terhadap modulus elastisitas perkerasan jalan akibat beban berlebih diharapkan perhitungan untuk pemulihan dan perbaikan perkerasan lentur

menjadi lebih baik khususnya untuk perkerasan yang dilalui oleh kendaraan dengan beban berlebih (*overloaded*).

Kosasih, Djunaedi (2003) menyatakan asumsi yang biasanya digunakan dalam perhitungan respon struktur perkerasan yang sederhana adalah sebagai berikut [2]:

- Pada struktur perkerasan, setiap lapisan memiliki ketebalan tertentu, kecuali tanah dasar yang tebalnya dianggap tak terhingga. Sedangkan, lebar setiap lapisan perkerasan juga dianggap tak terbatas.
- Sifat-sifat bahan dari setiap lapisan perkerasan adalah *isotropik*, yakni sifat bahan disetiap titik tertentu dalam setiap arah.
- Sifat-sifat bahan dari setiap lapisan perkerasan dianggap *homogen*.
- Lapisan linear elastis, linear maksudnya hubungan antara regangan dan tegangan dianggap linear, dan elastis maksudnya apabila tegangan yang diberikan kemudian dihilangkan, regangan dapat kembali ke bentuknya semula.
- Sifat-sifat bahan diwakili oleh dua parameter struktural, yaitu *modulus resilient* (E atau MR) dan konstanta *Poisson* (μ).
- *Friksi* antara lapisan perkerasan dianggap baik atau tidak terjadi slip.
- Beban roda kendaraan dianggap memberikan gaya vertical yang seragam terhadap perkerasan dengan bidang berbentuk lingkaran.

Terdapat tiga sistem dalam metode sistem lapisan banyak yaitu sebagai berikut [2]:

- Sistem satu lapis
Dalam sistem struktur satu lapis, struktur perkerasan dianggap sebagai kesatuan struktur dengan bahan yang *homogen*.
- Sistem dua lapis
Dalam pemecahan sistem dua lapis, beberapa asumsi dibuat batas dan kondisi sifat bahan, yaitu *homogen*, *isotropik* dan *elastik*. Sistem ini dimodelkan dengan membedakan tanah dasar dan lapisan perkerasan di atasnya, atau dengan kata lain membedakan lapisan aspal dan lapisan agregat (termasuk tanah dasar). Lapisan permukaan diasumsikan tidak terbatas, namun kedalamannya terbatas. Sedangkan lapisan bawahnya atau tanah dasar tidak terbatas baik arah horizontal maupun vertikal.
- Sistem tiga lapis
Sistem struktur tiga lapis dapat memodelkan lapisan aspal, lapisan agregat dan tanah dasar terpisah. Pemodelan ini, selain lebih mewakili struktur perkerasan yang dibangun, juga dapat mempertimbangkan ketiga

sifat bahan perkerasannya yang pada hakekatnya berbeda.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini lokasi pengujian nilai lendutan perkerasan berada di ruas jalan Raya Ngelom Kota Surabaya Provinsi Jawa Timur. Untuk pengukuran lendutan perkerasan digunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Gambar alat FWD dapat dilihat pada **Gambar 3**.

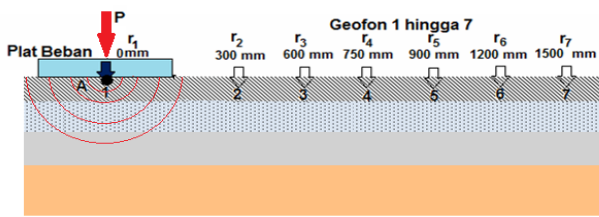


Gambar 3. Alat *Falling Weight Deflectometer*

Berikut proses dan prosedur yang digunakan didalam pengujian lendutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Untuk menyesuaikan dengan beban standar kendaraan *Single Axle Dual Wheels* (SADW) di lapangan maka beban jatuh yang digunakan adalah 4.1 ton. Beban dijatuhkan pada plat bulat dengan diameter 300 mm sehingga akan menghasilkan tegangan normal permukaan perkerasan (σ) 580 kPa. Beban ini direpresentasikan setengah beban gandar *Single Axle Dual Wheels* (SADW) standar.

Susunan jarak *geophone* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada [15]. Lapisan Struktur Perkerasan 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. Untuk *Geophone* diletakkan dalam kedudukan 0, 300, 600, 750, 900, 1200, dan 1500 mm dari pusat beban jatuh. Pengaturan jarak ketujuh *geofon* perekam lendutan dalam pengujian lendutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) bisa dilihat pada **Gambar 4**.

Satu titik tegangan dalam bahan tidak linier lapisan perkerasan dapat dihitung melalui data lendutan yang berada tepat dibawah *geophone* pertama. Metode ini valid apabila digunakan untuk satu titik dalam satu lapisan perkerasan [3].



Gambar 4. Posisi geofon dalam pengujian *Falling Weight Deflectometer* (FWD) di lapangan[12]

Tabel 2. Kriteria regangan vertikal pada permukaan sub-grade dari beberapa referensi [1].

Referensi	f4	f5	Dalam Alur (in)
Asphalt Institute	1.356×10^{-9}	4.477	0.5
Shell (revised 1985)			
50% reliability	6.15×10^{-7}	4.0	
85% reliability	1.94×10^{-7}	4.0	
95% reliability	1.05×10^{-7}	4.0	
UK Transport & Road Research Laboratory	6.18×10^{-8}	3.95	0.4
85% reliability	3.05×10^{-9}	4.35	
Belgian Road Research Centre			

Ketika beban diletakkan pada suatu bidang lingkaran tunggal, pada umumnya regangan-tegangan kritis dan lendutan terjadi di titik pusat lingkaran pada sumbu simetri [1]. Dengan asumsi bahwa perkerasan jalan lentur dianggap sama dengan plat yang lentur, beban roda kendaraan yang diterima perkerasan hampir sama dengan beban yang terjadi pada plat yang elastis dengan jari-jari a dan tekanan beban merata q [1], sehingga besarnya regangan vertikal dan lendutan yang terjadi akibat beban kendaraan yang diterima perkerasan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \mu)q}{E} \left[1 - 2\mu + \frac{2\mu z}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1,5}} \right]$$

On the surface of the half-space, $z = 0$, maka:

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \mu)q}{E} [1 - 2\mu]$$

dimana :

q : tegangan normal pada permukaan perkerasan. (tekanan ban, psi)

ϵ_z : regangan vertikal

μ : poisson ratio 0.40 (untuk perkerasan lentur)

E : modulus elastisitas perkerasan (psi)

a : jari-jari bidang kontak roda

$$: \sqrt{\frac{p}{q\pi}}$$

p : beban pada roda (lb)

z : kedalaman di dalam perkerasan yang di tinjau (in)

$$N_{fs} = N_{fj} = f_4 (\epsilon_t)^{-15}$$

Dimana :

N_{fs} : banyaknya lintasan dengan beban gandar standar

N_{fj} : banyaknya lintasan dengan beban gandar tertentu

ϵ_t : regangan vertikal di atas tanah dasar

f_4, f_5 : Kriteria regangan vertikal pada permukaan sub-grade (**Tabel 2**).

Setelah data pengujian lendutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) diperoleh. Selanjutnya dianalisa dengan mengacu pada pendekatan *Boussinesq theory* (1885) bahwa perkerasan diasumsikan sebagai lapisan yang *homogen*, mempunyai sifat yang *isotropis*, elastis maka besarnya *modulus elastisitas* (E) dapat dicari dengan cara sebagai berikut :

$$d = \frac{(1 + \mu)qa}{E} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2\mu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{0,5} - z \right] \right\}$$

On the surface of the half-space theory, $z=0$. Maka :

$$d = \frac{2(1 + \mu^2)qa}{E} \quad \text{dan} \quad E = \frac{2(1 + \mu^2)qa}{d}$$

dimana :

q : tegangan normal pada permukaan perkerasan. (tekanan ban, psi)

ϵ_z : regangan vertikal

μ : poisson ratio 0.40 (untuk perkerasan lentur)

E : modulus elastisitas perkerasan (psi)

a : jari-jari bidang kontak roda

$$: \sqrt{\frac{p}{q\pi}}$$

p : beban pada roda (lb)

z : kedalaman di dalam perkerasan yang di tinjau (in)

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini pengujian nilai lendutan perkerasan jalan dilakukan pada ruas jalan dari arah Mastrip-Taman dan sebaliknya menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Untuk mendapatkan nilai lendutan, konstruksi perkerasan jalan diberi beban tumbukan melalui plat dengan diameter 30 cm untuk perkerasan lentur (aspal). Pada saat struktur perkerasan diberi beban impuls maka akan menghasilkan getaran pada struktur perkerasan. Getaran yang dihasilkan akan dibaca dan direkam oleh alat *geofone* yang dipasang dengan jarak tertentu diatas perkerasan jalan. Pada penelitian ini, untuk tebal perkerasan 700–1000 mm, penempatan geofone pada jarak 0, 300, 600, 750, 900, 1200, dan 1500 mm, (Danida, 1990).

Untuk variasi beban yang digunakan mulai dari *standart*, *overload* dan sangat *overload*. Saat pelaksanaan pengujian dilakukan juga pengamatan suhu permukaan aspal dan

kondisi cuaca. Data tersebut digunakan untuk mengoreksi data lendutan perkerasan yang didapat.

Pada penelitian ini nilai lendutan yang akan digunakan adalah nilai lendutan maksimum yang terjadi pada perkerasan jalan. Nilai lendutan maksimum yang terjadi pada

bacaan dititik D1. Untuk hasil keseluruhan pengujian lendutan perkerasan jalan dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Hasil pengujian nilai lendutan perkerasan dari arah Mastrip-Taman

No. Test	KM	Surface temp °C	Air °C	Drop ID	History	Stress (kpa)	Force			Deflection (micron)						
							(psi)	(kN)	(ton)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	0+000	31	28	1	TRUE	623,00	90,36	44,04	4,49	235,80	133,20	103,90	97,40	85,50	68,20	55,60
					TRUE	1219,00	176,80	86,13	8,78	379,00	257,10	211,10	191,10	168,70	133,40	109,50
					TRUE	1388,00	201,31	98,10	10,00	420,40	290,30	236,30	216,70	190,00	151,00	125,40
2	0+100	31	28	4	TRUE	613,00	88,91	43,35	4,42	363,71	223,50	164,40	148,30	127,50	108,40	89,40
					TRUE	1192,00	172,88	84,28	8,59	793,34	459,10	341,90	299,80	259,80	210,90	170,70
					TRUE	1365,00	197,98	96,51	9,84	917,75	522,50	392,60	341,70	295,20	238,10	191,30
3	0+200	31	28	7	TRUE	602,00	87,31	42,52	4,34	335,10	258,00	207,60	188,50	155,20	127,30	105,00
					TRUE	1194,00	173,18	84,42	8,61	765,30	534,70	424,30	383,10	322,70	259,50	210,70
					TRUE	1374,00	199,28	97,09	9,90	836,70	609,80	488,70	439,10	371,20	297,60	242,90
4	0+300	31	28	10	TRUE	592,00	85,86	41,81	4,26	479,80	325,20	236,30	210,90	175,30	135,50	103,50
					TRUE	1174,00	170,27	82,95	8,46	939,30	648,70	483,60	426,30	357,80	276,60	217,40
					TRUE	1354,00	196,38	95,69	9,76	1056,20	740,50	550,00	487,50	411,30	318,40	250,50
5	0+400	31	28	13	TRUE	603,00	87,46	42,59	4,34	248,10	199,90	162,60	150,50	132,10	105,10	92,50
					TRUE	1200,00	174,05	84,81	8,65	557,90	425,70	346,00	311,70	271,00	214,90	183,30
					TRUE	1380,00	200,15	97,55	9,95	638,20	490,60	401,60	358,30	312,60	247,80	208,10
6	0+480	31	28	16	TRUE	600,00	87,02	42,43	4,33	220,10	194,20	146,50	133,70	114,20	91,70	76,20
					TRUE	1198,00	173,76	84,68	8,63	471,20	373,00	291,80	263,80	231,10	182,80	149,30
					TRUE	1378,00	199,86	97,39	9,93	540,90	425,70	334,00	301,70	261,90	209,40	169,50

Tabel 4. Hasil pengujian nilai lendutan perkerasan dari arah Taman-Mastrip

No. Test	KM	Surface temp °C	Air °C	Drop ID	History	Stress (kpa)	Force			Deflection (micron)						
							(psi)	(kN)	(ton)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	0+000	31	28	1	TRUE	571,00	82,82	40,38	4,12	308,20	247,80	196,80	172,60	137,40	112,60	92,20
					TRUE	1157,00	167,81	81,77	8,34	856,60	506,90	397,20	354,10	281,80	227,40	184,60
					TRUE	1335,00	193,63	94,37	9,62	1054,80	575,60	451,60	394,60	325,50	259,50	209,30
2	0+100	31	28	4	TRUE	578,00	83,83	40,82	4,16	689,50	448,90	315,10	266,60	217,00	156,50	109,10
					TRUE	1161,00	168,39	82,03	8,36	1251,60	886,40	643,80	546,20	433,20	315,20	230,70
					TRUE	1333,00	193,34	94,19	9,60	1368,80	1001,00	732,70	624,20	488,20	363,40	267,70
3	0+200	31	28	7	TRUE	593,00	86,01	41,88	4,27	483,90	336,50	255,50	217,50	179,00	139,00	111,00
					TRUE	1174,00	170,27	82,99	8,46	970,40	689,20	516,10	446,90	360,10	275,40	211,80
					TRUE	1351,00	195,95	95,50	9,74	1081,20	788,70	595,60	513,00	414,20	314,20	239,70
4	0+300	31	28	10	TRUE	590,00	85,57	41,67	4,25	572,80	365,40	255,90	230,00	190,30	143,80	111,20
					TRUE	1171,00	169,84	82,77	8,44	1147,00	777,60	551,50	487,20	392,80	292,20	220,00
					TRUE	1346,00	195,22	95,11	9,70	1265,20	896,70	648,40	564,70	452,40	336,90	251,80
5	0+400	31	28	13	TRUE	589,00	85,43	41,63	4,25	570,50	317,50	238,30	213,40	184,80	144,70	115,40
					TRUE	1175,00	170,42	83,04	8,47	1248,40	664,90	509,30	442,20	378,30	290,60	225,90
					TRUE	1351,00	195,95	95,50	9,74	1441,03	765,20	590,30	511,60	434,50	334,70	261,00
6	0+480	31	28	16	TRUE	589,00	85,43	41,66	4,25	551,60	304,00	227,60	195,60	164,50	124,40	99,10
					TRUE	1165,00	168,97	82,35	8,40	1061,40	620,80	479,70	413,00	336,80	258,00	197,20
					TRUE	1336,00	193,77	94,46	9,63	1159,50	707,30	550,00	478,30	393,60	302,00	228,50

Berdasarkan data nilai lendutan yang telah diperoleh selanjutnya data tersebut dianalisis untuk memperoleh nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas diperoleh dengan mengacu pada pendekatan *Boussinesq theory* dengan mengambil model perkerasan tiga lapisan. Hasil analisis modulus elastis lapisan perkerasan beraspal (E_1), lapisan base (E_2), dan lapisan tanah dasar (tanah baik) (E_s) menggunakan metode *Boussinesq's* pada kedua jalan raya berdasarkan prosedur pengujian *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Hasil perhitungan modulus elastisitas, regangan vertikal dan *equivalent axle load* (EAL) untuk jenis As SADW dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai E1 dan E2 serta E3 pada titik 1 arah Mastrip-Taman adalah sebagai berikut:

- Jenis as kendaraan : *Single Axle Dual Wheels* (SADW)
- Beban as SADW : 8.16 ton atau 8160 kg
- Tekanan ban (q) : 82.12 psi (5.77 kg/cm²)
- Nilai lendutan balik (d) : 0.2142 mm atau 0.0214 cm

Poisson ratio : 0.40 untuk perkerasan lentur
 Beban per roda (p) = $\frac{\text{Beban as kendaraan}}{\text{Jumlah roda as SADW}} = 2040 \text{ kg}$

$$\text{Radius bidang kontak ban (a)} = \sqrt{\frac{p}{q\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{2040}{3.14 \cdot 5.77}}$$

$$= 10.63 \text{ cm}$$

$$\text{Modulus elastisitas } E_0 = \frac{2(1 + \mu^2)qa}{d}$$

$$= \frac{2(1 + 0.40^2)5.75 \cdot 10.63}{0.0214}$$

$$= 6619.29 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Regangan vertikal} = \frac{(1 + \mu)q}{E} [1 - 2\mu]$$

$$= \frac{(1 + 0.40)5.75}{6619.29} [1 - 2 \cdot 0.40]$$

$$= 0,00024$$

$$\text{Jumlah lintasan dengan beban as standar} =$$

$$= (1.365 \cdot 10^{-9}) \cdot (0,00024) - 4.477$$

$$= 9.02231E-26$$

$$\text{Nilai EAL} = \frac{N_{fs}}{N_{fj}}$$

$$= \frac{9.02231E-26}{9.02231E-26}$$

$$= 1$$

$$E1 = \frac{(1 + \mu)qa}{d} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2\mu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{0,5} - z \right] \right\}$$

$$\frac{(1 + 0.40)5.75 \cdot 10.63}{0.0214} \left\{ \frac{10.63}{(10.63^2 + 15^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2 \cdot 0.40}{10.63} \left[(10.63^2 + 15^2)^{0,5} - 15 \right] \right\}$$

$$= 10106.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$E2 = \frac{(1 + \mu)qa}{d} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2\mu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{0,5} - z \right] \right\}$$

$$\frac{(1 + 0.40)5.75 \cdot 10.63}{0.0214} \left\{ \frac{10.63}{(10.63^2 + 35^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2 \cdot 0.40}{10.63} \left[(10.63^2 + 35^2)^{0,5} - 35 \right] \right\}$$

$$= 2900,24 \text{ kg/cm}^2$$

$$E3 = \frac{(1 + \mu)qa}{d} \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2\mu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{0,5} - z \right] \right\}$$

$$\frac{(1 + 0.40)5.75 \cdot 10.63}{0.0214} \left\{ \frac{10.63}{(10.63^2 + 75^2)^{0,5}} - \frac{1 + 2 \cdot 0.40}{10.63} \left[(10.63^2 + 75^2)^{0,5} - 75 \right] \right\}$$

$$= 927.15 \text{ kg/cm}^2$$

Tabel 5. Hasil pengujian nilai lendutan perkerasan dari arah Mastrip-Taman

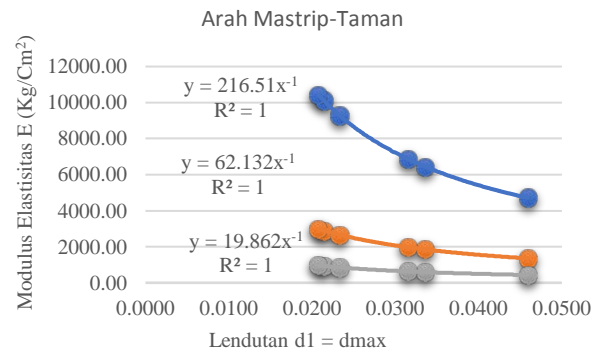
Jenis As	Titik	SADW (ton)	Beban per Roda, p (ton)	Tekanan Ban, q (kg/cm ²)	Radius kontak Ban, a (cm)	Nilai Lendutan, d (cm)	Poisson Ratio, μ	Modulus Elastisitas, E0 (kg/cm2)	Modulus Elastisitas, E1 (kg/cm2)	Modulus Elastisitas, E2 (kg/cm2)	Modulus Elastisitas, E3 (kg/cm2)	Regangan Vertikal, ε _v	Number of Load Repetition	P _{std} /8.16	EAL
SADW ARAH MASTRIP-TAMAN	1	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0214	0,40	6619,29	10106,4	2900,24	927,15	0,00024	9,02231E-26	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0259	0,40	8048,61	12288,7	3526,50	1127,35	0,00029	2,10709E-25	1,47	2,33
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0336	0,40	8266,86	12622,0	3622,12	1157,92	0,00038	6,78559E-25	1,96	7,52
	2	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0336	0,40	4224,17	6449,56	1850,82	591,67	0,00038	6,73976E-25	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0554	0,40	3762,45	5744,59	1648,52	527,00	0,00062	6,34179E-24	1,47	9,40
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0746	0,40	3725,48	5688,14	1632,32	521,82	0,00084	2,40624E-23	1,96	35,70
	3	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0315	0,40	4497,04	6866,18	1970,38	629,89	0,00035	5,09258E-25	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0533	0,40	3906,78	5964,96	1711,76	547,21	0,00060	5,35821E-24	1,47	10,52
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0676	0,40	4110,92	6276,64	1801,20	575,80	0,00076	1,54852E-23	1,96	30,40
	4	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0459	0,40	3088,36	4715,37	1353,16	432,58	0,00052	2,73892E-24	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0666	0,40	3127,64	4775,36	1370,38	438,08	0,00075	1,45046E-23	1,47	5,29
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0866	0,40	3209,62	4900,52	1406,30	449,56	0,00098	4,68947E-23	1,96	17,12
5	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0233	0,40	6083,99	9289,17	2665,70	852,17	0,00026	1,31607E-25	1,00	1,00	
	12,00	3,00	8,45	10,63	0,0387	0,40	5383,89	8220,24	2358,95	754,11	0,00043	1,2749E-24	1,47	9,68	
	16,00	4,00	11,27	10,63	0,0513	0,40	5415,08	8267,85	2372,62	758,48	0,00058	4,50996E-24	1,96	34,26	
6	8,16	2,04	5,75	10,63	0,0208	0,40	6832,21	10431,5	2993,53	956,97	0,00023	7,82999E-26	1,00	1,00	
	12,00	3,00	8,45	10,63	0,0327	0,40	6364,75	9717,83	2788,71	891,49	0,00037	6,02652E-25	1,47	7,69	
	16,00	4,00	11,27	10,63	0,0436	0,40	6378,69	9739,12	2794,82	893,45	0,00049	2,1664E-24	1,96	27,66	

Tabel 6. Hasil pengujian nilai lendutan perkerasan dari arah Taman-Mastrip

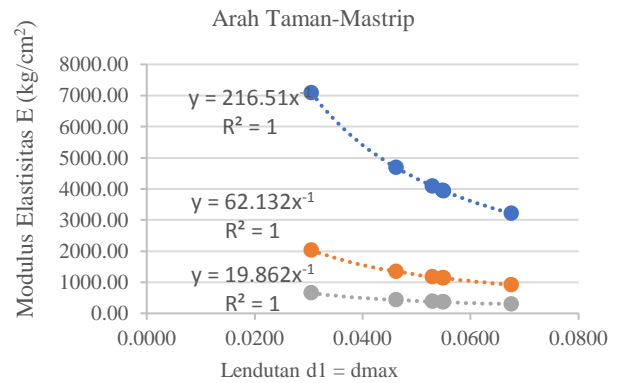
Jenis As	Titik	SADW	Beban per Roda, P	Tekanan Ban, q	Radius kontak Ban, a	Nilai Lendutan, d	Poisson Ratio, μ	Modulus Elastisitas, E0	Modulus Elastisitas, E1	Modulus Elastisitas, E2	Modulus Elastisitas, E3	Regangan Vertikal, ϵ_z	Number of Load Repetition	$P_{std}/8.16$	EAL
		(ton)	(ton)	(kg/cm ²)	(cm)	(cm)		(kg/cm2)	(kg/cm2)	(kg/cm2)	(kg/cm2)				
SADW ARAH TAMAN-MASTRIP	1	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0305	0,40	4643,46	7089,73	2034,53	650,4017	0,000346	4,41205E-25	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0616	0,40	3380,81	5161,90	1481,30	473,5454	0,000699	1,02368E-23	1,47	23,21
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0877	0,40	3169,55	4839,34	1388,74	443,9541	0,000995	4,96081E-23	1,96	112,43
	2	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0676	0,40	2098,20	3203,57	919,327	293,8913	0,000767	1,54591E-23	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0898	0,40	2321,20	3544,06	1017,03	325,1269	0,001019	5,51187E-23	1,47	3,56
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,1140	0,40	2437,80	3722,09	1068,12	341,4593	0,001294	1,60667E-22	1,96	10,39
	3	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0462	0,40	3067,32	4683,25	1343,94	429,6344	0,000524	2,82404E-24	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0688	0,40	3028,87	4624,54	1327,10	424,2489	0,000781	1,67456E-23	1,47	5,92
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0888	0,40	3129,18	4777,71	1371,05	438,3001	0,001008	5,25381E-23	1,96	18,60
	4	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0550	0,40	2578,27	3936,56	1129,67	361,1341	0,000624	6,14573E-24	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0815	0,40	2555,73	3902,14	1119,79	357,9771	0,000925	3,5822E-23	1,47	5,82
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,1044	0,40	2663,18	4066,20	1166,87	373,0278	0,001184	1,08143E-22	1,96	17,59
	5	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0548	0,40	2586,18	3948,63	1133,13	362,2419	0,000622	6,06202E-24	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0885	0,40	2355,80	3596,89	1032,19	329,9737	0,001004	5,15855E-23	1,47	8,50
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,1184	0,40	2347,82	3584,70	1028,69	328,8551	0,001344	1,90132E-22	1,96	31,36
	6	8.16	2.04	5,75	10,63	0,0530	0,40	2676,72	4086,87	1172,80	374,9238	0,000601	5,19652E-24	1,00	1,00
		12,00	3,00	8,45	10,63	0,0758	0,40	2747,83	4195,45	1203,96	384,8844	0,000861	2,58962E-23	1,47	4,98
		16,00	4,00	11,27	10,63	0,0963	0,40	2886,10	4406,56	1264,54	404,2513	0,001093	7,54583E-23	1,96	14,52

Pada **Tabel 4** dan **Tabel 5** dapat dilihat bahwa nilai lendutan perkerasan yang diperoleh dari pengujian kedua arah memiliki perbedaan. Perbedaan nilai lendutan tersebut disebabkan karena ruas jalan dari arah Mastrip-Taman cenderung dilewati oleh kendaraan berat dari daerah industri dengan muatan berisi. Sedangkan dari arah Taman-Mastrip cenderung dilalui oleh kendaraan berat menuju daerah industri dengan muatan kosong. Ruas jalan yang dilalui kendaraan dengan muatan umumnya menjadi lebih kaku sehingga nilai lendutannya lebih kecil dan nilai modulus elastisitas yang tinggi. Sebaliknya ruas yang dilalui oleh kendaraan dengan muatan kosong umumnya memiliki nilai lendutan lebih tinggi dan modulus elastisitas lebih rendah dibandingkan ruas yang dilalui oleh kendaraan dengan muatan.

Setelah memperoleh nilai modulus elastisitas selanjutnya dilakukan analisis regresi untuk mengetahui hubungan nilai lendutan perkerasan dengan modulus elastisitasnya. Model persamaan regresi yang digunakan adalah regresi power dimana nilai persamaannya yaitu $Y=aX^b$ dimana Y adalah variable tak bebas dan X adalah variable bebas. Untuk grafik persamaan modulus perkerasan, pondasi dan tanah dasar pada lokasi penelitian ditunjukkan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Pada gambar tersebut warna biru mewakili hubungan modulus aspal terhadap lendutan (d_{maks}). Warna orange mewakili hubungan modulus elastisitas pondasi (base) terhadap nilai lendutan (d_{maks}). Warna abu-abu mewakili hubungan modulus elastisitas tanah dasr (E_s) terhadap nilai lendutan (d_{maks}).



Gambar 5. Modulus perkerasan, pondasi dan tanah dasar versus lendutan d arah Mastrip-Taman



Gambar 6. Modulus perkerasan, pondasi dan tanah dasar versus lendutan d arah Taman-Mastrip

Pada penelitian ini hubungan modulus Elastisitas perkerasan dengan nilai lendutan untuk perkerasan lapis banyak ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} = 216.51x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

$$E_{\text{Lapisan-Pondasi}} = 62.132x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

$$E_{\text{Lapisan Tanah Dasar}} = 19.862x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

Pada persamaan diatas Y adalah modulus elastisitas dan X adalah nilai lendutan perkerasan jalan. Contoh perhitungan, berdasarkan analisa menggunakan metode *Boussinesq's* diperoleh modulus elastisitas aspal sebesar 10106,4793 kg/cm² pada lendutan sebesar 0.0214 cm. Perhitungan modulus elastisitas menggunakan persamaan $E_{\text{Lapisan-Aspal}}$ maka diperoleh hasil sebagai berikut:

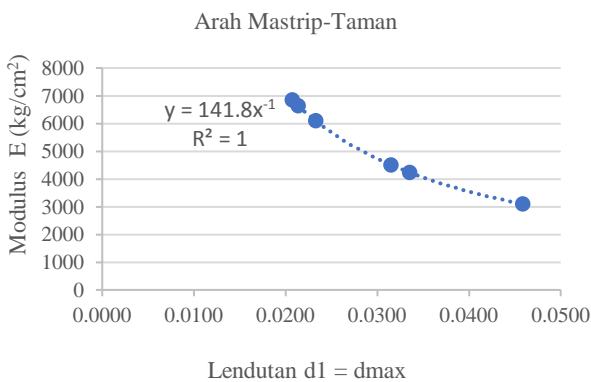
$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} = 216.51x^{-1}$$

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} = 216.51(0.0214)^{-1}$$

$$= 10117.2897 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan persamaan $E_{\text{Lapisan-Aspal}}$ diperoleh modulus 10117.2897 kg/cm² dari hasil perhitungan metode *Boussinesq* 10106,4793 kg/cm². Hasil tersebut didapatkan deviasi -5% dari persamaan tersebut.

Berdasarkan gambar diatas diperoleh persamaan modulus elastisitas terhadap nilai lendutan perkerasan lapis banyak sedangkan untuk grafik persamaan perkerasan dengan asumsi perkerasan dianggap sebagai satu kesatuan atau homogen dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.



Gambar 7. Modulus permukaan (E_0) versus lendutan d_{maks} arah Mastrip-Taman

Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8 diperoleh persamaan hubungan nilai lendutan dengan modulus elastisitas perkerasan untuk lapisan yang homogen di tunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} (Y) = 141.8x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

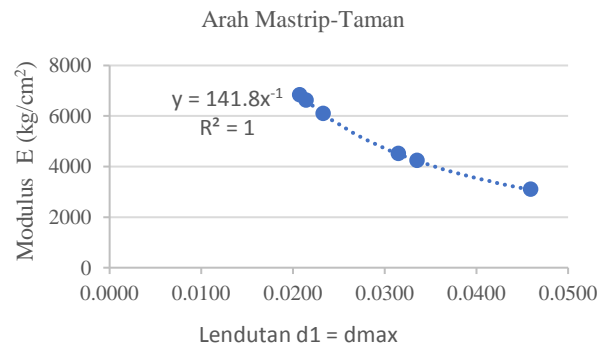
Pada persamaan diatas Y adalah modulus elastisitas dan X adalah nilai lendutan perkerasan jalan. Contoh perhitungan, berdasarkan analisa menggunakan metode *Boussinesq's* diperoleh modulus elastisitas aspal sebesar 6619.29 kg/cm² pada lendutan sebesar 0.0214 cm. Perhitungan modulus elastisitas menggunakan persamaan $E_{\text{Lapisan-Aspal}}$ maka di peroleh hasil sebagai berikut:

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} = 141.8x^{-1}$$

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} = 216.51(0.0214)^{-1}$$

$$= 10117.2897 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan persamaan $E_{\text{Lapisan-Aspal}}$ diperoleh modulus 6619.29 kg/cm² dari hasil perhitungan metode *Boussinesq* 6626.17 kg/cm². Hasil tersebut didapatkan deviasi -5% dari persamaan tersebut.



Gambar 8. Modulus permukaan (E_0) versus lendutan d_{maks} arah Taman-Mastrip

4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian di lapangan dan analisis data yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa semua hasil pengujian nilai lendutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) mempunyai korelasi yang baik dengan modulus elastisitas lapisan perkerasan. Pengujian nilai lendutan memiliki korelasi yang baik terhadap perkerasan yang terdiri dari tiga lapisan yaitu lapisan permukaan beraspal, lapisan pondasi, dan lapisan tanah dasar dengan nilai R^2 yang baik. Korelasi yang mempunyai nilai $R^2 > 0,5$ ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$E_{\text{Lapisan-Aspal}} (Y) = 216.51x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

$$E_{\text{Lapisan-Pondasi}} (Y) = 62.132x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

$$E_{\text{Lapisan Tanah Dasar}} (Y) = 19.862x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

Untuk persamaan Modulus Elastisitas permukaan (E_0) dengan korelasi $R^2 > 0.5$ ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$E_{\text{Permukaan}} (Y) = 141.8x^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

Persamaan diatas memiliki korelasi yang tinggi untuk pengujian nilai lendutan perkerasan dengan beban normal atau beban standar. Sedangkan untuk pengujian nilai lendutan perkerasan dengan beban diatas standar (*Overload*) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{\text{Permukaan}} (Y) = 141.8\left(\frac{X}{P} * P_{\text{Standar}}\right)^{-1}$$

$$R^2 = 1$$

Berdasarkan persamaan yang telah diperoleh diatas Y merupakan modulus elastisitas perkerasan pada masing-masing lapisan perkerasan. Sedangkan X merupakan nilai lendutan perkerasan, P merupakan beban yang diberikan pada saat pengujian dan P_{standar} merupakan beban standar untuk setiap jenis as kendaraan.

Daftar Pustaka

- [1] H. Y. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey., 2004.
- [2] D. Kosasih, "Analisis data lendutan perkerasan dengan program backcalc untuk sistem struktur 2 - lapisan," vol. 10, no. 1, pp. 35–50, 2003.
- [3] H. Y. Huang, *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632. U. S. A., 1993.
- [4] K. H. Stolle, D.F.E. and David, *Assessment of the Impact of Layer Moduli on Measured Surface Deflections. Paper prepared for presentation at Pavement Evaluation*. Virginia.: A Joint Conference of the FWD and Road Profilers User Groups: Roanoke, 2002.
- [5] P. J. M. and H. Choi, J.W., Wu, R., "New Layer-Moduli Back- Calculation Method Based on the Constrained Extended Kalman Filter.," *J. Transp. Eng. ASCE.*, vol. 136:1, 2010.
- [6] P. Ullidtz, "Pavement Analysis, Development in Civil Eng.," vol. 19, 1987.
- [7] P. Ullidtz, "Modelling flexible pavement response and performance," University of Denmark., 1998.
- [8] F. van Cauwelaert, "The story of rational design of Pavements," Royal Institute of Technology. Sweden., 1993.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," Washington, D.C, 1993.
- [10] Puslitbang, "Pengkajian Metoda Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasqsan Lentur Dengan Falling Weight Deflectometer (FWD).," Bandung, Indonesia, 2003.
- [11] K. R. Ullidtz, P. and Peattie, "Pavement Analysis by Programmable Calculators," *Transp. Eng. J.*, 1980.
- [12] Dynaflect, *Dynamic Deflection Determination System*. Texas 76049, U. S. A.: Industrial Avenue Granbury, 2001.
- [13] TxDOT, *Frequently Asked Questions about the Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Texas: Department of Transportation, 2008.
- [14] R. . Watson, D.E., Zhang, J., and Powell, *Analysis of Temperature Data for the National Center for Asphalt Technology Test Track*. Washington, D C, 2004.
- [15] Danida dan Pusat Litbang Jalan, "Study of Improved Bearing Capacity Evaluation and Strengthenen Design of Road," Bandung, 1990.
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Wahington, D. C., 1972.

