

# Karakteristik Modulus Elastisitas dan Daya Dukung Material *Subbase Course* Tipe Kelas A Berbasis Pengukuran Defleksi

*Characteristic of Elastic Modulus and Bearing Capacity on Subbase Course with Type A Material Based by Deflection Measurement*

**Asyrin Solandova, Sri Atmaja P. Rosyidi**

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*

**Abstrak.** *Light weight deflectometer (LWD)* adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas suatu perkerasan jalan dengan melakukan analisis lendutan. Alat ini mengukur deformasi vertikal suatu ruas jalan dengan menggunakan beban pada alat uji yang dijatuhkan pada ketinggian tertentu. Modulus elastisitas dianalisis berdasarkan data lendutan hasil pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekuatan struktural berdasarkan nilai modulus elastisitas pada lapisan perkerasan fondasi bawah (*subbase course*). Material kelas A digunakan sebagai penyusun *subbase course*. Pengujian LWD dilakukan pada 16 titik dengan interval  $\pm 30$  cm. Pembebanan dilakukan dengan menggunakan dua level: ketinggian 23 cm dan 33 cm. Pengujian menggunakan alat *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* juga dilakukan pada titik uji yang sama untuk melihat perbandingan hasil antara kedua alat. Analisis regresi dilakukan untuk melihat korelasi antara data hasil pengujian kedua alat. Hasil analisis menunjukkan semakin tinggi titik jatuh yang digunakan maka semakin besar nilai modulus yang dihasilkan. Korelasi yang kuat antara nilai CBR dan modulus elastisitas dari alat *DCP* dan *LWD* pada level 1 dan 2 ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  sebesar 0,5734 dan 0,8241 secara berurutan.

Kata-kata kunci: *Light Weight Deflectometer; LWD*, lapis pondasi bawah, modulus elastisitas, defleksi

**Abstract.** *Light Weight Deflectometer (LWD)* is one of the methods used to evaluate the quality of pavement by deflection analysis. This apparatus measures the vertical deformation of a pavement by applying loads that dropped from a certain level of height. Elastic modulus was analyzed based on the data recorded from the test. This study aims to measure the structural strength based on the elastic modulus of the subbase course. Type A of material was selected as the subbase course. LWD test was conducted on 16 locations with  $\pm 30$  cm intervals. The load applied by two types of levels: 23 cm and 33 cm in height. *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* was also carried out in the same location for data comparison. The regression analysis was employed to investigate the correlation between both methods. The result of this study shows that the higher load of drop level hence the higher elastic modulus. A strong correlation between CBR and elastic modulus value from *DCP* and *LWD* on levels 1 and 2 showed by the  $R^2$  value in the amount of 0,5734 and 0,8241 respectively.

Keywords: *Light Weight Deflectometer; LWD*, subbase course, elastic modulus, deflection

## 1. Pendahuluan

Pemilihan dan penggunaan material khususnya dalam konstruksi jalan raya merupakan hal yang penting untuk menentukan kualitas suatu jalan raya, selain pemilihan material tentu saja perlu dilakukan pemeliharaan dan perbaikan secara berkala untuk menjaga kondisi serta kualitas agar selalu dalam kondisi yang baik untuk melayani pengguna lalu lintas.

Beberapa alat alternatif yang digunakan untuk pengujian langsung di lapangan sebagai peralatan untuk melakukan uji kelayakan pada pekerjaan konstruksi jalan raya yang tersedia saat ini pada bidang geoteknik dan transportasi

di antaranya ialah *Light Weight Deflectometer (LWD)*, *Soil Stiffness Gauge (SSG)* dan *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* (Jitareekul dkk. 2017).

Di Indonesia, salah satu pengujian yang biasa dilakukan sebagai uji kelayakan pada konstruksi jalan raya ialah pengujian *DCP* dan sekarang ini mulai diperkenalkan metode *LWD* sebagai alat alternatif untuk uji kelayakan di lapangan.

Alat *DCP* memiliki parameter kekuatan struktural yang diwakili oleh nilai *California Bearing Ratio (CBR)* (Siegfried, 2018), dan alat *LWD* diwakili oleh nilai modulus elastisitas

sebagai parameter kekuatan lapisan struktural perkerasan jalan yang diuji. Alat *LWD* dan *DCP* merupakan metode pengujian yang bersifat tidak merusak atau bisa disebut dengan *NDT* (*Non Destructive Test*). (Syahrudin, 2010)

Metode *NDT* bertujuan untuk mendeteksi kondisi/kualitas pada benda/material tanpa merusak benda tersebut. Metode ini menjadi solusi untuk menghemat waktu serta biaya dalam melakukan pengecekan kualitas suatu material yang digunakan pada bidang konstruksi baik pada jalan raya ataupun konstruksi yang lain.

*LWD* adalah alat yang dikembangkan di Jerman, khususnya sebagai alat alternatif untuk mengetahui masalah konstruksi pada struktur perkerasan jalan maupun pekerjaan tanah (Shivamant dkk. 2015). Alat *LWD* saat ini tengah populer menjadi alat untuk mengetahui kekakuan suatu bahan/material yang cepat dan hemat biaya dengan menentukan nilai defleksi dan modulus elastisitas pada permukaan tanah (Grasmick dkk. 2014).

Konsep kerja alat *LWD* adalah memanfaatkan gelombang yang didapatkan dari beban yang di jatuhkan pada pelat beban ke permukaan tanah maupun perkerasan yang kemudian diterima oleh sensor yang berupa *geophone* yang diletakan dengan jarak tertentu pada permukaan jalan maupun tanah yang akan diuji, kemudian nilai defleksi yang didapatkan dianalisis menggunakan program komputer yang diproses menjadi nilai modulus elastisitas.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengukuran menggunakan alat *LWD* terbagi menjadi dua, pertama ialah instrumen pendukung dari alat *LWD* itu sendiri, seperti tinggi jatuh beban, ukuran pelat, radius/jarak antar sensor dan berat beban jatuh (Benedetto dkk. 2013) kedua ialah parameter dan sifat volumetrik tanah yang rentan dengan keadaan di sekitar. (Tehrani dkk. 2010)

Perhitungan nilai modulus elastisitas menggunakan alat *LWD* didasarkan pada teori *Boussinesq*, persamaan yang digunakan untuk menganalisis nilai modulus elastisitas dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$E_{LWD} = \frac{K \times (1 - \mu^2) \times P \times r}{d_0} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

K =  $\pi/2$  dan 2 untuk pelat kaku dan lentur,

$d_0$  = Lendutan pada pusat pembebanan (mikron),

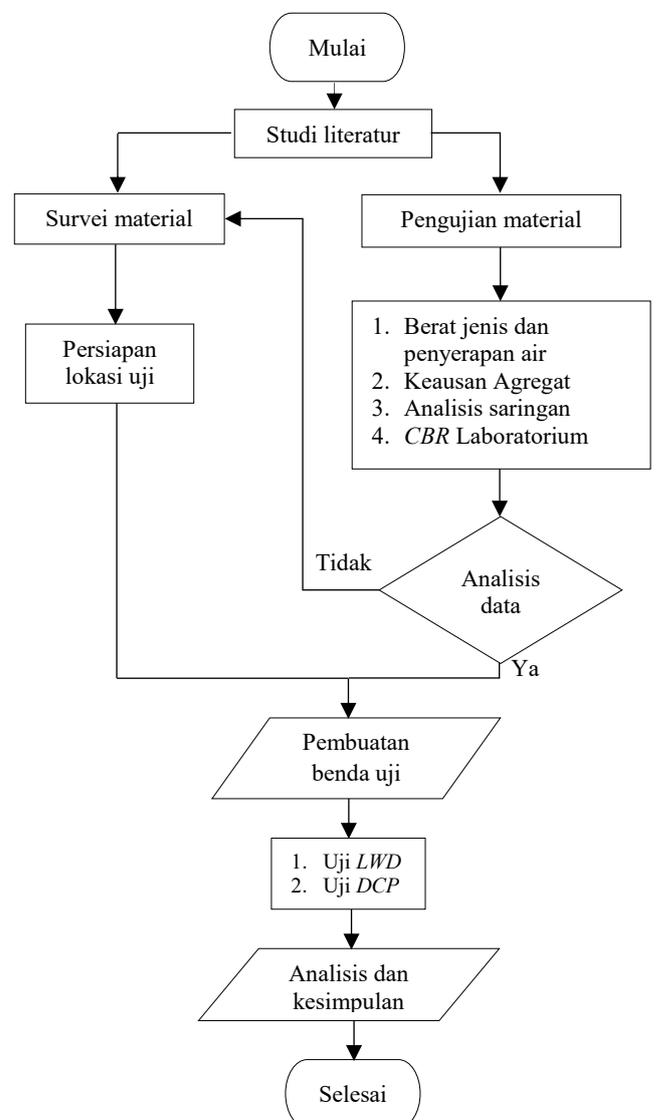
P = Tegangan seragam di bawah pelat (MPa),

$\mu$  = *Poisson Ratio*, (0,15 untuk beton, 0,35 untuk perkerasan),

r = Radius/Jari-jari Pembebanan (mm)

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi mengenai alat dan material yang akan digunakan, survei material dan pengujian material. Setelah pengujian material, benda uji siap dibuat dan dilakukan pengujian *LWD* dan *DCP*.



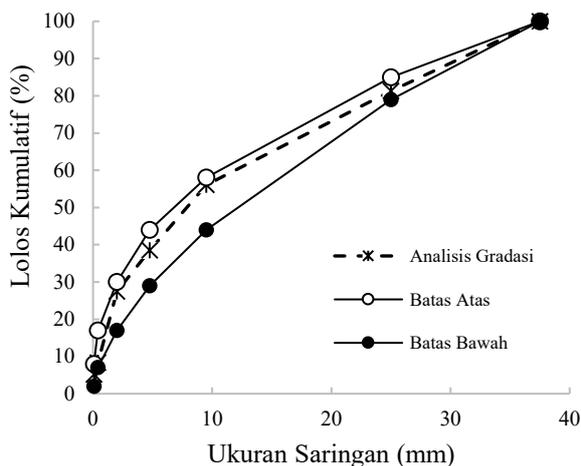
Gambar 1 Bagan Alir Penelitian

### Subbase Course

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa agregat kelas A yang diambil dari Clereng, Sendangsari, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang akan digunakan sebagai bahan utama untuk lapis fondasi bawah yang diuji.

Tabel 1 Hasil pengujian agregat kelas A

Variabel Penelitian	Hasil Penelitian
Berat Jenis Curah Kering	2,33
Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan	2,41
Berat Jenis Semu	2,55
Penyerapan Air	3,75%
Keausan	32,7%
CBR Lab	115,1%



Gambar 2 Distribusi ukuran agregat kelas A

### Pembuatan Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini berupa *Subbase course* yang menggunakan agregat kelas A. Agregat dipasok dari Clereng, Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan rencana ketebalan sebesar 15 cm. Pembuatan benda uji pada penelitian ini diawali dengan penggalian lahan sebagai lokasi uji dengan ukuran  $3 \times 3$  m dan tinggi  $\pm 60$  cm. Setelah selesai dilakukan penggalian, agregat dihamparkan dengan volume yang telah diperhitungkan. Setelah agregat dihamparkan, dilakukan pemadatan menggunakan alat pemadat *stamper*.

### Pengujian Menggunakan Alat Light Weight Deflectometer (LWD)

Pengujian dilakukan pada 16 titik berbeda dengan interval antar titik  $\pm 30$  cm yang terletak pada *subbase course*. Area yang diuji harus dipastikan pada kondisi yang datar dan pastikan tidak ada agregat yang mengganggu permukaan yang diuji, diameter area uji harus 1,5 kali lebih besar daripada diameter pelat alat (Elhakim dkk. 2014).



Gambar 3 Titik uji pengujian

Pada pengujian ini menggunakan alat uji *LWD* dari pusjatan dengan berat beban sebesar 12 Kg. Pada satu titik uji dilakukan lima kali pengujian jatuh beban dan menggunakan dua level (level 1 dan 2) jatuh beban yang berbeda. Hal ini dilakukan karena terjadinya *clipping* ketika diaplikasikan ke beban yang lebih tinggi.

*Clipping* terjadi apabila *count ADC* yang merupakan konversi dari *voltage* yang dihasilkan sensor melebihi 1024 untuk tipe-tipe mikrokontroler yang menggunakan 10 bits, hal ini diatasi dengan menurunkan beban yang akan memicu terjadinya gelombang pada lapisan yang diuji. Fenomena ini biasanya terjadi pada pengujian yang mempunyai kekuatan struktural rendah. (Siegfried, 2018)

### Pengujian Menggunakan Alat Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Pada umumnya pengujian menggunakan alat *DCP* diiringi dengan pengujian tebal lapis perkerasan (*test pits*), namun pada penelitian ini hanya menggunakan pengujian *DCP*, dikarenakan keterbatasan, lokasi, waktu serta biaya. Pengujian dilakukan satu kali uji tiap titik, dimana lokasi tiap titik uji tepat berada pada titik pengujian menggunakan alat *LWD* sebelumnya yang berjumlah 16 titik uji, agar hasil kedua data dapat dibandingkan.

Pengujian dilaksanakan dengan mencatat jumlah pukulan (*blow*) dan penetrasi dari konus yang tertanam pada lokasi uji karena pengaruh

tumbukan yang dilakukan, pembacaan pada penetrometer diubah menjadi pembacaan yang setara dengan nilai *CBR* (Burhanuddin & Junaidi, 2018).

### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

#### *Analisa Perhitungan Manual Modulus Elastisitas LWD ( $E_{LWD}$ )*

Hasil pengukuran menggunakan alat LWD berupa nilai modulus elastisitas yang didapatkan dari pengukuran defleksi. Pengecekan manual nilai modulus elastisitas dilakukan menggunakan persamaan (1). Untuk perbandingan nilai modulus elastisitas hasil alat dan analisis manual pada Titik 1 level 1 dan 2 dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Hasil analisis modulus elastisitas alat dan analisis modulus elastisitas manual pada level 1

No. Uji	Beban (kg)	$d_0$ (mikron)	$E_{LWD}$ (Alat) (MPa)	$E_{LWD}$ (Analisis) (MPa)
Titik 1	1243	478,4	97	97,031
	1243	553	84	83,941
	1243	587,2	79	79,052
	1243	642,1	72	72,293
	1243	650,3	71	71,382

Tabel 3 Hasil analisis modulus elastisitas alat dan analisis modulus elastisitas manual pada level 2

No. Uji	Beban (kg)	$d_0$ (mikron)	$E_{LWD}$ (Alat) (MPa)	$E_{LWD}$ (Analisis) (MPa)
Titik 1	1744	734,2	89	89,705
	1744	631,3	104	104,327
	1744	654,8	100	100,582
	1744	746,7	88	88,203
	1744	656,1	100	100,383

Dari hasil keseluruhan pengujian  $E_{LWD}$  pada level 1 dan 2 yang dilakukan pada lokasi uji, didapatkan nilai terkecil modulus elastisitas pada level 1 dan 2 sebesar 52,069 MPa dan 64,419 MPa, nilai terbesar 102,88 MPa dan 107,144, Standar deviasi sebesar 9,389 dan 8,917, Koefisien varian sebesar 0,116 dan 0,099. Dengan nilai standar deviasi yang tidak terlalu besar maka penyebaran data tidak terlalu besar. Angka batas untuk nilai koefisien variansi adalah 0,3 (30%) yang diambil pada persyaratan AASHTO 1993, semakin kecil

nilai koefisien varian maka keseragaman yang disyaratkan akan semakin baik.

#### *Perbedaan Tinggi Jatuh Terhadap Pengukuran Modulus Elastisitas LWD ( $E_{LWD}$ )*

Hasil dari pengukuran menggunakan alat LWD pada tiap level untuk 16 titik uji pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengujian alat LWD

Titik uji	$E_{LWD}$ Level 1 (MPa)	$E_{LWD}$ Level 2 (MPa)
1	80,4	96,2
2	75,8	85,2
3	71,2	84,6
4	78,8	92,9
5	73,4	88,2
6	74,4	84,8
7	77,4	84,8
8	81,2	89,4
9	87,4	89,6
10	90	91,4
11	93	99,8
12	86,4	95,6
13	76,8	86,4
14	84,2	94,8
15	79,2	88,6
16	76,8	80,4

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa semakin tinggi titik jatuh maka modulus elastisitas yang dihasilkan akan semakin besar, pada pengujian ini didapatkan nilai modulus elastisitas paling besar yang di hasilkan pada masing-masing level terletak pada titik pengujian yang sama yaitu titik 11.

Perbedaan tinggi jatuh secara teoritis memang berpengaruh pada hasil modulus elastisitas yang dihasilkan, Semakin besar level atau tinggi jatuh beban maka nilai modulus elastisitas yang dihasilkan akan semakin besar, hal ini dipengaruhi oleh gaya yang dihasilkan, dimana tinggi jatuh dan gravitasi menjadi pengaruh utama pada saat beban di jatuhkan, yang kemudian tegangan diterima oleh pelat bawah piringan.

#### *Hasil Pengujian Menggunakan Alat Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*

Alat *DCP* yang banyak dikenali dan digunakan di Indonesia adalah *DCP* yang diperkenalkan oleh TRL yang dilaporkan pada *Overseas Road Note 31*, Chrowthorne, UK (1993) untuk kondisi tropis dan sub-tropis. (Syahrudin S. 2010).

Alat *DCP* jenis ini dapat mengukur kekuatan struktural jalan tanah dalam parameter *CBR* sampai dengan kedalaman 1000 mm. Perhitungan nilai *CBR* yang digunakan adalah persamaan dari TRL, *Road Note 8*, 1990 (konus 60°) dengan persamaan  $\text{Log } CBR = 2,48 - 1,057 (\text{Log } DCPI)$ . Hasil dari pengujian alat *DCP* berupa kecepatan penurunan konus (*DCPI*) yang di analisis sehingga menjadi nilai *CBR*. Hasil analisis nilai *CBR* menggunakan alat *DCP* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil analisis nilai *CBR*

Titik	<i>DCPI</i> (mm/tumbukan)	<i>CBR</i> (TRL (1990)) (%)
1	2,534	113,026
2	2,834	100,419
3	2,934	96,805
4	2,667	107,077
5	2,7	105,694
6	2,834	100,419
7	2,8	101,708
8	2,734	104,305
9	2,734	104,305
10	2,667	107,077
11	2,334	123,288
12	2,5	114,651
13	2,834	100,419
14	2,667	107,077
15	2,7	105,694
16	2,834	100,419

#### **Hubungan Hasil Pengujian *LWD* dan *DCP***

Hasil pengujian menggunakan masing-masing alat dibandingkan dan dibuat analisis regresi untuk melihat korelasi antar hasil pengujian. Untuk hasil perbandingan nilai *CBR* dari alat *DCP* dan nilai modulus elastisitas menggunakan alat *LWD* dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7.

Tabel 6 Perbandingan hasil  $E_{LWD}$  lv. 1 dan *CBR* dari pengujian *DCP*

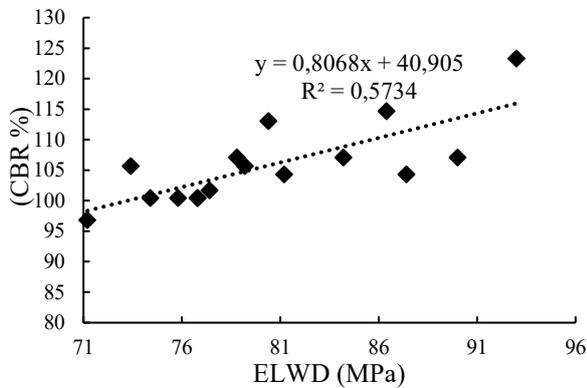
Titik	$E_{LWD}$ (MPa)	<i>CBR</i> (TRL (1990)) (%)
1	80,4	113,026
2	75,8	100,419
3	71,2	96,805
4	78,8	107,077
5	73,4	105,694
6	74,4	100,419
7	77,4	101,708
8	81,2	104,305
9	87,4	104,305
10	90	107,077
11	93	123,288
12	86,4	114,651
13	76,8	100,419
14	84,2	107,077
15	79,2	105,694
16	76,8	100,419

Tabel 7 Perbandingan hasil  $E_{LWD}$  lv. 2 dan *CBR* dari pengujian *DCP*

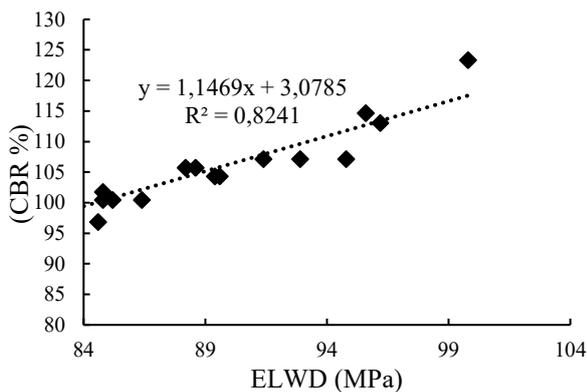
Titik	$E_{LWD}$ (MPa)	<i>CBR</i> (TRL (1990)) (%)
1	96,2	113,026
2	85,2	100,419
3	84,6	96,805
4	92,9	107,077
5	88,2	105,694
6	84,8	100,419
7	84,8	101,708
8	89,4	104,305
9	89,6	104,305
10	91,4	107,077
11	99,8	123,288
12	94,8	114,651
13	86,4	100,419
14	94,8	107,077
15	88,6	105,694
16	80,4	100,419

Hubungan hasil *LWD* dengan tinggi jatuh level 1 dan *CBR* didapatkan analisis regresi dengan persamaan  $y = 0,8068x + 40,905$  dan nilai  $R^2 = 0,5734$  dapat dilihat pada Gambar 3, Untuk hasil *LWD* dengan tinggi jatuh level 2, hasil analisis regresi yang di dapat adalah  $y = 1,1469x - 3,0785$  dan nilai  $R^2 = 0,8241$  yang dapat dilihat pada Gambar 4, hasil dari

persamaan berikut dapat diketahui bahwa nilai pada kedua pengujian ini memiliki karakteristik yang sama, yaitu jika nilai *CBR* yang diuji memiliki nilai yang besar maka nilai modulus elastisitas juga akan besar, berlaku sebaliknya.



Gambar 3 Hubungan nilai  $E_{LWD}$  level 1 (MPa) dan *CBR* (%)



Gambar 4 Hubungan nilai  $E_{LWD}$  level 2 (MPa) dan *CBR* (%)

Dari hasil pengujian *DCP* didapat pencatatan nilai *mm/blows*, yang kemudian dikonversi menggunakan persamaan milik Chen dkk. (2005) untuk mengubah nilai *DCPI* menjadi modulus elastisitas dengan persamaan  $E = 537,76 (DCPI)^{-0,6645}$ . Chen dalam George (2009:191), menggabungkan hasil penelitian AASHTO (1993) dan Powell (1984) untuk mendapatkan hubungan antara nilai penetrasi (*DCPI*) untuk mengukur *DCP* dan modulus (MPa), persamaan ini didapatkan hasil analisis regresi antar kedua alat dengan nilai  $R^2 = 0,855$ .

Untuk hasil perbandingan nilai modulus elastisitas dari alat *DCP* ( $E_{DCP}$ ) dan nilai modulus elastisitas menggunakan alat *LWD* dapat dilihat pada Tabel 8 dan 9.

Tabel 8 Perbandingan hasil  $E_{LWD}$  lv. 1 dan  $E_{DCP}$  dari pengujian *DCP*

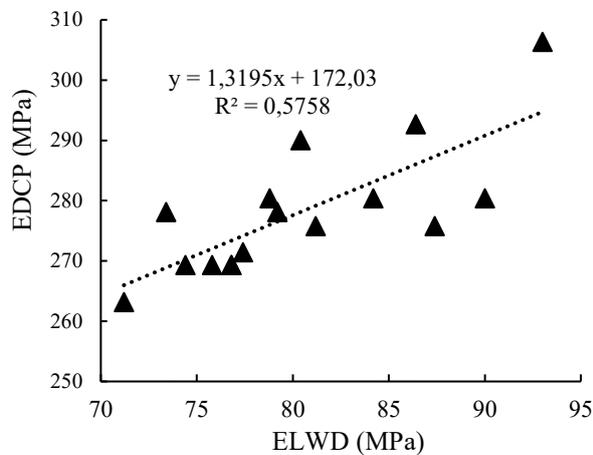
Titik	$E_{LWD}$ (MPa)	$E_{DCP}$ (Chen dkk. (2005)) (MPa)
1	80,4	290,043
2	75,8	269,295
3	71,2	263,165
4	78,8	280,377
5	73,4	278,097
6	74,4	269,295
7	77,4	271,462
8	81,2	275,796
9	87,4	275,796
10	90	280,377
11	93	306,339
12	86,4	292,678
13	76,8	269,295
14	84,2	280,377
15	79,2	278,097
16	76,8	269,295

Tabel 9 Perbandingan hasil  $E_{LWD}$  lv. 2 dan  $E_{DCP}$  dari pengujian *DCP*

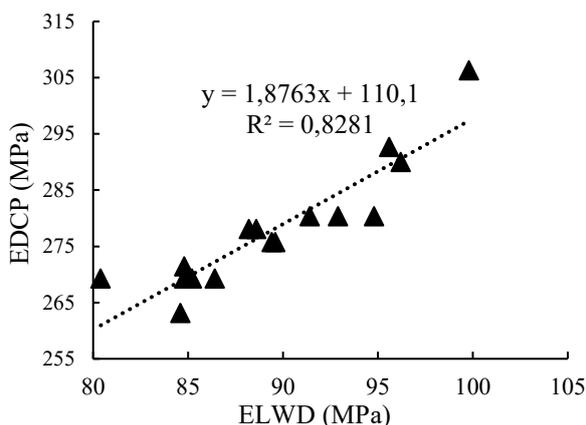
Titik	$E_{LWD}$ (Mpa)	$E_{DCP}$ (Chen dkk. (2005)) (Mpa)
1	96,2	290,043
2	85,2	269,295
3	84,6	263,165
4	92,9	280,377
5	88,2	278,097
6	84,8	269,295
7	84,8	271,462
8	89,4	275,796
9	89,6	275,796
10	91,4	280,377
11	99,8	306,339
12	95,6	292,678
13	86,4	269,295
14	94,8	280,377
15	88,6	278,097
16	80,4	269,295

Berdasarkan hubungan analisis regresi antara nilai  $E_{LWD}$  pada level 1 dan  $E_{DCP}$  menggunakan persamaan milik Chen dkk. (2005), didapatkan analisis regresi dengan persamaan  $y = 1,3195x + 172,03$  dengan nilai

$R^2 = 0,5758$  yang dapat , Untuk hasil analisis regresi antara nilai  $E_{LWD}$  pada level 2 dan  $E_{DCP}$  didapatkan persamaan  $y = 1,8763x + 110,1$  dengan nilai  $R^2 = 0,8281$  yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Hubungan nilai  $E_{LWD}$  level 1 (MPa) dan  $E_{DCP}$  (MPa)



Gambar 6 Hubungan nilai  $E_{LWD}$  level 2 (MPa) dan  $E_{DCP}$  (MPa)

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa :

- Hasil penelitian pada pengujian level 1 didapatkan nilai terbesar modulus elastisitas adalah 93 MPa yang terletak pada titik 11 dan nilai terkecil 71,2 MPa terletak pada titik 3 dan pada pengujian level 2 didapatkan nilai terbesar modulus elastisitas terbesar adalah 99,8 MPa yang terletak pada titik 11 dan nilai terkecil 80,4 MPa terletak pada titik 16.

- Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi titik jatuh beban alat  $LWD$  maka nilai modulus elastisitas yang dihasilkan semakin besar.
- Dari hasil korelasi antara nilai  $CBR-DCP$  dan pengujian dengan nilai  $LWD$  level 1 didapatkan analisis regresi  $y = 0,8068x + 40,905$  dengan nilai  $R^2 = 0,5734$ , dan untuk nilai  $CBR-DCP$  dan pengujian dengan nilai  $LWD$  level 2 didapatkan analisis regresi  $y = 1,1469x - 3,0785$  dengan nilai  $R^2 = 0,8241$ .
- Untuk hasil korelasi nilai modulus elastisitas dari alat  $DCP$  dan nilai modulus elastisitas alat  $LWD$  menggunakan level 1 didapatkan analisis regresi  $y = 1,3195x + 172,03$ , dengan nilai  $R^2 = 0,5758$  , dan untuk korelasi nilai modulus elastisitas dari alat  $DCP$  dan nilai modulus elastisitas alat  $LWD$  menggunakan level 2 didapatkan analisis regresi  $y = 1,8763x + 110,1$  dengan nilai  $R^2 = 0,8281$ .
- Hubungan antara hasil uji pada alat  $LWD$  dan  $DCP$  memiliki korelasi yang cukup kuat yang dilihat pada nilai  $R^2$  pada hasil setiap analisis regresi di tiap pengujian. Dapat dikatakan hasil dari modulus elastisitas alat  $LWD$  dapat menjadi parameter untuk mengetahui kondisi perkerasan jalan *subbase* yang diuji sama seperti nilai  $CBR$  pada alat  $DCP$ .

#### 5. Daftar Pustaka

- AASHTO. (1993). *American Association of State Highway and Transport Officials guide for mechanistic-empirical (M-E) design and analysis*. Washington, DC: AASHTO.
- Benedetto, A., Tosti, F., & Di Domenico, L. (2012). Elliptic model for prediction of deflections induced by a light falling weight deflectometer. *Journal of Terramechanics* 49 (1), 1-12.
- Burhanuddin, & Junaidi. (2018). Hubungan empiris daya dukung tanah dasar menggunakan alat dynamic cone penetrometer (DCP) dan california bearing ratio (CBR) rendaman untuk disain tebal perkerasan lentur jalan raya. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 1(3), 553-558.

- Chen, D. H., Lin, D. F., Liao, P. H., & Bilyeu, J. A. (2005). Correlation Between Dynamic Cone Penetrometer Values and Pavement Layer Moduli. *Geotechnical Testing Journal*, 28(1), 42-49.
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., & Amer, M. I. (2013). The use of light weight deflectometer for in situ. *HBRC Journal*, 10, 298-307.
- George, V., Rao, N. C., & Shivashankar, R. (2009). PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 189-199.
- Grasmick, J., Mooney, M., & Surdahl, R. (2014). Capturing a layer response during curing of stabilized earthwork using a multi sensor light weigh deflectometer. *Journal of Material in Civil Engineering*, 27(6), 34-45.
- Jitarekul, P., Sawangsuriya, A., & Singhatiraj, P. (2017). Integration of Pavement Layer Evaluation Using LWD for Road Safety Control. *Procedia Engineering*, 189, 111-117.
- Powell, W. D. (1984). *The Structural Design of Bituminous Roads*. London: TRRL report LR 1332.
- Shivamant, A., Kolase, P. K., S., S. P., Desai, M. K., & Desai, A. K. (2015). Study of the Light Weight Deflectometer and Reviews. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3, 42-46.
- Siegfried. (2018). LWD Pusjatan Sebagai Alat Alternatif Dalam Mengevaluasi Perkerasan Lentur. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 35, 75-83.
- Siegfried. (2018). Penggunaan Light Weight Deflectometer Pusjatan untuk Quality Control Pekerjaan Pematatan Tanah. *Jurnal Tiarsie*, 15(2), 45-48.
- Syaruddin S., A. (2010). Pengujian daya dukung perkerasan jalan dengan Dynamic Cone Penetration (DCP) sebagai standar untuk evaluasi pekerjaan jalan. *Jurnal Aptek*, 2(1), 52-59.
- Tehrani , F. S., & Meehan, C. L. (2010). The effect of water content on light weight deflectometer measurement. *In: Geoflorida 2010: Advances in Analysis, Modelling & Design, Orlando*, 930-939.
- TRL, Overseas Road Note 31. (1993). *A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries*. Chrowthorne. United Kingdom: Transport Research Laoratory.