

Karakteristik Modulus Elastisitas Dan Daya Dukung Material *Base Course* Tipe Kelas B Berbasis Pengukuran Defleksi

Characteristic of Elastic Modulus and Bearing Capacity on Base Course with Type B Material Based by Deflection Measurement.

Devi Adhadila Cahyaning, Sri Atmaja P. Rosyidi

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Tersedianya infrastruktur jalan yang baik dan berkualitas merupakan hal utama dalam pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Oleh sebab itu kualitas jalan harus mampu melayani peningkatan lalu lintas dan struktur perkerasan jalan harus didesain dengan baik. Pada struktur jalan, lapisan perkerasan terdiri dari lapisan permukaan (*surface*), lapisan pondasi (*subbase* atau *base*) dan lapisan tanah dasar (*subgrade*). Pengujian kekuatan struktural dibutuhkan dalam mengevaluasi suatu lapisan pondasi. Pengujian LWD merupakan salah satu alat yang digunakan untuk mengukur kekuatan struktural dari suatu sistem perkerasan jalan. Pengujian LWD menggunakan prinsip teori gelombang dengan menjatuhkan beban pada ketinggian tertentu yang ditangkap oleh sensor *geophone*. Hasil dari LWD yaitu lendutan yang digunakan untuk menghitung modulus elastisitas menggunakan persamaan *Boussinesq*. Alat ini digunakan pada pengujian lapis pondasi atas (*base course*) di area kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dengan 16 titik pengujian. Pada titik pengujian yang sama dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), dari pengujian ini diperoleh nilai CBR (%) dan modulus elastisitas (MPa) yang didapat dari nilai DCPI. Hasil pengujian LWD dan DCP menghasilkan modulus elastisitas yang tidak jauh berbeda, dimana hasil yang didapat mempunyai nilai korelasi yang cukup kuat, sehingga alat LWD dapat digunakan untuk pemeriksaan kekuatan struktural pada perkerasan jalan.

Kata-kata kunci: *Light Weight Deflectometer* (LWD), *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), *Boussinesq*, Modulus Elastisitas.

Abstract. A good and qualified condition of road infrastructure is a main issue in economic growth in Indonesia. Therefore, the road quality must be able to serve the traffic increase and the pavement structure must be well-designed. In pavement structure, the pavement structure consists of surface layer, subbase or base layer, and subgrade layer. The testing of structural strength is required in evaluating a subbase or base layer. The LWD testing is a tool used to measure the structural strength of a pavement structure system. LWD testing uses the principle of wave theory by dropping some load from particular height is taken by the *geophone* sensor. The result of LWD is the deflection which is used for measuring elastic modulus applying *Boussinesq* equation. This tool was used in the base course layer testing in the campus area of Universitas Muhammadiyah Yogyakarta with 16 testing points. In the same testing point, *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) was conducted. From this testing, the value of CBR (%) and elastic modulus (MPa) obtained from the value of DCPI. The comparison on LWD and DCP results show the both testing produce the similar elastic modulus in which the results obtained have fairly strong correlation value. Thus, the LWD tool can be used for the inspection of structural in the pavement structure.

Keywords : *Light Weight Deflectometer* (LWD), *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), *Boussinesq*, Elastic Modulus.

1. Pendahuluan

Tersedianya infrastruktur jalan yang baik dan berkualitas harus mampu melayani peningkatan lalu lintas dan struktur perkerasan jalan harus didesain dengan baik, oleh karena itu dibutuhkan pengujian yang lebih efektif untuk mengetahui kekuatan struktural dari suatu sistem perkerasan jalan

menggunakan pengujian *Light Weight Deflectometer* (LWD).

Makwana (2016) melakukan penelitian tentang penggunaan alat LWD untuk mengevaluasi modulus elastisitas dalam mengontrol kualitas jalan dengan menghubungkan kepadatan dengan kadar air. Pada penelitian ini modulus elastisitas dihitung menggunakan software LWDmod,

menggunakan data pengujian kepadatan dan kadar air. Nilai kepadatan yang tinggi menunjukkan pemadatan yang baik, nilai kepadatan yang diperoleh berkisar antara 1,4-2 gm/cc dengan koefisien variasi 0,376 dan nilai kadar air berkisar antara 7-33% dengan koefisien variasi 0,092. Oleh karena itu, peningkatan nilai kepadatan dan penurunan kadar air merupakan parameter untuk mengontrol jaminan kualitas jalan yang baik.

Sulewska & Bartnik (2017) melakukan penelitian tentang analisis lapisan agregat ditempatkan pada tanah yang diperkuat dengan geosintetik dengan menggunakan LWD. Penggunaan geosintetik memiliki dampak yang signifikan terhadap modulus elastisitas, nilai modulus elastisitas yang didapat lebih tinggi dibandingkan agregat ditempatkan pada tanah yang tidak menggunakan geosintetik. Oleh sebab itu, penerapan LWD dapat mengontrol pemadatan lapisan agregat pada tanah yang diperkuat dengan geosintetik.

Stamp & Mooney (2013) melakukan penelitian tentang karakteristik alat LWD dengan pengukuran lendutan. Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan nilai lendutan dan modulus elastisitas yang berbeda untuk kondisi tanah yang sama. Dalam penelitian ini faktor yang mempengaruhi karakteristik desain LWD dengan defleksi adalah pengukuran respon pelat terhadap permukaan tanah.

Siegfried (2017) melakukan penelitian pada jalan tanah di Bogor dan Kuningan masing-masing lokasi diambil 10 titik pengujian. Pengujian pertama yang dilakukan menggunakan pengujian LWD, dari pengujian ini didapat nilai lendutan yang kemudian dihitung untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas. Pada titik yang sama dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). Pengujian ini digunakan sebagai alat pembanding untuk mengetahui nilai modulus elastisitas. Hasil pengujian LWD dan DCP dibandingkan satu dengan yang lainnya. Dari kedua lokasi ini menunjukkan korelasi antara LWD dan DCP berada dalam interval 85% tingkat kepercayaan. Korelasi dengan tingkat kepercayaan 85% sudah cukup baik digunakan dalam teknik jalan raya. Pengujian ini membuktikan alat LWD bisa digunakan untuk mendapatkan kekuatan struktural jalan.

Syahrudin (2010) melakukan penelitian tentang pengujian daya dukung perkerasan jalan dengan DCP sebagai standar untuk evaluasi perkerasan jalan. Dari pengujian DCP dapat diketahui kedalaman lapisan perkerasan dan nilai CBR. Pengujian DCP relatif sangat cepat untuk mengidentifikasi nilai CBR lapis perkerasan jalan yang ada di lapangan, untuk penyelidikan atau pemeriksaan tebal dan daya dukung perkerasan

jalan. Oleh sebab itu pengujian DCP perlu dijadikan pedoman untuk mengidentifikasi nilai CBR lapangan di Indonesia.

Burhanuddin & Junaidi (2018) meneliti tentang hubungan daya dukung tanah dengan menggunakan alat DCP dan CBR laboratorium rendaman. Dari permasalahan yang ada CBR laboratorium rendaman memerlukan waktu yang cukup lama, oleh karena itu dilakukannya pengujian DCP untuk menghasilkan nilai empiris yang didapat setelah dilakukan penelitian. Dari data CBR lapangan dan CBR laboratorium yang diperoleh, didapatkan hasil hitungan regresi dari keduanya dengan persamaan : $CBR_{Dcp} = 1,803 + (0,347 \times CBR_{Lab})$. Dari pengujian DCP yang dilakukan pada 10 titik pengujian didapatkan hasil CBR sebesar 6%. Pada pengujian CBR laboratorium rendaman selama 4 hari didapatkan hasil CBR lebih bagus dari nilai CBR lapangan.

Siegfried (2018) melakukan penelitian tentang penggunaan LWD Pusjantan sebagai alternatif dalam mengevaluasi perkerasan lentur. Tujuan dari penelitian ini untuk membuktikan alat LWD bisa digunakan untuk perancangan perkerasan lentur pada jalan dengan lalu lintas sedang sampai rendah. Pembuktian dilakukan dengan perbandingan modulus yang didapat dari alat FWD dan LWD. Dari penelitian ini didapat hubungan antara modulus permukaan dengan jarak 900 mm pada titik pembebanan yang dihitung menggunakan data lendutan FWD dan LWD. Dapat disimpulkan dari penggunaan alat LWD bisa digunakan sebagai alat alternative dalam mengevaluasi sistem perkerasan pada jalan dengan lalu lintas sedang sampai rendah.

Lapian (2018) melakukan penelitian tentang mengkaji nilai modulus elastisitas pada ruas jalan dengan volume lalu lintas rendah di BTS. Boven Digoel/Merauke menggunakan alat LWD. Dari penelitian yang dilakukan nilai modulus elastisitas yang didapat berbeda-beda pada setiap lokasi pengujian, hal ini disebabkan karena variasi dalam pemadatan energi.

Jitareekul dkk (2017) melakukan penelitian untuk mengevaluasi lapisan perkerasan jalan di Thailand menggunakan LWD dalam pengendalian keselamatan jalan. Dalam penelitian ini LWD digunakan untuk mengukur defleksi permukaan, dan modulus elastisitas lapisan perkerasan jalan. Koefisien variasi dari nilai defleksi dan modulus elastisitas berkisar antara 58-77%. Dari hasil tersebut diperoleh hubungan empiris antara nilai-nilai yang didapat dari pengujian LWD. Oleh sebab itu, alat LWD merupakan alat untuk mengukur defleksi dan modulus elastisitas secara cepat, sehingga alat ini dapat digunakan untuk peningkatan kontrol kualitas jalan.

Siegfried (2019) melakukan penelitian tentang alat LWD untuk *quality control* pekerjaan pemadatan tanah dasar. Pada pelaksanaan pekerjaan pemadatan parameter utama yang menjadi pertimbangan adalah derajat kepadatan. Pengukuran derajat kepadatan dalam pelaksanaan konstruksi menggunakan peralatan yang disebut konus pasir (*sandcone*). Alat ini digunakan untuk menghitung kepadatan lapangan kemudian membandingkan dengan kepadatan rencana yang didapat dari perancangan di laboratorium. Kelemahan dari penggunaan alat tersebut sebagai *quality control* dalam suatu proses pemadatan adalah waktu yang cukup lama. Hal ini sangat tidak efisien karena biasanya pekerjaan pemadatan mencapai panjang 2 kilometer. Dalam pengujian yang membutuhkan waktu yang lama ini, sehingga Spesifikasi Bina Marga (2018) mensyaratkan penggunaan alat LWD sebagai alternatif dalam proses *quality control* untuk pemadatan lapisan granular pada pekerjaan konstruksi jalan. Hal ini disebabkan penggunaan alat LWD bisa mempercepat pelaksanaan pekerjaan jalan.

2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Mengkaji pengaruh tinggi jatuh terhadap nilai modulus elastisitas pada alat LWD.
2. Untuk menghitung modulus elastisitas dengan pengujian menggunakan alat LWD dan DCP.
3. Untuk menganalisis karakteristik perbandingan modulus elastisitas antara alat LWD dan DCP.

3. Metode Penelitian

Data diambil di area kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, tepatnya berada di sebelah Timur Laboratorium Transportasi dan Jalan Raya gedung G5. Pada lokasi tersebut diambil data dengan titik pengujian yang sama menggunakan LWD dan DCP. Pengujian yang pertama dilakukan adalah LWD, kemudian dilakukan pengujian DCP. Pengujian menggunakan alat DCP dipakai karena sebagai pembanding alat LWD. Parameter pembanding dari kedua pengujian tersebut adalah modulus elastisitas dari lapisan jalan yang diuji.

Light Weight Deflectometer (LWD)

Menurut ASTM E2583-07, LWD merupakan alat yang secara umum digunakan untuk uji coba lapisan perkerasan. Pengukuran defleksi yang menggunakan LWD dapat digunakan untuk menentukan kekakuan dari permukaan perkerasan dengan teknik analisis yang sesuai. LWD terdiri dari perangkat beban yang menghasilkan plat beban dan sensor *geophone* pusat (perangkat data defleksi) untuk mengukur defleksi permukaan pusat. LWD

digunakan untuk pekerjaan jalan dengan berat 15-25 kg, dapat dioperasikan oleh dua orang dan pengujian ini dapat diselesaikan 1-2 menit Makwana (2016). Tahapan pengujian alat LWD adalah sebagai berikut :

- a. Alat *Light Weight Deflectometer* (LWD) diletakkan pada titik pengujian. Lapisan yang bisa diuji LWD mempunyai kemiringan maksimum 4%.
- b. Posisi pelat pembebanan dan sensor *geophone* diperiksa kembali.
- c. Beban diangkat pada ketinggian tertentu sampai mencapai level tegangan yang diinginkan. Kemudian beban dijatuhkan sehingga menimbulkan beban impak pada pelat pembebanan.
- d. Pengujian pada titik tersebut dilakukan minimum 2 kali pengujian. Apabila perbedaan hasil pengujian 1 dan 2 lebih besar dari 3%, catat perbedaan ini dalam laporan. Pengujian ketiga dibutuhkan apabila hal ini terjadi.

Dalam perhitungan modulus elastisitas digunakan rumus *Boussinesq* yang diturunkan sebagai berikut:

$$E_0 = \frac{K \times (1-\mu^2) \sigma_c \times a}{d_0} \dots \dots \dots (1)$$

Sumber : Kolase dkk (2015)

Keterangan :

- E_0 : Modulus permukaan, MPa
- σ_c : Tegangan kontak, MPa.
- μ : *Poisson's rattoo*
- K : Faktor tegangan distribusi (2 atau $\frac{\pi}{2}$)
- a : Jari-jari pelat pembebanan, mm.
- d_0 : Lendutan, mikro meter.

Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Menurut Lengkong dkk (2013) pengujian DCP bertujuan untuk menentukan nilai CBR tanah dasar, timbunan, dan/atau suatu sistem perkerasan. Pengujian ini akan memberikan data kekuatan tanah sampai kedalaman kurang lebih 70 cm di bawah permukaan lapisan tanah yang ada atau permukaan tanah dasar. Pengujian ini dilakukan dengan mencatat data masuknya konus ke dalam tanah untuk setiap pukulan dari palu yang masing-masing memiliki berat dan tinggi jatuh berbeda. Pengujian dilaksanakan dengan mencatat jumlah pukulan (*blow*) dan penetrasi dari konus (kerucut logam) yang tertanam pada tanah atau lapisan pondasi karena pengaruh penumbuk kemudian dengan menggunakan grafik dan rumus, pembacaan

penetrometer diubah menjadi pembacaan yang setara dengan nilai CBR.

Hubungan nilai CBR dan DCP, dari data nilai DCP merupakan jumlah rata-rata dari penetrasi per pukulan (mm/pukulan). Dari nilai DCP yang ada, dapat dicari nilai CBR. Semakin kecil nilai penetrasi DCP (mm/pukulan), maka semakin besar nilai CBR yang terjadi, dan sebaliknya semakin besar nilai penetrasi DCP (mm/pukulan), semakin kecil nilai CBR yang terjadi. Berdasarkan hasil dari penelitian George dkk (2009), persamaan yang digunakan hubungan DCP dan CBR ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. CBR-DCPI

Penelitian	Persamaan	Material yang diuji
Kylen (1975)	$\text{Log CBR} = 2,62 - 1,27 \log \text{PI}$	Jenis tanah yang tidak diketahui
Smith dan Pratt (1983)	$\text{Log CBR} = 2,555 - 1,145 \log \text{PI}$	Kerikil dan kohesif
Harison (1987)	$\text{Log CBR} = 2,70 - 1,12 \log \text{PI}$ Dimana $\text{PI} < 10$ mm/pukulan	Kerikil dan kohesif
Ese dkk (1994)	$\text{Log CBR} = 2,44 - 1,07 \log \text{PI}$	Agregat lapis pondasi
NCDOT (1998)	$\text{Log CBR} = 2,60 - 1,07 \log \text{PI}$	Agregat lapis pondasi dan kohesif
Coonse (1999)	$\text{Log CBR} = 2,53 - 1,14 \log \text{PI}$	Tanah residu
Nazal dkk (2003)	$\text{CBR} = 2559,4 / (7,35 + \text{PI}^{1,84}) + 1,04$ Dimana $6,31 < \text{PI} < 66,67$	Granular dan tanah kohesif
Webster dkk (1992)	$\text{Log CBR} = 2,465 - 1,12 \log \text{PI}$	Macam-macam jenis tanah

Sumber : Uz dkk (2015)

Hubungan antara nilai DCPI dengan nilai modulus elastisitas dapat digunakan dengan persamaan yang ditunjukkan pada Tabel 2 dibawah ini:

Tabel 2. Modulus Elastisitas-DCPI

Penelitian	Persamaan	Material yang diuji
De Beer (1990)	$E_s = 1176 (\text{PI})^{-1,082}$	Granular dan tanah kohesif
Pandey dkk (2003)	$M_R = 357,87 (\text{PI})^{-0,6445}$	Granular dan tanah kohesif
Chent dkk (2005)	$E_s = 537,8 (\text{PI})^{-0,664}$	Granular dan tanah kohesif
Siekmeier dkk (2009)	$E_{\text{PI}} = 10^{3,04758 - [1,06166 \log (\text{PI})]}$	Granular dan tanah kohesif
George dan Uddin (2000)	$M_R = 235,3 (\text{PI})^{-0,475}$	Granular

Sumber : Uz dkk (2015)

Validitas dan Realibilitas

Validitas merupakan suatu uji instrument yang dilakukan untuk mengukur valid tidaknya suatu data penelitian. Menurut Ghazali (2018) suatu data dapat dikatakan valid jika setiap variabel mampu mengukur hal yang diukur. Penentuan

validitas dengan cara perhitungan korelasi yang didapat dari nilai koefisien korelasi setiap item yang menunjukkan kelayakan data tersebut.

Realibilitas merupakan suatu pengujian yang dilakukan untuk mengetahui seberapa konsisten data selama dua kali atau lebih terhadap permasalahan yang sama menggunakan alat pengukuran yang sama (Sugiyono, 2014). Semakin tinggi tingkat hubungan antara nilai yang diperoleh melalui pengukuran yang berulang, sehingga data semakin dapat diandalkan. Tinggi rendahnya reliabilitas dinyatakan dengan suatu nilai yang disebut koefisien reliabilitas. Koefisien reliabilitas berkisaran antara 0-1. Salah satu alat ukur realibilitas adalah *Cronbach's Alpha* yang memiliki rentang sebagai berikut :

- Alpha < 0.50 reliabilitas rendah.
- 0.50 < alpha < 0.70 reliabilitas moderat.
- alpha > 0.70 maka reliabilitas mencukupi (*sufficient reliability*).
- alpha > 0.80 maka reliabilitas kuat.
- alpha > 0.90 maka reliabilitas sempurna.

4. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Tinggi Jatuh pada Alat LWD

Tingkatan beban pada alat LWD terdapat lima tingkatan yang dimulai dari level 1 sampai level 5. Pada pengujian ini level yang digunakan yaitu level 1 dan level 2 saja, karena jika menggunakan level yang lebih tinggi pada saat pengujian akan mengalami *clipping*, sehingga level beban yang digunakan harus diturunkan. Beban yang digunakan sebesar 12 kg, tinggi jatuh untuk level 1 sebesar 0,23 m, sedangkan tinggi jatuh untuk level 2 sebesar 0,33 m.

Dari pengujian LWD didapatkan hasil yaitu nilai modulus elastisitas. Modulus elastisitas dihitung dengan menggunakan teori setengah ruang elastis, tegangan kontak pelat, defleksi, dan membuat asumsi untuk distribusi tegangan. Hasil pengujian E_{LWD} level 1 dan level 2 pada titik 1 dan titik 2 dapat dilihat dari Tabel 3 dan Tabel 4.

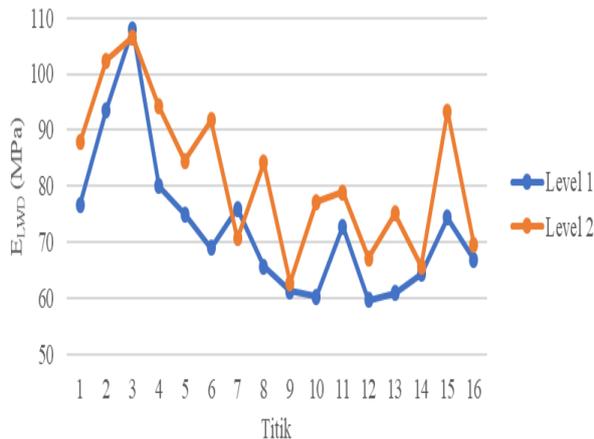
Tabel 3. Hasil Pengujian LWD Level 1 pada Titik 1 dan 2

Titik	d_0 (mikrometer)	d_1 (mikrometer)	d_2 (mikrometer)	E_{LWD} Alat (MPa)
1	815,8	570,1	92,9	57
	523,1	13,9	144,1	89
	614,7	11,2	142,3	75
	568	10,5	148,3	82
	571,2	11,5	137,9	81
2	777,8	13,4	336,2	60
	494,7	11,3	169,9	94
	418,7	12,7	180,9	111
	513,3	14,4	173,3	90
	411,4	15	182,5	113

Tabel 4. Hasil Pengujian LWD Level 2 pada Titik 1 dan 2

Titik	d ₀ (mikrometer)	d ₁ (mikrometer)	d ₂ (mikrometer)	E _{LWD} Alat (MPa)
1	608,1	14,3	140,7	107
	698,4	31,6	329	93
	867,6	12,4	337,1	75
	780,6	17,2	352	83
	802,2	27	313,5	81
2	425,1	13,4	153,1	153
	691,9	23,2	459,6	94
	720,2	26,7	473,7	90
	710,7	20,2	480,4	91
	778,2	19,6	484,5	84

Hasil E_{LWD} level 1 dan level 2 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi beban yang dijatuhkan, maka semakin tinggi pula modulus elastisitas yang dihasilkan. Pada level 1 memiliki nilai modulus elastisitas yang kecil dibandingkan level 2, hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil nilai modulus elastisitas antara level 1 dengan level 2 mengalami kenaikan lendutan pada beberapa titik dengan presentase kenaikan sebesar 15,08% setiap titiknya. Selain mengalami kenaikan, ada 2 titik yang mengalami penurunan yaitu pada titik 3 dan 7 sebesar 4,07%.



Gambar 1 Hasil E_{LWD} level 1 dan level 2

Analisis Perhitungan E_{LWD}

Nilai defleksi digunakan sebagai ukuran kekakuan bahan dalam perhitungan modulus elastisitas. Modulus elastisitas dapat dihitung dari defleksi permukaan menggunakan persamaan *Boussinesq* atau setengah ruang elastis. Defleksi yang digunakan pada titik pembebanan adalah d₀. Berikut merupakan data-data untuk menganalisis E_{LWD} level 1 pada titik pertama.

- Beban jatuh = 12 kg
- Percepatan gravitasi, g = 9,81 m/s²
- Tinggi drop, h₁ = 0,23 m (untuk level 1)
- h₂ = 0,33 m (untuk level 2)
- d₀ = 815,8 mikrometer
- Jari jari pelat, a = 15 mm

- Poisson Rasio, μ = 0,35
- Konstanta material, C = 449 x 10⁸ N/m (SNI 3966:2012)

Menurut Siegfried (2018) dalam jurnal jalan-jembatan halaman 80, nilai poisson rasio diambil sebesar 0,35 mengingat pengujian yang dilakukan berupa lapisan beraspal. Nilai konstanta material (C) didapat dari SNI 3966:2012, nilai tersebut diambil sebab material yang digunakan merupakan bantalan karet. Berikut dibawah ini merupakan salah satu contoh perhitungan analisis E_{LWD} Level 1 pada titik pertama :

- 1) Perhitungan Gaya Terapan, F

$$F = \sqrt{2 x m x g x h x C}$$

$$= \sqrt{2 x 12 x 9,81 x 0,23 x 449 x 10^8}$$

$$= 1586982,561 \text{ N}$$
- 2) Perhitungan Tegangan Kontak, σ_o

$$\sigma_o = \frac{F}{A}$$

$$= \frac{1586982,561}{3,14 x 15^2}$$

$$= 2246,26 \text{ MPa}$$
- 3) Perhitungan E_{LWD}

$$E_{LWD} = \frac{3,14}{2} x \frac{(1-\mu^2) x \sigma_o x a}{d_o}$$

Untuk K = $\frac{3,14}{2}$ dan 2, untuk perkerasan lentur dan perkerasan kaku

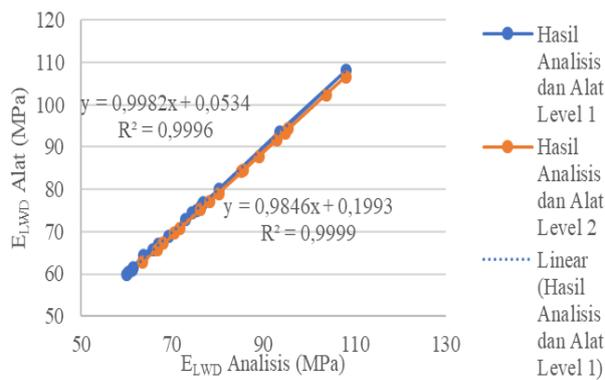
$$= 56,901 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan E_{LWD} dapat dilihat pada Tabel 5, sebagai berikut :

Tabel 5. Hasil Analisis Pengujian LWD Level 1

Titik	d ₀ (mikrometer)	d ₁ (mikrometer)	d ₂ (mikrometer)	E _{LWD} (MPa)
1	815,8	570,1	92,9	56,901
	523,1	13,9	144,1	88,739
	614,7	11,2	142,3	75,516
	568	10,5	148,3	81,725
	571,2	11,5	137,9	81,267

Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat perbandingan nilai modulus elastisitas level 1 dan level 2 dari hasil pengukuran di lapangan dengan hasil perhitungan manual memiliki nilai koefisien determinasi (R²) sebesar 0,9996 dan 0,9999. Hal ini membuktikan bahwa modulus elastisitas menggunakan persamaan *Boussinesq* mempunyai hubungan yang cukup kuat dari hasil analisis dengan hasil alat.



Gambar 2 Hasil E_{LWD} Level 1 dan Level 2

Keseragaman Lapisan yang Diuji

Koefisien variasi merupakan nilai perbandingan antara standar deviasi dengan nilai rata-rata. Menurut AASHTO 1993, dalam jurnal Siegfried mempunyai persyaratan angka koefisien variasi sebesar 30%. Hal tersebut membuktikan semakin kecil angka koefisien variasi dari nilai yang disyaratkan, semakin baik pula keseragamannya.

Uji Validitas Dan Realibilitas

Dari data yang dihasilkan akan dilakukan uji statistik yang menggunakan program SPSS, dengan cara uji validitas dan realibilitas. Hasil yang didapat dalam uji validitas dapat ditunjukkan pada Gambar 3 yang memperlihatkan berbagai informasi. Pada kolom pertama yaitu Pearson Correlation atau R hitung, kemudian kolom kedua yaitu Sig. (2-tailed) atau signifikansi pada dua angka desimal., sedangkan N yaitu jumlah sampel. Hasil yang didapat dari uji validitas dengan melihat nilai Sig. (2-tailed) sebesar 0,000, dari pernyataan ini data tersebut merupakan data yang valid, karena nilai signifikasinya dibawah 0,01.

		Correlations	
		elwd1	elwd2
elwd1	Pearson Correlation	1	1.000**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	160	160
elwd2	Pearson Correlation	1.000**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	160	160

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Gambar 3 Hasil Uji Validasi

Salah satu alat ukur realibilitas adalah *Cronbach's Alpha*. *Cronbach's Alpha* merupakan suatu pengukuran keandalan. Hasil uji realibilitas dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pada Gambar 4 memberikan informasi tentang jumlah sampel (N) sebanyak 160 data, dari data tersebut tidak ada yang kosong maka jumlah valid adalah

100%. Pada Gambar 5 diketahui N of Items (banyaknya item) sebanyak 2 item dengan nilai *Cronbach's Alpha* sebesar 1. Dalam buku (Sujarweni, 2014) halaman 193 menyatakan bahwa nilai *Cronbach's Alpha* > 0,60 maka data tersebut dinyatakan reliabel atau konsisten.

Case Processing Summary

		N	%
Cases	Valid	160	100.0
	Excluded ^a	0	.0
	Total	160	100.0

a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.

Gambar 4 Hasil *Case Processing Summary*

Reliability Statistics

Cronbach's	
Alpha	N of Items
1.000	2

Gambar 5 Hasil Uji Realibilitas

Pengujian DCP

DCP penetrasi jarak pada setiap jatuhan (mm/pukulan) atau biasa dikenal sebagai indeks DCP penetrasi (PI) atau tingkat penetrasi (PR). Penetrasi (PI) digunakan untuk memperkirakan kekuatan geser dan modulus bahan terikat yang menggunakan hubungan empiris. Pengujian DCP pada penelitian ini dilakukan setelah pengujian LWD pada titik yang sama dengan satu kali tumbukan. Dari hasil pengujian DCP yang dilakukan didapat nilai DCP rata-rata (mm/pukulan). Data pengujian dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian DCP

Titik	DCPI (mm/pukulan)
1	3,125
2	2,65
3	2,45
4	2,95
5	3,2
6	3,175
7	3,325
8	3,375
9	3,925
10	3,675
11	3,375
12	3,875
13	3,65
14	3,8
15	3,05
16	3,65

Korelasi Nilai CBR dan DCPI

Pengujian DCP merupakan pengujian untuk menentukan nilai kepadatan tanah, yang hasil akhirnya berupa nilai CBR. Untuk mendapatkan nilai CBR, hasil uji DCP ini dikorelasikan dengan suatu rumusan korelasi nilai CBR-DCP. Dari beberapa penelitian yang dilakukan oleh (1) Kleyn (1975), (2) Smith dan Pratt (1983), (3) Harison

(1987), (4) Ese dkk (1994), (5) NCDOT (1998), (6) Coonse (1999), (7) Nazal dkk (2003), dan (8) Webster dkk (1992), telah dikembangkan sejumlah korelasi antara nilai CBR dan DCPI. Hasil CBR model empirik menurut DCP-PI ditunjukkan pada Tabel 7.

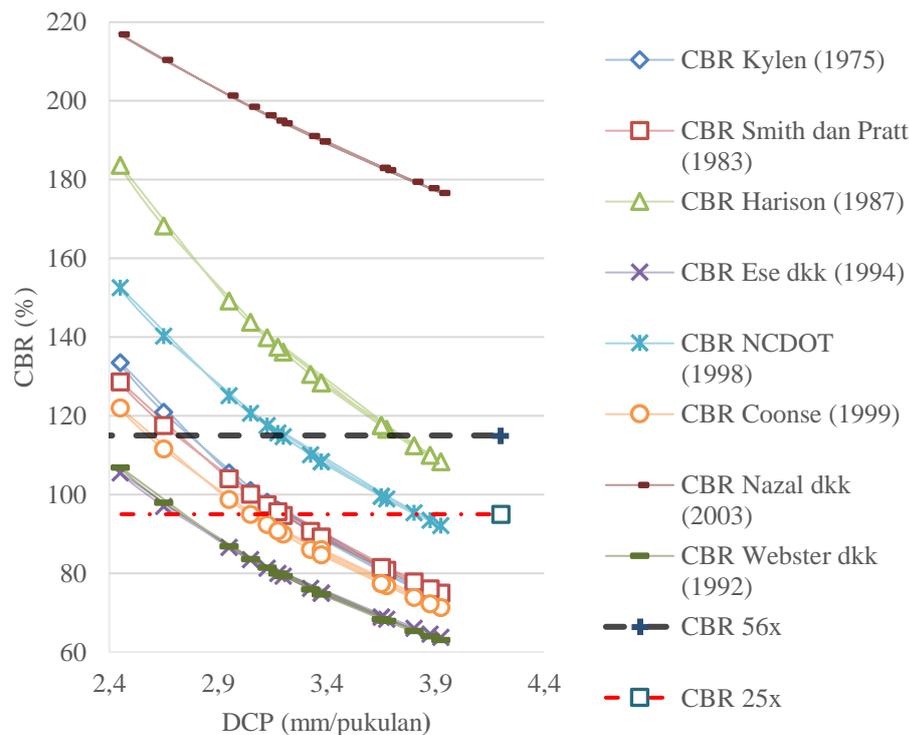
Tabel 7. Hasil CBR-DCPI

Titik	DCPI (mm/pukulan)	CBR 1 (%)	CBR 2 (%)	CBR 3 (%)	CBR 4 (%)
1	3,125	98,071	97,364	139,884	81,379
2	2,65	120,915	117,594	168,254	97,08
3	2,45	133,586	128,649	183,711	105,583
4	2,95	105,518	104,005	149,211	86,555
5	3,2	95,162	94,756	136,218	79,34
6	3,175	96,114	95,611	137,42	80,009
7	3,325	90,641	90,688	130,495	76,153
8	3,375	88,94	89,152	128,332	74,946
9	3,925	73,422	74,999	108,368	63,767
10	3,675	79,823	80,869	116,658	68,419
11	3,375	88,94	89,152	128,332	74,946
12	3,875	74,627	76,108	109,935	64,648
13	3,65	80,518	81,504	117,553	68,921
14	3,8	76,503	77,831	112,368	66,014
15	3,05	101,144	100,11	143,743	83,522
16	3,65	80,518	81,504	117,553	68,921

Tabel 7. Lanjutan

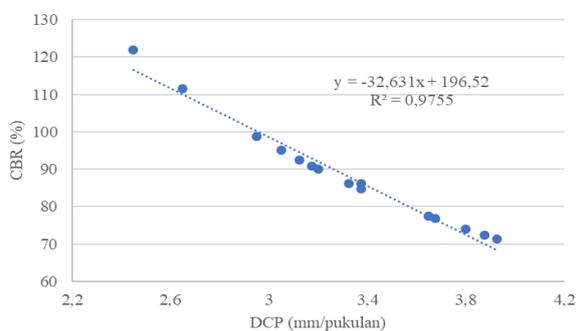
Titik	DCPI (mm/pukulan)	CBR 5 (%)	CBR 6 (%)	CBR 7 (%)	CBR 8 (%)
1	3,125	117,628	92,442	196,418	81,427
2	2,65	140,323	111,557	210,385	97,942
3	2,45	152,614	121,997	216,881	106,939
4	2,95	125,11	98,719	201,341	86,856
5	3,2	114,681	89,976	194,381	79,293
6	3,175	115,647	90,784	195,055	79,993
7	3,325	110,074	86,13	191,079	75,962
8	3,375	108,33	86,13	189,79	74,703
9	3,925	92,171	71,289	176,681	63,082
10	3,675	98,896	76,843	182,407	67,907
11	3,375	108,33	84,677	189,79	74,703
12	3,875	93,444	72,338	177,797	63,994
13	3,65	99,621	77,443	183	68,428
14	3,8	95,419	73,968	179,498	65,41
15	3,05	120,726	95,038	198,498	83,673
16	3,65	99,621	77,443	183	68,428

Hasil perbandingan model empirik CBR-DCP dari penelitian Uz dkk (2015) ditunjukkan pada Gambar 6. Persamaan yang besinggungan dengan garis CBR desain merupakan persamaan dari peneliti (1) Kylen (1975), (2) Smith dan Pratt (1983), (3) Harison (1987), (5) NCDOT (1998), (6) Coonse (1999).



Gambar 6 Perbandingan Model Empirik CBR-DCP

Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian di atas untuk mendapatkan nilai CBR, diperoleh hasil korelasi menurut George dkk (2009) dari penelitian Coonse (1999). Hasil korelasi dari penelitian Coonse (1999) dapat ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Hasil Korelasi Penelitian Coonse (1999)

Korelasi Modulus Elastisitas dan DCPI

Korelasi antara nilai DCPI dan modulus elastisitas dapat digunakan untuk pengukuran kekakuan hasil pengujian *Light Weight Deflectometer* (LWD). Dari beberapa penelitian yang digunakan untuk menghitung nilai modulus elastisitas seperti (1) De Beer (1990), (2) Pandey dkk (2003), (3) Chen dkk (2005), (4) Siekmeier dkk

(2009), dan (5) George dan Uddin (2000) dapat dilihat pada Tabel 8.

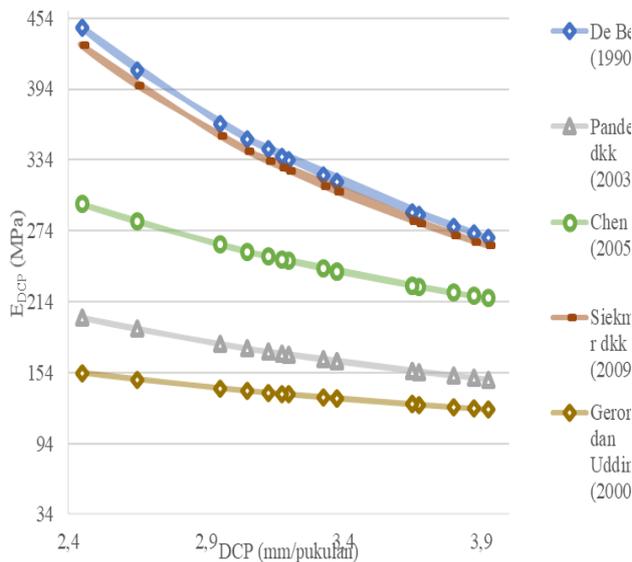
Tabel 8. Hasil Modulus Elastisitas

Titik	DCPI (mm/pukulan)	E _{DCP 1} (MPa)	E _{DCP 2} (MPa)
1	3,125	342,752	171,71
2	2,65	409,69	190,961
3	2,45	445,995	200,867
4	2,95	364,805	178,208
5	3,2	334,069	169,105
6	3,175	336,916	169,962
7	3,325	320,501	164,98
8	3,375	315,367	163,401
9	3,925	267,839	148,251
10	3,675	287,607	154,674
11	3,375	315,367	163,401
12	3,875	271,58	149,481
13	3,65	289,739	155,356
14	3,8	277,385	151,376
15	3,05	351,881	174,42
16	3,65	289,739	155,356

Tabel 8. Lanjutan

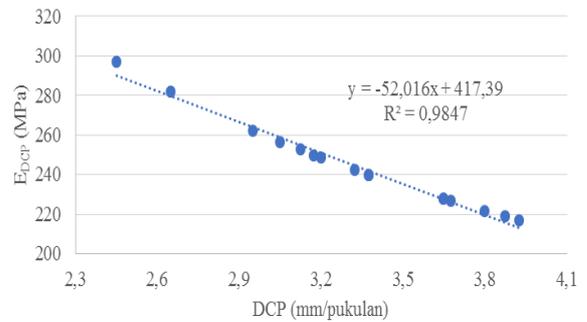
Titik	E _{DCP 3} (MPa)	E _{DCP 4} (MPa)	E _{DCP 5} (MPa)
1	252,372	332,827	136,952
2	281,57	396,495	148,109
3	296,63	430,942	153,734
4	262,216	353,826	140,753
5	248,429	324,551	135,418
6	249,726	327,265	135,924
7	242,188	311,613	132,976
8	239,799	306,714	132,036
9	216,926	261,291	122,899
10	226,616	280,201	126,802
11	239,799	306,714	132,036
12	218,781	264,872	123,65
13	227,646	282,239	127,214
14	221,639	270,426	124,803
15	256,476	341,522	138,542
16	227,646	282,239	127,214

Hasil perbandingan model empirik DCP-E dari penelitian Uz dkk (2015) ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Hasil Perbandingan Model Empirik DCP-E

Menurut penelitian yang dilakukan George dkk (2009), hal ini dapat dibuktikan dengan dilakukannya penelitian Chen dkk (2005) pada jalan di Texas yang memiliki nilai korelasi yang cukup besar. Oleh karena itu, hubungan antara nilai DCPI dan modulus elastisitas dapat diperoleh hasil dari penelitian tersebut. Hasil korelasi dari penelitian Chen dkk (2005) ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Hasil Korelasi Penelitian Chen dkk (2005)

Hasil Pengujian LWD dan DCP

Hasil pengujian DCP dan LWD untuk 16 titik pengujian diberikan pada Tabel 9 sebagai berikut.

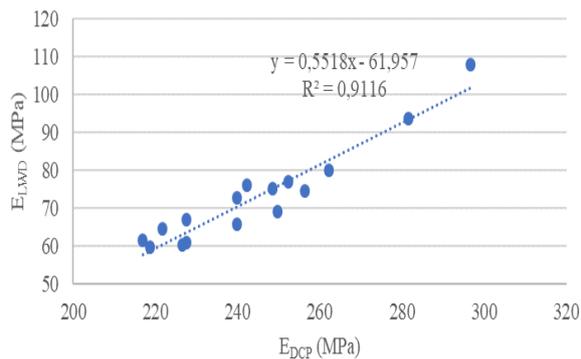
Tabel 9. Hasil Pengujian

Titik	E _{LWD} (MPa)	CBR 6 (%)	E _{DCP 3} (MPa)
1	76,8	92,442	252,372
2	93,6	111,557	281,57
3	108	121,997	296,63
4	80	98,719	262,216
5	75	89,976	248,429
6	69	90,784	249,726
7	76	86,13	242,188
8	65,8	86,13	239,799
9	61,4	71,289	216,926
10	60,4	76,843	226,616
11	72,8	84,677	239,799
12	59,8	72,338	218,781
13	61	77,443	227,646
14	64,4	73,968	221,639
15	74,4	95,038	256,476
16	67	77,443	227,646

Korelasi Nilai E_{DCP} dan E_{LWD}

Korelasi antara pengujian DCP dan LWD dapat dilihat dari hasil kedua pengujian yang diplotkan satu sama lain. Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 9 menunjukkan korelasi antara nilai E_{DCP} dan E_{LWD}. Koefisien determinasi (R²) yang dihasilkan sebesar 0,9116 dalam penelitian Chen

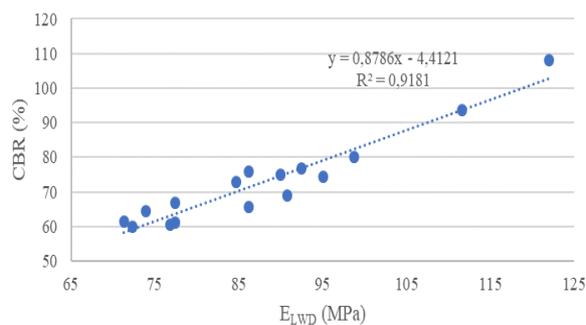
dkk (2005). Dapat disimpulkan pengujian LWD dengan pengujian DCP dalam mengukur kekuatan struktural lapis pondasi atas (*base course*), data yang diambil lebih akurat dan parameter yang didapat sesuai dengan kebutuhan yaitu modulus elastisitas.



Gambar 9 Korelasi Nilai E_{DCP} dan Nilai E_{LWD}

Korelasi Nilai CBR dan E_{LWD}

Korelasi antara nilai CBR yang didapat dari pengujian DCP dan nilai E_{LWD} dapat dilihat dari hasil kedua pengujian yang diplotkan satu sama lain. Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 10 menunjukkan korelasi antara pengujian nilai CBR dan E_{LWD}. Koefisien determinasi (R²) yang dihasilkan sebesar 0,9181 dalam penelitian Coonse (1999).



Gambar 10 Korelasi Nilai CBR dan Nilai E_{LWD}

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan penelitian *Light Weight Deflectometer* (LWD) dan *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) terhadap lapisan pondasi atas (*base course*) tipe kelas B diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- Dari alat LWD dapat disimpulkan semakin tinggi beban yang dijatuhkan, semakin besar pula nilai modulus elastisitas yang didapat.
- Penggunaan rumus *Boussinesq* terbukti dalam perhitungan analisis modulus elastisitas LWD. Dari pembuktian uji validitas dan realibilitas bahwa alat tersebut reliabel dan valid untuk digunakan pada pengukuran di lapangan.

- Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa alat LWD bisa digunakan untuk pengambilan data pada lapis pondasi (*base course*). Hasil korelasi antara DCP dan LWD menunjukkan hubungan yang cukup baik dilihat dari korelasi regresi yang didapat hampir mendekati angka satu. Kelebihan yang didapat dari pengujian LWD dibanding dengan DCP antara lain membutuhkan teknisi yang lebih sedikit, dari segi waktu dan ketepatan data sudah cukup efektif dan efisien.

Daftar Pustaka

- AASHTO, 1993. American Association of State Highway and Transport Officials guide for mechanistic-empirical (M-E) design and analysis. Washington, DC: AASHTO.
- A, S., 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(6), 42-46.
- ASTM, 2015, E2583-07: Standard Test Method for Measuring Deflections with a *Light Weight Deflectometer* (LWD), ASTM International.
- BSN, 2012, SNI 3966-2012: *Cara Uji Kekakuan Tekan dan Kekakuan Geser Bantalan Karet Jembatan*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- 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, 553-558.
- Chen, D.H., et al., (2005). A correlation between dynamic cone penetrometer values and pavement layer oduli. *Geotechnical Testing Journal*, 38 (1).
- Coonse, J., (1999). Estimating California bearing ratio of cohesive piedmont residual soil using the scala dynamic cone penetrometer. *Masters Thesis (MSCE). North Carolina State University, Raleigh, NC* 18.
- De Beer, M., (1990). Use of dynamic cone penetrometer in the design of road structures. *Geo-techniques in African Environment*. Rotterdam: Balkema, 167-176.
- Ese, D., et al., (1994). The use of dynamic cone penetrometer (DCP) for road strengthening design in Norway. *Proceedings of the*

- international conference on bearing capacity of road and airfield*, 3–22.
- George, K.P., Uddin, W., (2000). Subgrade Characterization for Highway Pavement Design. Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-00-131, Mississippi, 261p.
- George, V., Rao, N. C., & Shivashankar, R. (2009). PFDW, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 189-199.
- Ghozali, I. (2018). *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 25*. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Harison, J.R., (1987). Correlation between California bearing ratio and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils. *Proceedings of institution of civil engineers*, London, Part 283, 83–87.
- Jitarekul, P., Sawangsuriya, A., & Singhatiraj, P. (2017). Integration of Pavement Layer Evaluation Using LWD for Road Safety Control. *Procedia Engineering*, 189, 111-117.
- Kleyn, E.G., (1975). The use of the dynamic cone penetrometer (DCP), Report No. 2/74 *Transval Roads Department*, South Africa.
- Lapian, F. E. (2018). Studi Modulus Elastisitas Pada Ruas Jalan Dengan Volume Lalu Lintas Rendah Menggunakan Alat Light Weight Deflectometer. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Informatika*, 3(1), 1-9.
- Lengkong, P. I., Monintja, S., Sompie, O., & Sumampouw, J. (2013). Hubungan Nilai CBR Laboratorium dan DCP Pada Tanah yang Dipadatkan Pada Ruas Jalan Wori-Likupang Kabupaten Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 1(5), 368-376.
- Makwana, P. (2016). Structural evaluation and quality assurance of flexible pavement using Light Weight Deflectometer. *Journal of Civil and Structural Engineering*, 6(3), 160-167.
- Nazzal, M., (2003). Field evaluation of in situ test technology for QC/QA procedures during construction of pavement layers and embankments. Thesis (MS). *Louisiana State University, Baton Rouge*.
- North Carolina Department of Transportation (NCDOT). Pavement condition survey manual. Raleigh, NC: NCDOT: 1998.
- Pandey B.B., Srinivasa K.R., Sudhakar R.K. (2003). Regression Models for Estimation of In Situ Subgrade Moduli from DCP Tests. *Indian Highways*, 5-19.
- Siegfried. (2017). Penggunaan LWD Pujantan Pada Jalan Tanah Untuk Pengecekan Kekuatan Tanah. *Jalan dan Jembatan*, 3, 1-7.
- Siegfried. (2018). LWD Pujantan Sebagai Alat Alternatif Dalam Mengevaluasi Perkerasan Lentur. *Jalan dan Jembatan*, 35(2), 75-83.
- Siegfried. (2019). Penggunaan Light Weight Deflectometer Pujantan Untuk Quality Control Pekerjaan Pematatan Tanah Dasar. *Jurnal Tiarsie*, 15(2), 1-4.
- Siekmeier, J., Pinta, C., Merth, S., Jensen, J., Davich, P., Camargo, F., & Beyer, M. (2009). Using the dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer for construction quality assurance (No. MN/RC 2009-12).
- Smith, R.B. and Pratt, D.N., (1983). A field study of in situ California bearing ratio and dynamic cone penetrometer testing for subgrade investigation. *Australian Road Research*, 13 (4), 285–293
- Stamp, D. H., & Mooney, M. A. (2013). Influence of Lightweight Deflectometer Characteristics on Deflection Measurement. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 216-226.
- Sugiyono. (2014). *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sujarweni, V. W. (2014). *SPSS untuk Penelitian*. Yogyakarta: Pustaka Baru Press.
- Sulewska, M. J., & Bartnik, G. (2017). Application of the Light Falling Weight Deflectometer (LFW) to Test Aggregate Layers on Geosynthetic Base. *Procedia Engineering*, 189(May), 221-226.
- Syahrudin, A. (2010). Pengujian Daya Dukung Perkerasan Jalan Dengan Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Sebagai Standar Untuk Evaluasi Perkerasan Jalan. *Jurnal Aptek*, 2(1), 52-59.
- Uz, V. E., Saltan, M., & Ökalp, İ. G. (2015). Comparison of DCP , CBR , and RLT Test Results for Granular Pavement Materials and Subgrade with Structural Perspective. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*(September).
- Webster, S.L., Grau, R.H., and Williams, T.P., (1992). Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer, Final

Report, Department of Army, *Waterways
Experiment Station, Vicksberg, MS.*