



MENENTUKAN MODULUS ELASTISITAS STABILISASI SUBGRADE BERBASIS DEFLEKSI

SRI ATMAJA P. ROSYIDI^{1*}, NIKEN WUKIRASI¹, SIEGFRIED²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

²Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Ditjen Bina Marga, Kementerian PUPR, Jakarta, Indonesia

*Corresponding author: ✉ atmaja_sri@umy.ac.id

Naskah diterima : 9 Januari 2022. Disetujui: 22 Februari 2022

ABSTRAK

Metode evaluasi perkerasan jalan berbasis teknologi tidak merusak atau non-destructive testing (NDT) merupakan pendekatan pengujian yang diperlukan saat ini dalam menjalankan sistem manajemen perkerasan jalan. Pengujian NDT memiliki keunggulan dari pengujian konvensional berbasis laboratorium maupun pengujian lapangan yaitu lebih cepat, ekonomis dan meminimalisasi gangguan pelaksanaan pengujian di lapangan serta tidak meninggalkan kerusakan pada struktur yang dievaluasi. Makalah ini bertujuan untuk mengukur modulus elastisitas bahan subgrade atau tanah dasar yang distabilisasi dengan menggunakan pengujian NDT Light Weight Deflectometer (LWD) Pusjatan. Penelitian dilaksanakan metode eksperimen dimana pengujian LWD dilaksanakan di model fisik lapisan tanah dasar perkerasan jalan dengan skala 1:1, dengan dimensi 3×1 m dan tebal 1 m. Tanah dasar berasal dari tanah lempung ekspansif yang diberikan bahan tambah untuk stabilisasi. Pengujian dilakukan pada 16 titik pengamatan untuk 0 hari, 3 hari dan 7 hari. Pengujian LWD menganalisis lendutan dengan menilai deformasi vertikal dari beban yang dijatuhkan di atas lapisan perkerasan jalan. Peralatan LWD selain digunakan untuk mengukur kekakuan bahan perkerasan, alat ini mudah dioperasikan dan memiliki dimensi alat yang cukup sederhana sehingga praktis untuk dapat digunakan di lokasi konstruksi dengan berbagai kondisi. Hasil pengujian LWD merupakan nilai modulus elastisitas dinamis tanah dari analisis lendutan dengan pendekatan Boussineq. Dari penelitian ini ditemukan bahwa alat LWD secara efektif dapat mengukur kualitas dalam nilai kekakuan lapisan subgrade selama masa peningkatan daya dukung tanah yang distabilisasi. selama tahap konstruksi. Terdapat peningkatan daya dukung tanah lapisan subgrade yang dapat diukur, yaitu nilai modulus elastisitas pada masing-masing hari pengamatan 0, 3 dan 7 hari. Perbandingan empirik pengujian LWD terhadap nilai modulus elastisitas dari korelasi DCP (dynamic cone penetrometer) menunjukkan nilai korelasi yang baik dengan nilai modulus elastisitas LWD yang lebih besar dibandingkan hasil pengujian DCP.

Kata kunci : *Light Weight Deflectometer (LWD), Dynamic Cone Penetrometer (DCP), metode Boussineq, modulus elastisitas*

1. PENDAHULUAN

Salah satu hal yang penting dalam perencanaan perkerasan jalan raya adalah proses pemadatan pada setiap lapisan, yaitu lapisan tanah dasar (*subgrade*), lapis pondasi bawah (*subbase*), dan

lapis pondasi atas (*base*). Pemadatan dilakukan karena pada proses tersebut sangat berpengaruh dengan nilai lendutan yang dihasilkan pada jalan itu ketika ada beban yang melintas di atas lapisan tersebut. Pada suatu jalan yang sudah lama tidak dilakukan peningkatan infrastrukturnya, dan tidak dilakukan evaluasi secara berkala maka akan sangat memungkinkan terjadinya kerusakan akibat meningkatnya volume lalu lintas pada jalan tersebut. Maka dari itu, setiap jalan perlu adanya peningkatan dan perawatan berkala untuk mengantisipasi kerusakan yang diakibatkan oleh volume lalu lintas yang tinggi. Salah satu upaya peningkatan jalan adalah dengan memeriksa kualitas struktur jalan tersebut dengan menganalisis lendutan pada lapis perkerasan jalan tersebut, dengan menggunakan metode *light weight deflectometer* (LWD). Alat LWD juga dikenal sebagai deflektometer beban jatuh ringan atau uji beban pelat dinamis, yang merupakan perangkat pengujian portabel yang dikembangkan di Jerman untuk mengukur modulus dinamis LWD tanah setempat. Biasanya, modulus ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemadatan dan kekakuan material lapisan tanah. Dengan demikian, alat LWD sesuai digunakan untuk kontrol kualitas pemadatan jalan, tanggul, dan timbunan (Elhakim et al., 2014).

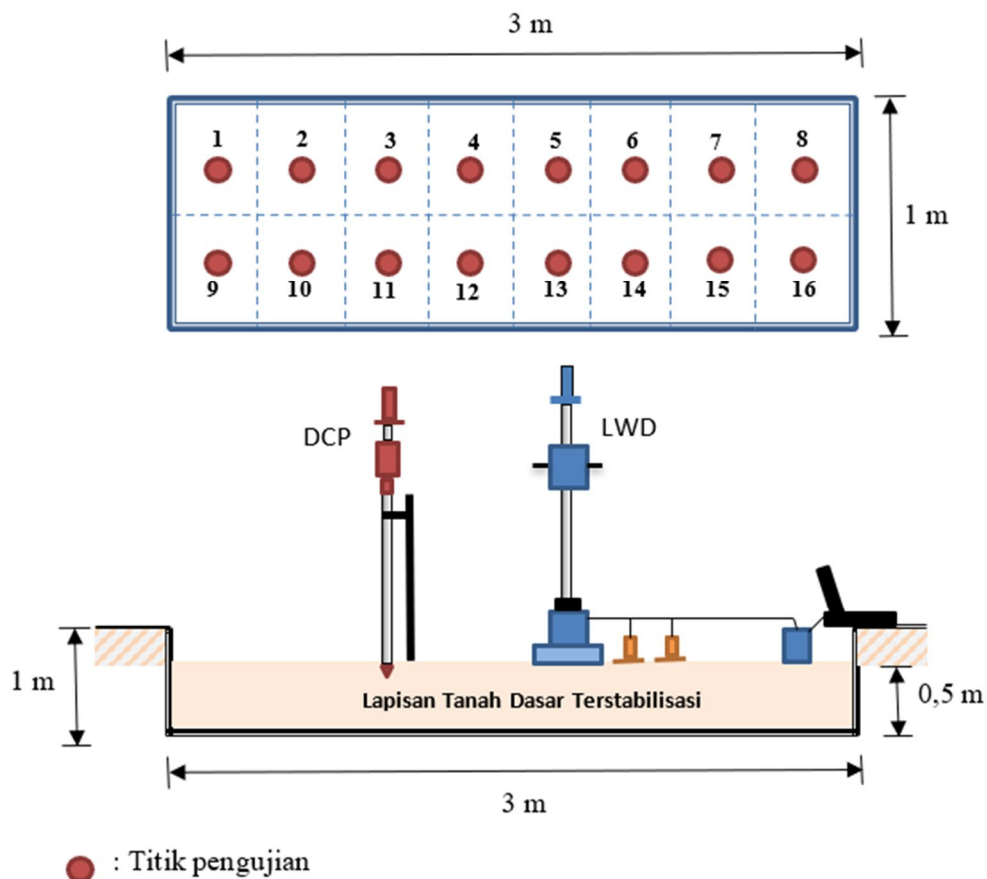
Kajian mengenai penggunaan LWD telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Siegfried (2017) dengan menggunakan *dynamic cone penetrometer* (DCP) sebagai alat pembanding yang digunakan untuk mengukur kekuatan pada jalan dengan alat LWD. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa kedua pengujian ini tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan dimana nilai korelasi antara LWD dan DCP berada dalam interval 85 % tingkat kepercayaan. Siegfried (2017) juga menyimpulkan bahwa alat LWD Pusjatan dapat digunakan untuk menentukan kekuatan struktural pada jalan tanah. Siegfried (2018) melanjutkan kajiannya dengan menggunakan alat LWD Pusjatan untuk mengevaluasi perkerasan lentur. Hasil yang diperolehnya menunjukkan bahwa alat LWD Pusjatan memiliki korelasi yang cukup kuat antar nilai modulus permukaan pada titik pembebanan yang dihitung menggunakan *falling weight deflectometer* (FWD) dengan LWD Pusjatan. Alat LWD juga telah digunakan untuk menilai kekakuan tanah lempung oleh Shivamant dkk (2015). Hasil kajiannya menunjukkan bahwa tanah lempung memiliki nilai modulus antara 400 hingga 700 MPa dan penelitiannya juga menjelaskan bahwa nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari pengujian konvensional laboratorium lainnya. Selain itu, Sulewska & Bartnik (2017) juga telah menggunakan alat LWD untuk menguji tanah buruk dengan perkuatan geosintetik menggunakan alat LWD. Hasil kajiannya menunjukkan efisiensi alat LWD dalam melakukan pengukuran daya dukung tanah. Uji sensitivitas alat LWD dilakukan oleh Lopian (2018) dengan mengkaji modulus elastisitas pada ruas jalan yang volume lalu lintasnya rendah dan Makwana (2016) mengkaji pengaruh kualitas jalan dalam parameter kepadatan dan kadar air. Hasil kajiannya menjadi acuan dalam perencanaan jalan berkaitan dengan daya dukung tanah untuk mendapatkan kualitas jalan yang lebih baik. Teori LWD dan modulus terukur telah dibahas dalam beberapa penelitian terdahulu (Fleming et al., 2002; Kuttah, 2020; Mooney & Miller, 2009; White et al., 2007). Dalam studi ini, data yang dikumpulkan dari uji LWD dianalisis menggunakan program perhitungan balik dengan teori elastis multi-lapisan untuk menemukan kapasitas struktural lapisan dan untuk mengevaluasi perubahan modulus deformasi lapisan yang diuji untuk kadar air yang berbeda dan beban impulsif yang diterapkan.

Dari hasil-hasil penelitian metode LWD di atas, menunjukkan potensi LWD sebagai alat untuk mengevaluasi nilai modulus bahan perkerasan jalan. Metode LWD ini selanjutnya dikembangkan untuk menentukan tingkat keseragaman dan perubahan modulus elastisitas terutama untuk lapisan tanah dasar. Problematik tanah dasar adalah berkaitan dengan nilai daya dukungnya, yang paling banyak ditemui pada tanah lempung yang ekspansif. Jika ditemui kondisi daya dukung tanah dasar rendah maka perlu dilakukan peningkatan kekakuannya yang salah satunya dengan memberikan bahan tambah untuk menstabilisasikannya. Modulus elastisitas merupakan salah satu parameter kontrol penting untuk mengetahui peningkatan

daya dukung tanah yang distabilisasikan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengukur secara empirik dan menganalisis peningkatan modulus elastisitas lapisan tanah dasar yang terstabilisasi dengan kadar kapur 2% menggunakan alat *Light Weight Deflectometer* (LWD), dan membandingkan hasil nilai modulus elastisitas dari alat LWD dengan DCP dengan 3 kali pengujian yaitu pada hari ke-0, ke-3, dan pada hari ke-7.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan berbasis kajian empirik dengan melakukan pengujian atau eksperimen di lapangan dan laboratorium. Data berasal pengujian lapangan LWD, DCP dan sampel tanah yang diambil untuk pengujian laboratorium yang dilakukan di kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Model lapangan lapisan tanah dasar dibangun dengan skala 1:1, dengan dimensi 3×1 m dan tebal 1 m. Lapisan tanah dasar yang distabilisasi dengan campuran kapur dihamparkan pada model lapangan dan dilakukan pengujian pada 16 titik pengamatan untuk 0 hari, 3 hari dan 7 hari. **Gambar 1** menunjukkan model lapangan lapisan tanah dasar yang dipersiapkan untuk penelitian ini dan pengaturan titik pengamatan (uji) dan peralatan uji LWD dan DCP.



Gambar 1. Model uji skala 1:1 lapisan tanah dasar, titik pengamatan dan pengaturan peralatan uji LWD dan DCP

2.1. Bahan Penelitian

Tanah Lempung untuk Lapisan Tanah Dasar

Bahan tanah dalam penelitian yang menjadi pembentuk lapisan subgrade merupakan tanah diambil dari wilayah Kecamatan Kasihan, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. Tanah yang dipilih merupakan tanah dengan karakteristik plastisitas yang tinggi. Dari pengamatan visual terhadap tanah lempung di daerah ini, tanah berwarna cokelat kemerahmerahan. Dalam kondisi yang kering, terdapat rekahan-rekahan dan dalam kondisi basah menjadi lengket (liat). Menurut Peta Geologi (Rosidi et al., 1995), kawasan Kasihan masuk dalam Formasi Sentolo dengan jenis batuan penyusunnya antara lain Batu Gamping, Batu Pasir Napalan dan Formasi Endapan Merapi Muda.

Kapur

Kapur digunakan dalam penelitian ini sebagai bahan stabilisator tanah lempung. Kapur yang dipakai adalah kapur berjenis kapur tohor atau *quick lime* atau kalsium oksida (CaO). Prosentase kapur yang dicampurkan dengan tanah sebesar 2% dari volume tanah yang dibutuhkan untuk membuat lapisan subgrade perkerasan jalan dengan luas lahan 3×1 m, dan kedalaman lapisan 50 cm.

2.2. Alat Penelitian

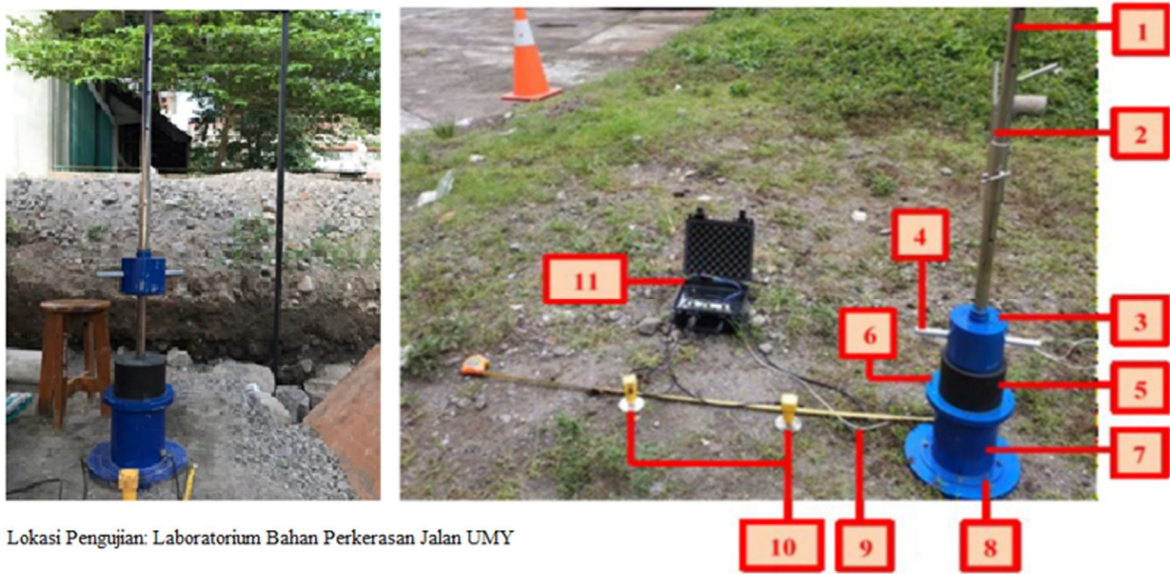
Alat *Light Weight Deflectometer* (LWD) Pusjatan

Penelitian ini menggunakan alat LWD Pusjatan. Alat ini dihasilkan dari penelitian Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan (PUPR) di tahun 2014 (Siegfried, 2017). Perbedaan alat LWD Pusjatan dan alat LWD lainnya adalah tingkat tegangan ukur (stress level) yang digunakan jauh lebih besar dibandingkan alat LWD lainnya. Oleh karena itu, alat LWD Pusjatan dapat digunakan untuk menentukan nilai kekakuan atau modulus elastisitas baik lapisan granular maupun kekuatan struktural jalan. Perbedaan lainnya adalah alat LWD Pusjatan tidak mempergunakan load cell.

Alat LWD Pusjatan terdiri dari batang tegak yang diujungnya dipasang silinder baja yang didalamnya terdapat sensor geofon. Silinder dilengkapi dengan karet untuk menahan beban beban kurang lebih 22 lb atau sekitar 10 hingga 20 kg. Alat LWD yang digunakan agak berbeda dengan alat LWD pada umumnya. Konsep kerja alat LWD Pusjatan adalah dengan menjatuhkan beban dengan ketinggian tertentu pada pelat beban yang kemudian oleh sensor geofon diukur nilai lendutan yang terjadi. Level ketinggian beban jatuh pada alat LWD terbagi menjadi 5 (0 - 4) dengan ketinggian pada masing-masing level diberikan dalam **Tabel 1**. Besaran beban yang dihasilkan dari kelima level tersebut ditentukan melalui kalibrasi dengan load cell standar di laboratorium (Siegfried, 2017). **Gambar 2** berikut ini menunjukkan alat LWD Pusjatan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Ketinggian jatuh beban LWD Pusjatan pada masing-masing level

No.	Level	Ketinggian (cm)
1	0	0,13
2	1	0,23
3	2	0,33
4	3	0,47
5	4	0,60



Keterangan gambar:

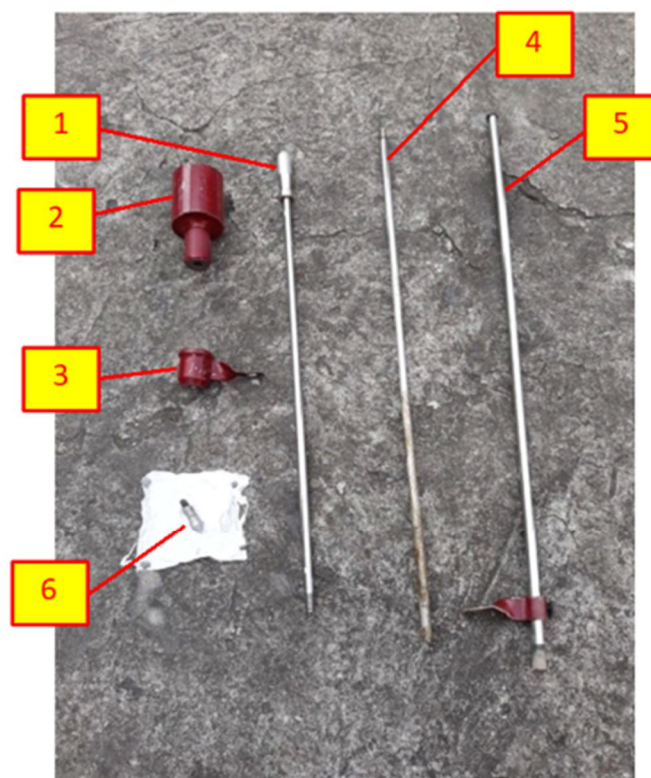
1. *Guide rod*: Berfungsi sebagai pemegang beban pada alat LWD.
2. Pengait beban: Berfungsi sebagai penahan dan pelepas beban yang akan dijatuhkan.
3. Beban jatuh: Beban yang akan diberikan kepada benda uji dengan berat berkisar 10-20 kg, untuk alat LWD pusjatan adalah 12 kg.
4. *Carry grip*: Berfungsi sebagai pegangan beban agar lebih mudah ketika pengoperasian alat.
5. Karet *buffer*: Berfungsi sebagai peredam beban yang jatuh agar pantulan yang terjadi tidak terlalu besar.
6. *Anti-tipping fixture*: Berfungsi untuk menahan pemegang dan beban jatuh agar tetap pada posisi awal.
7. Tabung sensor lendutan: Berfungsi sebagai pengukur defleksi pada titik jatuh beban.
8. Pelat pembebanan: Berfungsi untuk mendistribusikan beban yang seragam ke permukaan.
9. Kabel: Berfungsi sebagai penghubung antar instrumen alat agar dapat saling mengirimkan data hasil pengujian ke prosesor.
10. Geophone/geofon: Berfungsi sebagai pencatat vibrasi/getaran yang dihasilkan oleh beban.
11. Unit Pemrosesan/Akuisisi

Gambar 2. Alat Light Weight Deflectometer (LWD) Pusjatan dan komponen peralatan yang digunakan

Data lendutan yang diperoleh dari unit akuisisi pengukuran LWD Pusjatan dianalisis dengan perangkat lunak komputasi LWD PUSJATAN (Direktorat Bina Teknik). Hasil pengolahan program LWD ditampilkan dalam grafik lendutan di geofon 1 yang terletak tepat pusat beban dan geofon 2 serta 3 yang diletakkan segaris dengan pusat beban dengan jarak 0,50 dan 1 m. Nilai modulus elastisitas langsung ditampilkan dalam layar program yang dianalisis menggunakan teori Boussineq. Konsep analisis modulus elastisitas berbasis data lendutan dijelaskan pada bagian analisis data berikut ini.

Alat Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Pengujian Dynamic Cone Penetrometer (DCP) adalah metode pengujian lapangan untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah yang dinyatakan dalam indeks DCP dan dapat dikonversikan secara empirik dengan nilai *California Bearing Ratio* atau *CBR*. Alat uji DCP dinilai efektif untuk menentukan daya dukung lapisan tanah dasar dan lapisan berbahan granular secara cepat dan akurat. Meskipun alat uji DCP digolongkan sebagai alat uji merusak (*Destructive Testing*, DT), namun penggunaannya cukup luas sebagai alat pengujian jalan jika dibandingkan dengan pengujian konvensional *CBR* laboratorium. Uji *CBR* laboratorium memerlukan waktu pengujian yang lebih lama dan biaya yang lebih mahal serta memerlukan persiapan sampel tanah dengan jumlah tertentu. Dengan demikian, alat DCP dinilai lebih efektif dibandingkan pengujian daya dukung tanah di laboratorium (Burhanuddin & Junaidi, 2018).



Keterangan gambar:

1. Batang baja bagian atas dengan panjang 57,5 cm dan diameter 16 mm
2. Penumbuk berbentuk silinder berlubang dengan berat 8 kg
3. Landasan penahan
4. Batang bagian bawah dengan panjang 90 cm dan berdiameter 16 mm
5. Mistar dengan panjang 1 meter
6. Konus berdiameter 20 mm dengan sudut 30° atau 60°

Gambar 3. Alat Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Pengujian DCP dilakukan dengan menjatuhkan beban seberat 8 kg sehingga menyebabkan batang baja yang dilengkapi dengan konus diujungnya akan terpenetrasi ke lapisan tanah dasar atau lapisan granular lainnya. Penurunan yang terjadi diamati secara manual dan mencatat hasil penurunan konus. Semakin besar penurunan yang terjadi akibat sekali atau beberapa kali tumbukan maka dapat dinilai bahwa lapisan tanah dasar atau granular tersebut semakin lunak.

Alat DCP terdiri dari beberapa komponen alat penyusun sebagaimana diberikan dalam **Gambar 3**, yang terdiri dari batang baja bagian atas dengan diameter 16 mm untuk tinggi jatuh 57,5 cm penumbuk berbentuk silinder berlubang dengan berat 8 kg, landasan penahan yang terbuat dari baja yang berfungsi menerima dampak beban jatuh yang terletak bagian tengah alat, cincin peredam dan pegangan pelindung mistar yang menunjukkan kedalaman pada saat penurunan terjadi, batang bagian bawah dengan panjang 90 cm dan berdiameter 16 mm, batang penyambung dengan panjang 40 – 50 cm berujung ulir dan berdiameter 16 mm, dan mistar dengan panjang 1 meter, serta konus baja keras yang diletakkan diujung batang bawah berdiameter 20 mm dengan sudut konus 30° atau 60° .

Setelah dilakukan pengujian DCP, hasil pengamatan diplot dalam grafik yang menunjukkan hubungan antara indeks DCP dan kedalaman penetrasi. Dari hasil analisis garis miring (*slope*)

sebaran nilai indeks DCP terhadap kedalamannya dapat didekati nilai empirik CBR dan modulus elastisitasnya. Persamaan atau model empirik indeks DCP dan CBR ditunjukkan dalam bagian analisis data di bawah ini.

2.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan model lapisan stabilisasi tanah dasar dari bahan tanah lempung dengan mencampur bahan kapur dan selanjutnya melakukan proses pemadatan.
2. Pengujian LWD Pusjatan dilakukan pada hari ke-0 pada 16 titik setelah selesainya pemadatan akhir dari lapisan tanah dasar.
3. Setiap pengujian LWD dicatat nilai lendutan dan besaran beban yang digunakan pada setiap pengujian, dan diulangi berulang kali untuk mendapatkan konsistensi hasil pengukuran.
4. Menentukan nilai koefisien variasi dari titik uji.
5. Mencatat nilai modulus elastisitas yang dihasilkan dari alat LWD pada setiap titik pengujian.
6. Melakukan pengujian DCP pada titik yang sama dengan alat uji LWD.
7. Mencatat nilai indeks DCP dan kedalaman penetrasi dari pengujian DCP.
8. Menentukan nilai CBR dan modulus elastisitas empirik dari hasil pengujian DCP.
9. Mengulangi pengujian untuk hari pengamatan ke-3 dan ke-7.

2.4. Analisis Data

2.4.1. Analisis Modulus Elastisitas dari Data Lendutan LWD dengan Metode Boussinesq

Pendekatan *Boussinesq* menjadi dasar dalam perhitungan modulus elastisitas menggunakan data lendutan dari pengujian LWD Pusjatan. Prosedur analisis dan perhitungan modulus elastisitas menggunakan persamaan berikut ini:

$$F = \sqrt{2 \times m \times g \times h \times C} \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$ELWD = \frac{3,14}{2} \times \left(\frac{(1-\nu^2) \times \sigma_0 \times a}{d_0} \right) \quad (3)$$

Dengan,

F = gaya terapan

g = Percepatan nilai gravitasi (9,81 m/s²)

h = tinggi drop (level 1= 0,23 m, level 2= 0,33 m, level 3= 0,36 m)

ELWD = modulus elastisitas dari nilai defleksi yang diukur dengan alat LWD

μ = 0,35 (angka Poisson)

σ_0 = tegangan terapan (MPa)

d₀ = lendutan yang diukur dari alat LWD (mikrometer)

a = jari-jari pelat (15 mm)

C = konstanta kekuatan bantalan karet (449 × 10⁸ N/m)

2.4.2. Analisis Daya Dukung Tanah Dasar dengan Alat DCP

Alat DCP digunakan untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah yang dianalisis dengan menggunakan persamaan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Indeks DCP (DCPI)} = \frac{\text{Penetrasi (mm)}}{\text{jumlah pukulan atau tumbukan}} \quad (4)$$

Setelah didapatkan nilai indeks DCP, nilai prediksi CBR berdasarkan (ASTM D 4695-03, 2004) dan modulus elastisitas berdasarkan (Chen et al., 2005) dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\text{CBR} = \frac{292}{\text{DCPI}^{1,12}} \quad (5)$$

$$\text{EDCP} = 537,8 (\text{DCPI})^{-0,664} \quad (6)$$

Dengan,

DCPI atau Indeks DCP = indeks pengukuran DCP dalam satuan mm/jumlah tumbukan/pukulan

CBR = nilai empirik California Bearing Ratio (%)

EDCP = nilai modulus elastisitas dari konversi empirik indeks DCP

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Tanah

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian dasar pada tanah lempung yang digunakan sebagai bahan lapisan subgrade. Hasil pemeriksaan menunjukkan tanah lempung memiliki plastisitas tinggi dan digolongkan dalam kelompok CH sesuai USCS (*United Soil Classification System*). Untuk proses pembuatan lapisan subgrade untuk penelitian ini, digunakan nilai 95% dari kepadatan kering maksimum (MDD) dan kadar air optimum (OMC).

Tabel 2. Hasil pengujian tanah

Pengujian	Hasil
Berat jenis	2,67
Batas cair, LL (<i>liquid limit</i>)	65,6%
Batas plastis, PL (<i>plasticity limit</i>)	33,5%
Indeks plastisitas, PI (<i>plasticity index</i>)	32,1%
Berat volume kering maksimum, MDD	13,05 kN/m ³
Kadar air optimum, OMC	32,5%
Fraksi ukuran partikel tanah:	
Lempung	9%
Lanau	76%
Pasir	15%

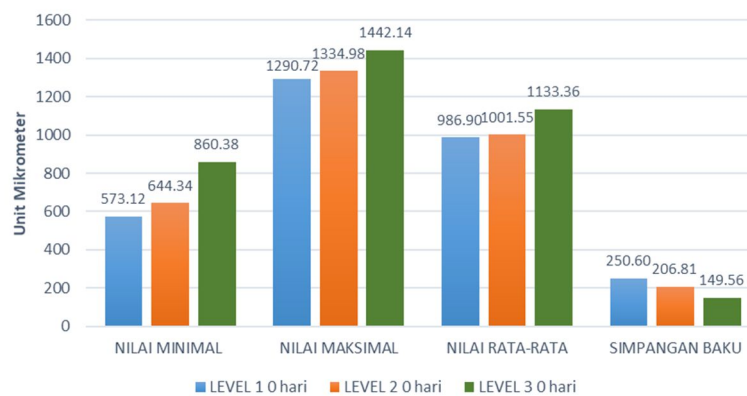
3.2. Lendutan dan Modulus Elastisitas LWD

Alat LWD Pusjatan dalam penelitian ini diatur dengan menggunakan beban 12 kg dengan level tinggi jatuh pada 1,2 dan level 3. Penggunaan level yang lebih tinggi dapat berpengaruh pada besarnya tegangan karena apabila menggunakan level yang tinggi maka nilai tinggi jatuhnya akan semakin besar. Level 1 mempunyai beban sebesar 1234 kg dan tinggi jatuh 0,23 m, level 2 mempunyai beban sebesar 1744 Kg dan tinggi jatuh 0,33 m, dan beban untuk level 3 sebesar 1909 Kg dan tinggi jatuh 0,53 m.

Pelat beban berisi geofon mengukur kecepatan reaksi deformasi yang terjadi akibat beban yang diberikan dan mengirimkan sinyal ke unit akusisi. Penggunaan geofon untuk mengukur lendutan dalam alat LWD dipertimbangkan karena faktor sensitifitasnya. Selain geofon, lendutan juga dapat dideteksi menggunakan akselerometer. Meskipun demikian, studi yang

dilakukan Stamp & Mooney (2013) menunjukkan bahwa pengaruh jenis sensor (akselerometer vs geofon) dalam alat LWD hanya menyebabkan perbedaan yang relatif kecil (<10%). Integrasi pertama dari parameter kecepatan yang diberikan dari hasil pembacaan geofon akan memberikan parameter lendutan. Dalam perhitungan lendutan, data kecepatan sebagai fungsi lendutan ditransformasikan menggunakan algoritma Fourier guna mendapatkan frekuensi domain dan dapat untuk menghitung frekuensi angular. Lendutan diperoleh dari perhitungan *omega arithmetic* berdasarkan kajian dari Siegfried (2017) .

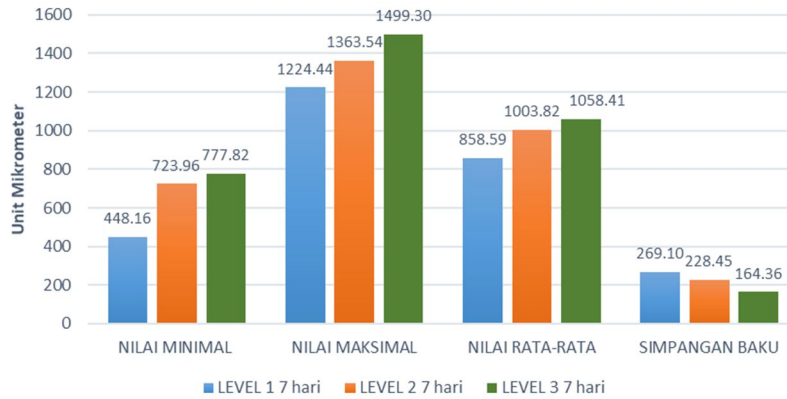
Setelah mendapatkan lendutan kemudian dihitung modulus deformasi dinamis menggunakan rumus Boussinesq dengan menggunakan data beban dan Poisson's ratio dari bahan yang diuji. Nilai modulus deformasi dinamis ditentukan menggunakan Persamaan 1 hingga 3. Hasil pengukuran lendutan yang diamati tepat di bawah pusat beban (d_0) diberikan dalam **Gambar 4** hingga **Gambar 6**. Gambar-gambar tersebut menjelaskan nilai maksimum dan minimum, nilai rata-rata dan simpangan baku pada setiap pengukuran defleksi terhadap level tinggi jatuh bebannya. Dari pengukuran dapat terlihat bahwa semakin tinggi level, menghasilkan nilai defleksi yang lebih besar. Meskipun demikian, terlihat adanya konsistensi pengukuran yang lebih baik untuk level 3 dimana simpangan bakunya lebih rendah dibandingkan dengan level 1 dan 2. Simpangan baku yang lebih rendah ini menunjukkan sebaran statistik untuk nilai-nilai data defleksi di level 3 mendekati nilai rata-rata data tersebut.



Gambar 4. Hasil pengukuran lendutan untuk hari pengamatan ke-0 dengan variasi level beban

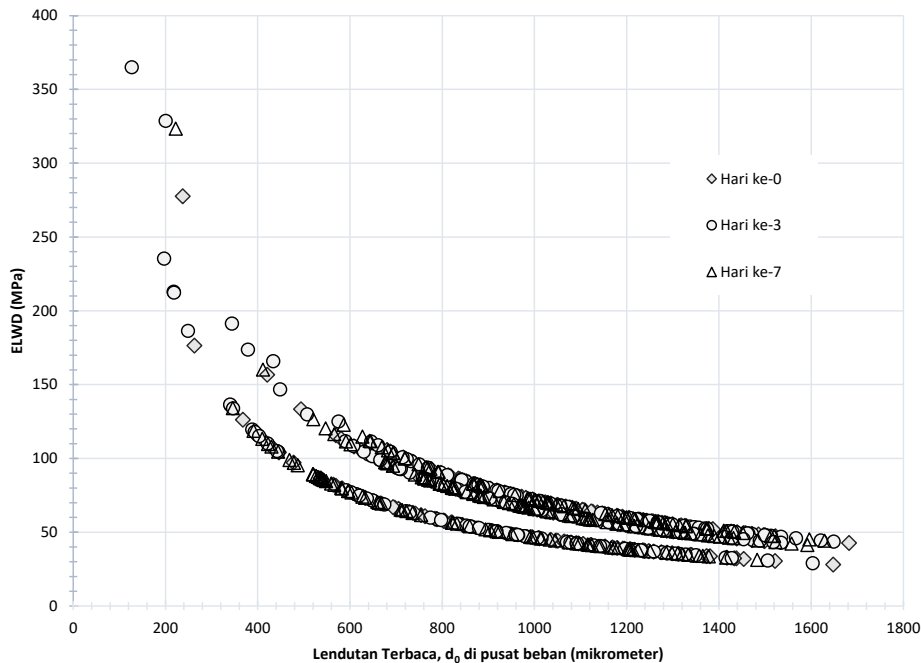


Gambar 5. Hasil pengukuran lendutan untuk hari pengamatan ke-3 dengan variasi level beban



Gambar 6. Hasil pengukuran lendutan untuk hari pengamatan ke-7 dengan variasi level beban

Gambar 7 menunjukkan sebaran lendutan berasal dari seluruh pengukuran LWD dengan level yang berbeda-beda terhadap nilai modulus elastisitasnya selama hari pengamatan pada obyek pengukuran lapisan tanah dasar. Nilai lendutan selanjutnya dibandingkan dengan nilai modulusnya dan hasil rata-rata nilai modulus elastisitas yang diperoleh pada saat pengujian menggunakan alat LWD pada setiap level dapat dilihat pada **Tabel 3**.



Gambar 7. Sebaran lendutan dari seluruh pengukuran LWD pada setiap level dan hari pengamatannya terhadap nilai modulus elastisitas yang diperoleh

Hasil pengukuran LWD menentukan kekakuan material melalui pengukuran defleksi dan memperkirakan nilai modulus elastisitas berdasarkan gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan defleksi yang diberikan untuk lapisan tanah dasar terukur. Modulus elastisitas digunakan sebagai parameter yang paling akurat untuk menilai deformasi (kekakuan). Persamaan ini mengasumsikan media uji menjadi elastis linier, isotropik, kontinum semiinfinite homogen. Dua parameter yang diperlukan untuk menentukan modulus, faktor

bentuk untuk distribusi tegangan kontak antara pelat dan tanah (A) dan rasio Poisson (ν), diasumsikan. Beberapa produsen LWD (yaitu, Dynatest dan Olson) memberi pengguna pilihan untuk memilih nilai untuk A dan sementara yang lain (yaitu, Zorn) mengasumsikan nilai tetap (misalnya, $A = \pi$ dan $A=0,5$). Terzaghi dkk (1996) mendefinisikan distribusi tegangan di bawah pelat sebagai fungsi dari kekakuan pelat dan jenis tanah.

Tabel 3. Nilai rata-rata modulus elastisitas LWD dari setiap level pengukuran

Level	Parameter Tinjauan	Pengujian Hari Ke-		
		0	3	7
1	Modulus Elastisitas (MPa)	47,51	52,58	56,70
	Koefisien Varian (%)	29,90	25,57	29,96
2	Modulus Elastisitas (MPa)	65,59	65,63	68,35
	Koefisien Varian (%)	21,47	22,76	26,15
3	Modulus Elastisitas (MPa)	65,56	66,26	69,35
	Koefisien Varian (%)	22,23	23,23	25,43

LWD mengukur defleksi dan turunan kekakuannya sebagai hubungan antara tegangan dan regangan dalam wilayah bahan elastis. Secara umum, semakin kuat atau kaku lapisan tanah dasar terhadap deformasinya, semakin banyak beban yang dapat didukung sebelum mencapai nilai deformasi kritis. Dari **Gambar 7**, dapat diamati bahwa trend menunjukkan peningkatan nilai lendutan diikuti dengan menurunnya nilai modulus elastisitas. Atau dengan istilah lainnya, bahwa modulus deformasi dinamik yang tinggi pada suatu bahan akan menghasilkan nilai lendutan yang kecil terhadap beban yang diberikan.

Koefisien variasi adalah perbandingan antara nilai standar deviasi dengan nilai rata-rata dalam suatu data. Menurut AASHTO (1993) dan Siegfried (2017) , jika angka koefisien variasi yang diperoleh kurang dari 30%, maka nilai sebaran data pengukuran jalan yang ditunjukkan dalam nilai koefisien varian dapat diterima. Koefisien varian yang menunjukkan yang nilainya semakin kecil maka semakin baik pula keseragamannya, hasil dari penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Pengujian validitas adalah pengujian untuk mengukur ketepatan/valid tidaknya suatu data yang akan digunakan dalam suatu penelitian. Dalam melakukan uji validitas menggunakan program SPSS yang mana teknik pengujiannya menggunakan korelasi Bivariate Pearson atau dengan cara mengkorelasikan masing-masing data dengan total data. Pengujian realibilitas adalah pengujian untuk menunjukkan sejauh mana tingkat kepercayaan atau konsistensi suatu data yang dihasilkan dalam suatu penelitian. Tinggi rendahnya realibilitas ditunjukkan dengan suatu angka yang disebut koefisien realibilitas. Pengujian realibilitas menggunakan rumus Alpha Cronbach, jika nilai alpha > 0,7 realibilitasnya mencukupi, apabila nilai alpha > 0,8 berarti seluruh data pengujian konsisten, dan jika nilai alpha > 0,9 realibilitasnya sempurna. Namun jika nilai alpha < 0,50 maka realibilitas rendah, dan kemungkinan ada beberapa nilai yang tidak reliabel. Hasil dari nilai pengujian tersebut valid karena pada Sig (2-tailed) hasilnya 0,00, dan dari uji realibilitas menunjukkan nilai hasil > 0,9 yang artinya tingkat validitas hampir 100%, hal itu dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5** di bawah ini.

Tabel 4. Hasil Pengujian Validitas

Correlations			
		ELWD1	ELWD2
ELWD1	Pearson	1	,999**
	Correlation		
	Sig. (2-tailed)		,000
	N	240	240
ELWD2	Pearson	,999**	1
	Correlation		
	Sig. (2-tailed)	,000	
	N	240	240

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

Tabel 5. Hasil Pengujian Realibilitas

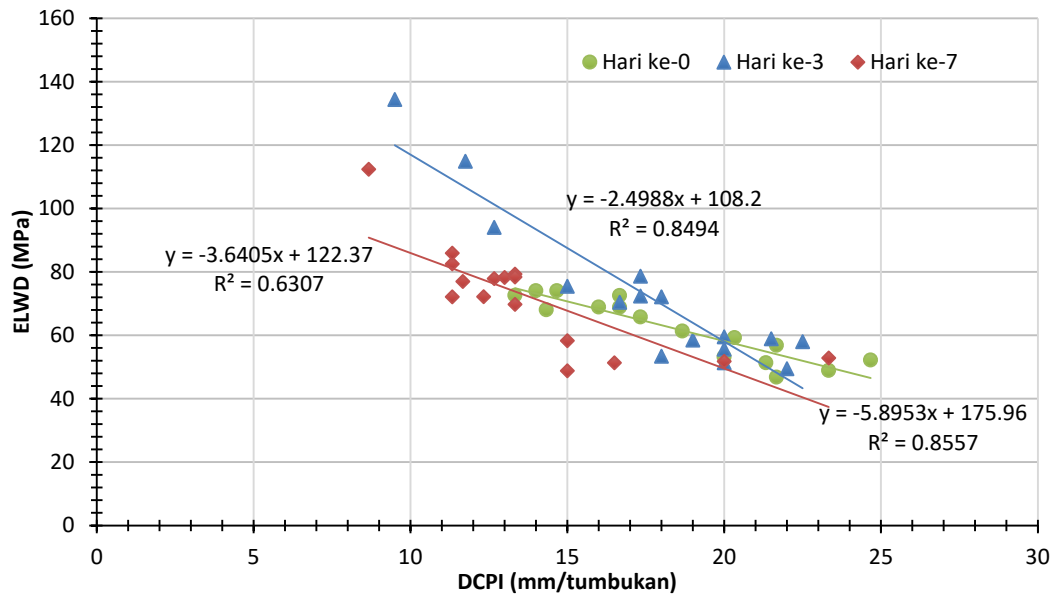
Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
1,000	2

3.3. Perbandingan Nilai Indeks DCP dan CBR (%)

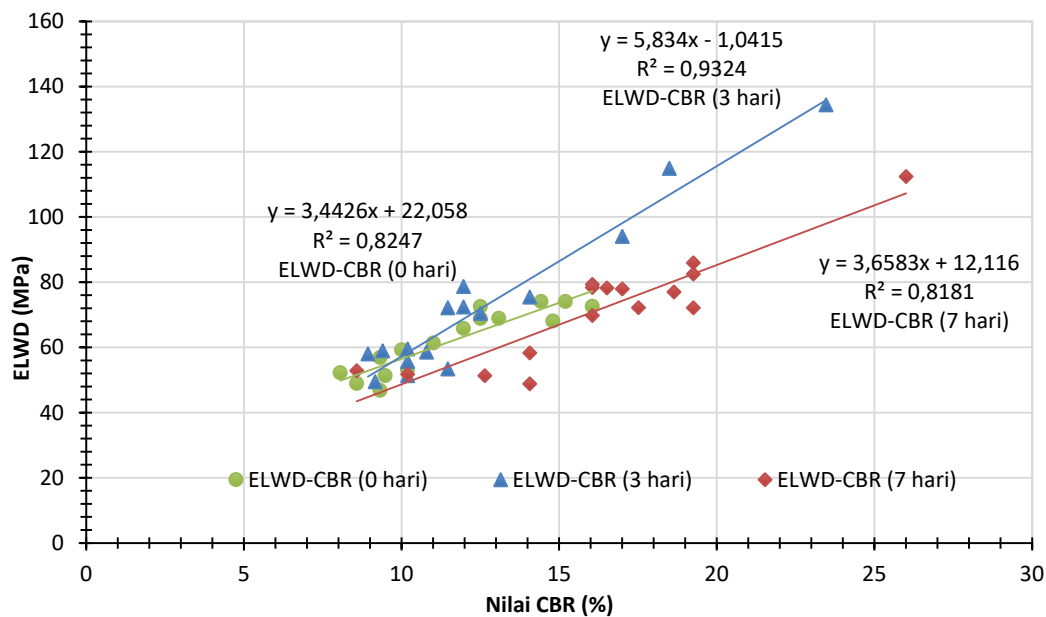
Pengujian DCP dilakukan pada titik yang sama setelah pengujian Light Weight Deflectometer (LWD) dilaksanakan. Secara reratanya, nilai indeks DCP (DCPI) semakin meningkat dari pengujian di hari ke-0, ke-3, sampai dengan hari ke-7. **Gambar 8** menunjukkan trend data, hasil pengukuran DCP dalam nilai DCPI terhadap hasil pengukuran LWD dalam modulus elastisitas. Hubungan linier antara kedua parameter tersebut menunjukkan semakin tinggi nilai DCPI, maka semakin rendah nilai modulus elastisitas LWDnya. Hasil eksperimen ini secara umum sesuai dengan dengan hubungan modulus elastisitas dan DCP yang dilakukan oleh Rosyidi dkk (2010) bahwa semakin tinggi nilai indeks DCP, nilai modulus elastitasnya dari hasil pengukuran seismik juga menurun. Dalam Nilai DCPI, selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung nilai korelasi CBR menggunakan persamaan (5). Hasil dari korelasi CBR dan perbandingannya dengan nilai modulus elastisitas LWD pada masing-masing pengamatan pengukuran 0, 3 dan 7 hari, diberikan dalam **Gambar 9**. Nilai koefisien determinasi (R^2 dalam **Gambar 9**) yang dihasilkan dari hubungan antara modulus elastisitas LWD dan nilai korelasi CBR dari DCP verada di atas 0,8. Hal ini menunjukkan hubungan empirik yang kuat dan pengaruh variabel CBR terhadap nilai modulus elastisitas LWD di atas 80%.

3.4. Perbandingan Nilai E_{LWD} dan E_{DCP} Dilihat dari Hari Pengujian

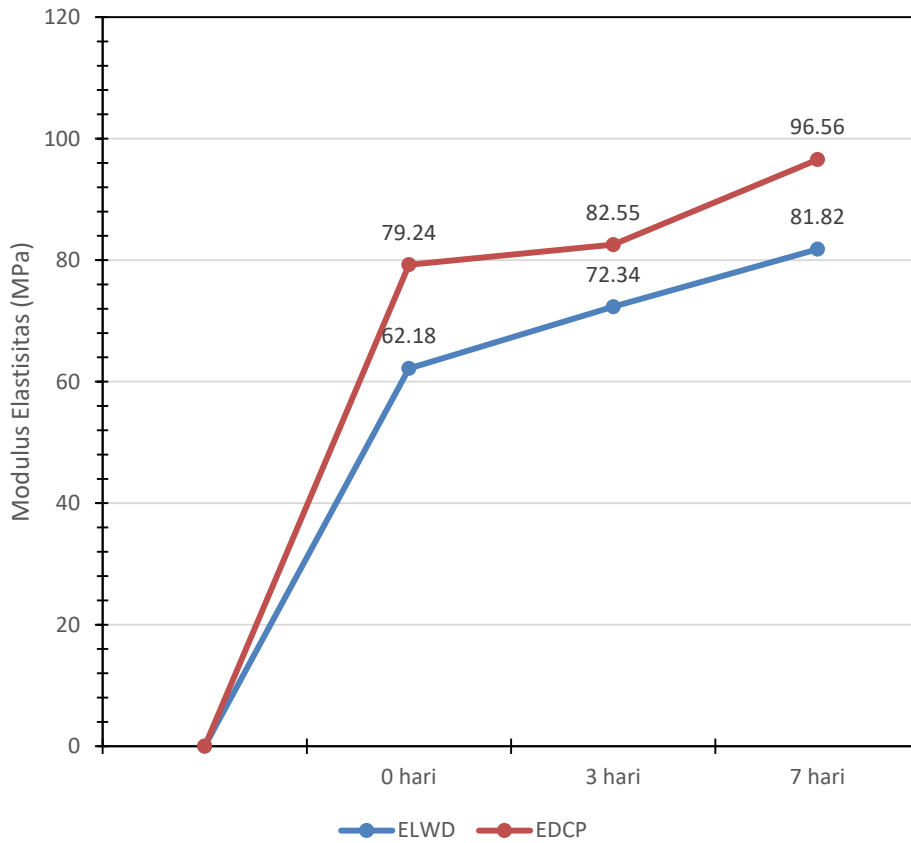
Pengamatan perubahan nilai modulus pada tanah terstabilisasi menggunakan pengukuran LWD dan DCP dilakukan hingga 7 hari. Nilai modulus elastisitas dari hasil pengukuran DCP dihasilkan dari persamaan (6). Pengamatan ini dilakukan untuk melihat kemampuan metode ini dalam mendeteksi perubahan modulus elastisitas yang terjadi dari proses kimia pada tanah terstabilisasi. Hasil pengamatan perubahan modulus elastisitas dari hari ke-0 sampai hari ke-7 ditunjukkan dalam **Gambar 10**. Trend kenaikan dari kedua metode pengukuran baik LWD maupun DCP menunjukkan pola yang sama, dimana semakin lama, modulus elastisitas semakin tinggi. Hal ini menunjukkan sensitivitas metode LWD dalam mendeteksi perubahan nilai kekakuan material setempat. Kemampuan ini menjadikan metode LWD mampu digunakan sebagai alat untuk memonitor perubahan kekakuan bahan atau modulus elastisitas dalam proses stabilisasi tanah dasar untuk perkerasan jalan.



Gambar 8. Hubungan dan persamaan regresi antara parameter indeks DCP dan modulus elastisitas dari pengukuran LWD untuk pengukuran pada hari ke-0, ke-3 dan ke-7



Gambar 9. Hubungan dan persamaan regresi antara CBR dari korelasi indeks DCP dan modulus elastisitas dari pengukuran LWD untuk pengukuran pada hari ke-0, ke-3 dan ke-7

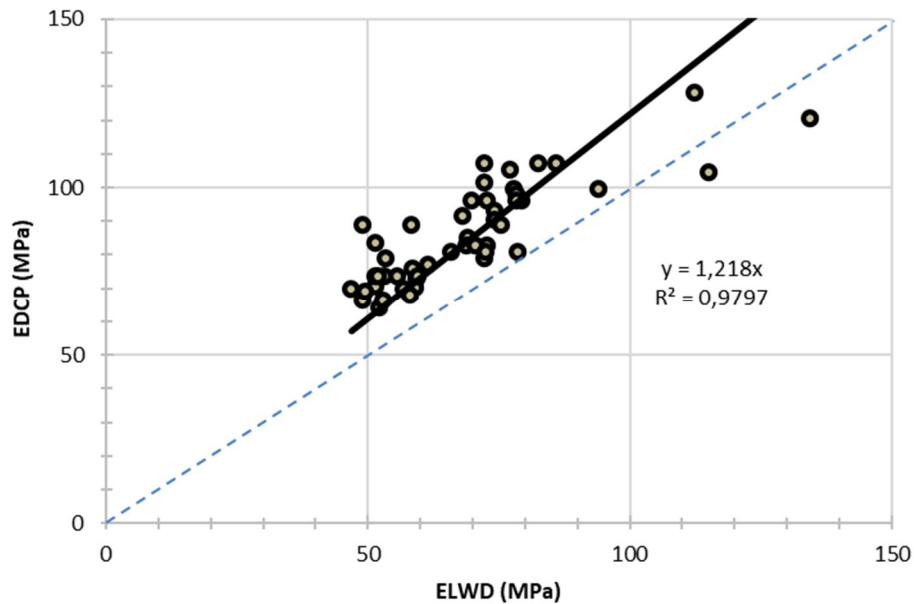


Gambar 10. Trend kenaikan modulus elastisitas LWD dan DCP pada hari pengamatan tanah dasar terstabilisasi

3.5. Perbandingan Modulus Elastisitas LWD dan DCP

Nilai modulus elastisitas korelasi yang dihasilkan pada alat DCP lebih besar daripada nilai modulus elastisitas hasil pengukuran langsung di lapangan menggunakan alat LWD. Perbedaan ini disebabkan karena pendekatan penilaian yang berbeda. Korelasi empirik modulus elastisitas memiliki batasan penggunaan antara lain nilainya merupakan korelasi atau pendekatan empirik dari data yang berbeda sehingga perbedaan sifat benda uji atau obyek uji terhadap benda uji dimana persamaan tersebut diturunkan dapat menjadi nilai pembeda yang berpengaruh signifikan. Suits dkk (2005) menghasilkan nilai korelasi empirik modulus elastisitas (Persamaan 6) dari perbandingan pengujian sebanyak 192 titik antara DCP dan *falling weight deflectometer* (FWD) dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,855 (A. P. Makwana & Kumar, 2019).

Meskipun demikian, hasil korelasi yang ditunjukkan dari kedua perbandingan nilai modulus elastisitas dari pengukuran LWD dan DCP menunjukkan nilai yang kuat. **Gambar 11** menunjukkan trend korelasi dari kedua pengujian tersebut terhadap nilai modulus elastisitas yang dihasilkan dengan koefisien determinasi sebesar 0,979.



Gambar 11. Korelasi modulus elastisitas dari LWD, ELWD dan DCP, EDCP untuk seluruh waktu pengamatan

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Pengukuran LWD Pusjatan menentukan kekakuan material melalui pengukuran defleksi dan nilai modulus elastisitas berdasarkan gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan defleksi yang diberikan untuk lapisan tanah dasar. Dari hasil analisis ditunjukkan bahwa LWD Pusjatan mampu mengukur peningkatan nilai modulus elastisitas tanah dasar yang distabilisasi dengan kapur dengan pengamatan 0, 3 dan 7 hari.
2. Nilai rata-rata modulus elastisitas yang diperoleh dari alat LWD menunjukkan peningkatan kekakuan dari 62,18 MPa untuk hari ke-0, 72,34 MPa untuk hari ke-3 dan 81,82 MPa untuk hari ke-7. Hal ini membuktikan kemampuan LWD dalam mengukur perubahan dan variabilitas daya dukung tanah dasar.
3. Perbandingan nilai modulus elastisitas dari alat LWD dan korelasi pengukuran DCP menunjukkan bahwa nilai modulus empirik hasil korelasi pengujian DCP lebih besar dari nilai modulus hasil pengukuran LWD. Hasil korelasi antara modulus elastisitas dari kedua pengujian tersebut, LWD dan korelasi DCP, menunjukkan trend korelasi yang kuat yang dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,979.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Riset dan Inovasi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta untuk pendanaan internal melalui hibah internal penelitian dan kerjasama internasional tahun 2020.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Burhanuddin, B., & Junaidi, J. (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*, 1(3), 553–558.
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., & Amer, M. I. (2014). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, 10(3), 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.hbrej.2013.12.003>
- Fleming, P. R., Lambert, J. P., Frost, M. W., & Rogers, C. D. F. (2002). Insitu assessment of stiffness modulus for highway foundations during construction. *Ninth International Conference on Asphalt Pavement*. <https://hdl.handle.net/2134/3553>
- Kuttah, D. (2020, October). Layer Stiffness Moduli Measured by Light Weight Deflectometer Tests and Predicted by Backcalculation Process for Sandy Soil. *5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'20)*. <https://doi.org/10.11159/icgre20.195>
- Lapian, F. E. P. (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.
- Makwana, A. P., & Kumar, R. (2019). Correlative Study of LWD, DCP and CBR for sub-grade. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 67(9), 89–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V67I9P215>
- Makwana, P. (2016). Structural evaluation and quality assurance of flexible pavement using Light Weight Deflectometer. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 6(3), 160–167.
- Mooney, M. A., & Miller, P. K. (2009). Analysis of lightweight deflectometer test based on in situ stress and strain response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 199–208.
- Rosidi, H. M. D., Sukandarrumidi, & Rahardjo, W. (1995). *Peta geologi lembar Yogyakarta, Jawa*.
- Rosyidi, S. A., Taha, M. R., & Mohd Nayan, K. A. (2010). Empirical Model Evaluation of Sedimentary Residual Soil Bearing Capacity from Surface Wave Method. *Jurnal Kejuruteraan*, 22(1), 75–88. <https://doi.org/10.17576/jkukm-2010-22-08>
- Shivamant, A., Kolase, P. K., Shama, P. S., 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. (2017). Penggunaan LWD Pusjatan Pada Jalan Tanah Untuk Pengecekan Kekuatan Tanah. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 34(1), 1–8.
- Siegfried. (2018). LWD Pusjatan Sebagai Alat Alternatif Dalam Mengevaluasi Perkerasan Lentur. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 35(2), 75–83.
- Stamp, D. H., & Mooney, M. A. (2013). Influence of Lightweight Deflectometer Characteristics on Deflection Measurement. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 20120034. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120034>
- Suits, L. D., Sheahan, T., Chen, D.-H., Lin, D.-F., Liau, P.-H., & Bilyeu, J. (2005). A Correlation Between Dynamic Cone Penetrometer Values and Pavement Layer Moduli. *Geotechnical Testing Journal*, 28(1), 12312. <https://doi.org/10.1520/GTJ12312>
- Sulewska, M. J., & Bartnik, G. (2017). Application of the Light Falling Weight Deflectometer (LFW) to Test Aggregate Layers on Geosynthetic Base. *Procedia Engineering*, 189, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.035>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- White, D. J., Vennapusa, P., & Thompson, M. J. (2007). Field validation of intelligent compaction monitoring technology for unbound materials. *Partnership*, 515, 294–8103.