

EVALUASI PARAMETER KEPADATAN PERKERASAN ASPAL MENGGUNAKAN ALAT *LIGHT WEIGHT DEFLECTOMETER (LWD)*

M. Tumpu

Prodi S2-Manajemen Bencana
Sekolah Pascasarjana
Universitas Hasanuddin
tumpumiswar@gmail.com

Franky E. P. Lapian

Prodi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Yapis Papua
edwinlapian31031975@gmail.com

M. Akbar Walenna¹

Prodi S2-Teknik Perancangan
Prasarana
Sekolah Pascasarjana
Universitas Hasanuddin
mawalenna@unhas.ac.id

Abstract

The modulus of elasticity, deflection and field CBR are important parameters used in designing road construction. These parameters are density parameters in road pavement construction. This study aims to evaluate the density parameters of asphalt pavement using a Light Weight Deflectometer (LWD). This research was carried out in Merauke Regency, namely on the road that connects Merauke and Tanah Merah. This research begins with the collection of secondary data, namely traffic data in the form of LHR values, pavement planning data taken from consultant data and road condition data. Then, primary data was taken in the form of density parameters (deflection, deflection, field CBR and modulus of elasticity). The results showed that the types of road damage that occurred using the LWD (Light Weight Deflectometer) measurement method were the asphalt pavement and soil pavement sections in several STAs in good condition ($EVD0 \leq 250$ MPa) and also in several other STAs in poor condition. good ($EVD0 \geq 250$ MPa).

Keywords: density, asphalt pavement, LWD

Abstrak

Modulus elastisitas, lendutan, defleksi dan CBR lapangan merupakan parameter penting yang digunakan dalam mendesain konstruksi jalan. Parameter tersebut merupakan parameter kepadatan pada konstruksi perkerasan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi parameter kepadatan perkerasan aspal yang menggunakan alat Light Weight Deflectometer (LWD). Penelitian ini di laksanakan di Kabupaten Merauke yaitu di ruas jalan yang menghubungkan Merauke dan Tanah Merah. Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data-data sekunder yaitu data lalu lintas berupa nilai LHR, data perencanaan perkerasan yang diambil dari data konsultan dan data kondisi jalan. Selanjutnya dilakukan pengambilan data primer berupa parameter kepadatan (defleksi, lendutan, CBR lapangan dan modulus elastisitas). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis kerusakan jalan yang terjadi dengan metode pengukuran menggunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*) adalah pada ruas perkerasan aspal dan perkerasan tanah di beberapa STA dalam kondisi baik ($EVD0 \leq 250$ MPa) dan juga di beberapa STA lainnya dalam kondisi yang kurang baik ($EVD0 \geq 250$ MPa).

Kata Kunci: kepadatan, perkerasan aspal, LWD

PENDAHULUAN

Ketersediaan infrastruktur jalan yang baik dan berkualitas merupakan hal utama dalam pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Provinsi Papua yang belum memiliki jaringan jalan yang menghubungkan antar kota dan distrik membutuhkan jaringan jalan yang

¹ Corresponding author : mawalenna@unhas.ac.id

menghubungkan antar kota dan distrik. Jaringan jalan yang terhubung secara luas, akan meningkatkan pertumbuhan ekonomi, sehingga volume lalu lintas dan beban lalu lintas juga akan meningkat. Oleh sebab itu kualitas jalan yang dibangun harus mampu melayani peningkatan lalu lintas dan struktur lapis keras jalan harus didesain dengan baik dengan metode konstruksi yang benar secara teknis dan ekonomi. Lapis keras jalan membutuhkan pondasi dengan kinerja yang baik dan mampu mendukung lapis aus yang berada di atasnya. Lapis pondasi jalan, baik lapis pondasi atas (*base*) dan lapis pondasi bawah (*sub-bases*) dapat mempergunakan tanah dan material granular sehingga dapat menghubungkan jaringan jalan yang ada khususnya di Papua.

Jaringan jalan merupakan prasarana transportasi darat yang sangat berperan penting dalam sektor perhubungan untuk kesinambungan distribusi barang dan jasa. Bahkan setiap pergerakan, baik pergerakan manusia maupun pergerakan barang di darat, selalu menggunakan jaringan jalan yang ada, sehingga peranan jalan menjadi sangat penting dalam memfasilitasi besar kebutuhan pergerakan yang terjadi.

Ada beberapa sistem jaringan jalan, salah satunya yang sangat berperan penting adalah sistem jaringan jalan arteri primer yang merupakan jalan penghubung antar pusat kegiatan nasional atau antara pusat kegiatan nasional dengan pusat kegiatan wilayah. Jaringan jalan ini juga menjadi jalan yang melayani tulang punggung transportasi nasional, sehingga sangat perlu diperhatikan pemeliharaannya agar menjaga kualitas layanan jalan serta tidak menjadi penghambat dalam kelancaran lalu lintas.

Kondisi jalan yang baik akan memudahkan mobilitas penduduk dalam melakukan aktivitas setiap hari. Jalan raya dengan perkerasan lentur maupun perkerasan kaku yang baik, harus mempunyai kualitas demi kenyamanan dan keamanan pengguna jalan. Disamping itu perkerasan jalan raya harus mempunyai ketahanan terhadap pengikisan akibat beban lalu lintas, perubahan cuaca dan pengaruh buruk lainnya serta memiliki umur layanan jalan yang ideal. Sesuai Manual Pemeliharaan Jalan No : 03/MN/B/1983 kerusakan jalan dikelompokkan menjadi; (1) Retak (*cracking*), (2) Distorsi, (3) Cacat Permukaan, (4) Pengausan, (5) Kegemukan (*bleeding*), (6) Penurunan pada bekas penanaman utilitas. Pada umumnya kerusakan yang terjadi merupakan gabungan dari berbagai jenis kerusakan sebagai akibat dari berbagai faktor yang saling terkait.

Saat ini kita tahu bahwa sistem Pemerintahan sekarang menjadikan salah satu pusat pembangunan jalan itu berada di Papua. Pada kesempatan ini penulis melakukan penelitian yang terletak terletak pada jaringan jalan Trans Papua dengan detail jalan yaitu yang menghubungkan Kabupaten Marauke, Tanah Merah dan Oksibil.

Kepadatan, lendutan dan elastistas dari setiap lapisan tanah dasar, lapis pondasi (*base layer*) hingga lapisan campuran aspal merupakan parameter yang penting untuk mendisain suatu konstruksi jalan. Pengujian-pengujian konvensional yang biasanya dilakukan untuk evaluasi dan monitoring jalan tanpa penutup adalah antara lain *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), CBR langsung, *Plate Bearing Test*, dll. Salah satu alat untuk menguji dan menganalisis lendutan dan elastistas pada tanah, lapisan pondasi dan lapisan campuran aspal adalah LWD (*Light-Weight Deflectometer*) (Ebrahimi dan Tuncer, 2011). menggunakan alat LWD (*Light-Weight Deflectometer*) untuk menganalisis lendutan dan

resilient modulus dari tanah dasar yang dilapisi berbagai macam material permukaan yaitu material daur ulang dari aspal dan yang distabilisasi dengan agregat alam konvensional. Rao et al. (2008) menggunakan LWD untuk menguji elastisitas tanah laterit yang telah dikupas permukaannya sedalam 30 cm. Elastisitas tanah laterit berdasarkan alat LWD adalah antara 25 MPa hingga 200 MPa.

Dalam penelitian ini untuk mengetahui bagaimana tingkat kepadatan perkerasan aspal yang terdiri dari modulus elastisitas, defleksi, lendutan dan CBR lapangan, maka perlu dilakukan pengamatan secara visual kemudian dilakukan analisis indeks kondisi perkerasan yaitu tingkatan dari kondisi permukaan perkerasan yang terjadi. Analisis indeks kondisi perkerasan dilakukan dengan menggunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*) untuk mengetahui lendutan yang terjadi pada ruas tersebut.

MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini di laksanakan di Kabupaten Merauke yaitu di ruas jalan yang menghubungkan Merauke dan Tanah Merah. Waktu penelitian di rencanakan 4 bulan yaitu dari bulan Februari 2019 sampai dengan bulan Juni 2019. Secara astronomi, Kabupaten Boven Digoel terletak diantara $4^{\circ}98' - 7^{\circ} 10'$ Lintang Selatan dan $139^{\circ}90' - 141^{\circ}$ Bujur Timur. Gambar 1 memperlihatkan lokasi penelitian ini.



Gambar 1. Lokasi penelitian

Karakteristik Marshall Campuran AC-WC Pada Kadar Aspal Optimum

Setelah didapatkan kadar aspal optimum (KAO) menggunakan Asbuton modifikasi sebagai bahan pengikat yaitu sebesar 6,10% maka selanjutnya dilakukan pengujian karakteristik Marshall pada kadar aspal optimum yang diperlihatkan pada Tabel 1 dimana dilakukan dengan jumlah tumbukan 75 kali untuk setiap bidang. Oleh karena itu, pada kadar aspal optimum 6,10% yang diaplikasikan di lapangan pada ruas Merauke - Tanah Merah dilakukan pengambilan benda uji inti atau benda uji *core drill* tahun 2017.

Tabel 1. Parameter Marshall pada kadar aspal optimum 6,10%

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Satuan	
1	Jumlah tumbukan perbidang	75	Tumbukan	
2	Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	1,03		
3	Air void Marshall (VIM) (rongga dalam campuran)	3,76	%	
4	Void mineral aggregate (VMA) (rongga dalam agregat)	15,35	%	
5	Void filled aspal (VFA)	76,75	%	
6	Stabilitas	1251,37	kg	
7	Pelelehan	3,47	mm	
8	Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	91,94	%	
9	Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal (refusal)	2,39		
10	Kadar aspal	Terhadap campuran	6,1	%
		Terhadap agregat	6,5	%
11	Penyerapan aspal	0,85	%	
12	Kadar aspal efektif	5,255	%	
13	Berat isi campuran	2,25	gr/cm ³	

Stabilitas Benda Uji Core Drill

Karakteristik awal benda uji core drill pada tahun 2017 dilakukan pengujian stabilitas, *flow* dan *Marshall quotient* (MQ). Pengujian benda uji core drill dilakukan pada tanggal yang berbeda-beda di tahun 2017. Hasil pengujian stabilitas menunjukkan bahwa benda uji core drill menghasilkan nilai stabilitas diatas 1000 kg walaupun telah dimanfaatkan selama 1 tahun. Namun, dalam penelitian ini pengujian lendutan dengan alat LWD pada tahun 2019. Tabel 2 memperlihatkan hasil pengujian stabilitas benda uji *core drill* pada tahun 2017.

Tabel 2. Karakteristik stabilitas benda uji *core drill* tahun 2017

No.	Tanggal	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
1	17/4/2017	1069,70	3,36	322,00
2	18/4/2017	1041,50	2,99	351,30
3	19/4/2017	1037,40	3,50	297,00
4	20/4/2017	1057,60	3,02	357,50
5	21/4/2017	1037,40	2,96	355,60
6	22/4/2017	1073,80	2,87	375,30
7	24/4/2017	1045,50	3,02	349,20
8	05/8/2017	1045,50	3,42	305,90
9	05/9/2017	1049,50	3,01	352,20
10	05/10/2017	1061,60	3,14	342,20
11	05/11/2017	1057,60	2,94	361,30
12	05/12/2017	1065,70	2,87	371,60

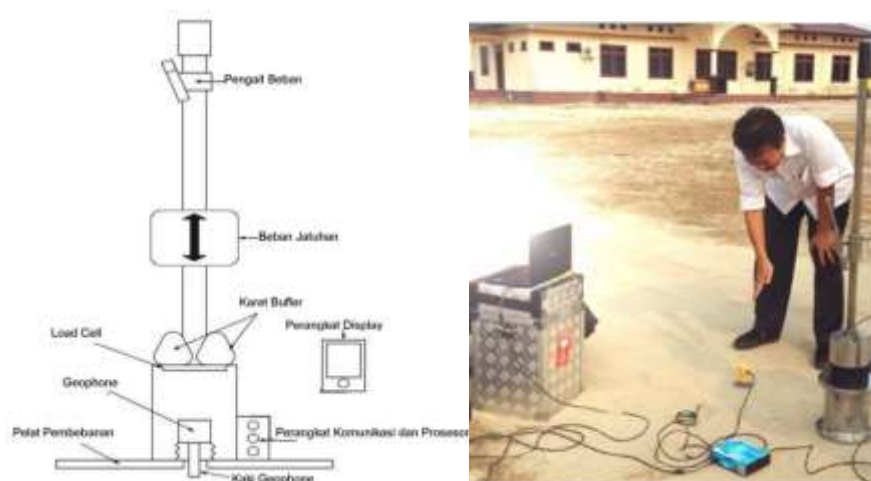
No.	Tanggal	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
13	13/5/2017	1049,50	3,27	324,00
14	15/5/2017	1057,60	3,40	312,70

Pengujian Lentutan Jalan dengan Alat LWD

Pengujian ini menggunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*). Pedoman pengujian LWD adalah pedoman metoda uji lentutan menggunakan *Light Weight Deflectometer* Pd-03-2016-B, SE Menteri PUPR No/19/SE/M/2016. Gambar 2 memperlihatkan pengoperasian alat LWD yang dilakukan oleh 1 sampai 2 orang teknisi. Alat LWD digunakan untuk pengukuran lentutan pada permukaan perkerasan tanpa penutup, digunakan untuk mengukur kekuatan struktur lapisan (dalam parameter modulus elastisitas) dan digunakan untuk jalan yang bervolume lalu lintas rendah. Gambar 3 memperlihatkan alat LWD beserta komponen-komponen.



Gambar 2. Pengoperasian alat LWD



Gambar 3. Alat dan komponen-komponen LWD

Analisis Data

Analisis data dengan menggunakan alat LWD laboratorium prinsipnya sama dengan analisis data dengan menggunakan alat LWD lapangan yaitu dengan sistem komputerisasi. Berdasarkan elastis Bousinnesq, hubungan antara tekanan dan perpindahan yang diterapkan di dalam tanah untuk kasus basa kaku atau fleksibel yang terletak pada ruang setengah elastis dapat diturunkan seperti pada persamaan 1.

$$E = \frac{(1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a}{d_0} \times f \quad (1)$$

Dimana:

- E = modulus elastisitas (MPa)
- d₀ = penurunan yang diukur (mm)
- ν = Rasio Poisson
- σ₀ = tegangan terapan (MPa)
- a = jari-jari pelat (mm)
- f = faktor bentuk tergantung pada distribusi tegangan

Modulus permukaan (modulus lapisan permukaan) adalah dihitung dari defleksi permukaan menggunakan persamaan Boussinesq:

$$E_0(0) = 2(1 - \mu^2) \sigma_0 a / D(0) \quad (2)$$

$$E_0(r) = (1 - \mu^2) \sigma_0 a^2 / (r D(r)) \quad (3)$$

Dalam kasus Zorn LWDs, gaya yang diterapkan dari massa jatuh diukur di laboratorium dan digunakan untuk semua perhitungan modulus permukaan untuk alat LWD. Persamaan 14 dapat digunakan untuk memperkirakan beban yang diterapkan untuk Zorn LWDs.

$$F_z = \sqrt{2 \times m \times g \times h \times k} \quad (4)$$

Dimana :

- F_z = Estimasi besarnya gaya (N)
- m = Massa beban dari alat LWD (kg)
- g = Besarnya percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- h = Tinggi jatuh beban dari alat LWD (m)
- k = Konstanta karet buffer (362396,2 N/m)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian lapangan perkerasan aspal berupa pengujian lendutan dengan menggunakan alat *Light Weight Deflectometer* (LWD) dilaksanakan di ruas jalan Merauke – Tanah Merah, Provinsi Papua. Selama pengujian, penurunan atau deformasi dari pelat bantalan dicatat untuk setiap pukulan. Pada setiap titik uji jumlah pukulan yang diberikan adalah 3 kali. Selain pengujian lapangan dilaksanakan dengan menggunakan alat LWD, juga dilakukan

pengujian lapangan berupa pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) langsung (lapangan). Tabel 3 memperlihatkan nilai rata-rata frekuensi angular (ω), standar deviasi (σ_w) dan koefisien variasi (COV_w) dari hasil pengujian LWD untuk perkerasan aspal serta hasil pengujian CBR lapangan.

Pada Tabel 3 terlihat nilai E_{LWD} berkisar antara 157 MPa dan 404 MPa sedangkan nilai koefisien variasi adalah sebesar 0,5%. Koefisien variasi (COV) yang diperoleh dalam penyelesaian dan hasil pengujian dari lokasi uji pada lapisan perkerasan aspal ditemukan berada pada nilai sebesar 0,5% untuk seluruh lokasi pengujian (Tabel 21). Modulus deformasi lapisan perkerasan aspal diperoleh dengan nilai yang berkisar antara 157,00 sampai 404,00 MPa.

Tabel 3. Hasil pengujian LWD pada perkerasan aspal

Titik Uji	STA	ω	σ_w (mm)	COV_w (%)	ELWD (MPa)	CBR lapangan (%)
1	0 + 010	0,141	0,071	0,5	359,00	35,9
2	0 + 011	0,138	0,060	0,4	404,00	40,4
3	0 + 012	0,250	0,131	0,5	382,00	38,2
4	0 + 013	0,137	0,076	0,6	162,00	16,2
5	0 + 014	0,184	0,090	0,5	157,00	15,7
6	0 + 015	0,153	0,100	0,6	181,00	18,1
7	0 + 016	0,207	0,055	0,3	251,00	25,1
8	0 + 017	0,163	0,056	0,3	369,00	36,9

Catatan: COV = Koefisien variasi

Nilai modulus deformasi yang diperoleh sangat bervariasi pada setiap lokasi pengujian, hal ini disebabkan karena variasi dalam pemadatan energi. Selain itu, hasil pengujian CBR lapangan juga berkisar antara 15,7% hingga 40,4%. Nilai CBR lapangan tersebut berkorelasi dengan nilai modulus elastisitas dengan menggunakan alat LWD.

Hubungan Antara Titik Pengujian dengan Nilai Defleksi (D)

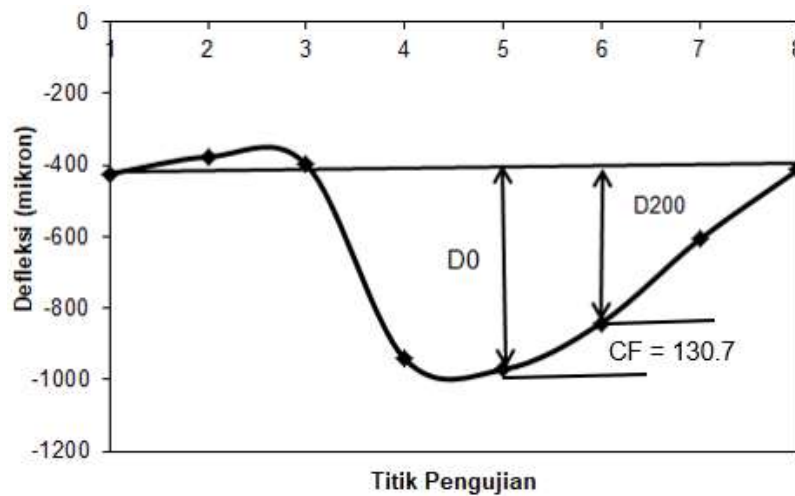
Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara titik pengujian LWD dengan nilai defleksi yang dihasilkan. Di dalam metode desain perkerasan (MDP, 2013) data defleksi LWD dapat dijadikan sebagai dasar untuk penentuan penanganan overlay dan rekonstruksi. Parameter yang dapat digunakan adalah fungsi lengkung (*curvature function*).

$$CF = D_0 - D_{200} = 971,9 - 841,2 = 130,7 \text{ mikron}$$

Keterangan:

D_0 = Defleksi di titik pembebanan

D_{200} = Defleksi di titik sejauh 200 mm dari pusat pembebanan

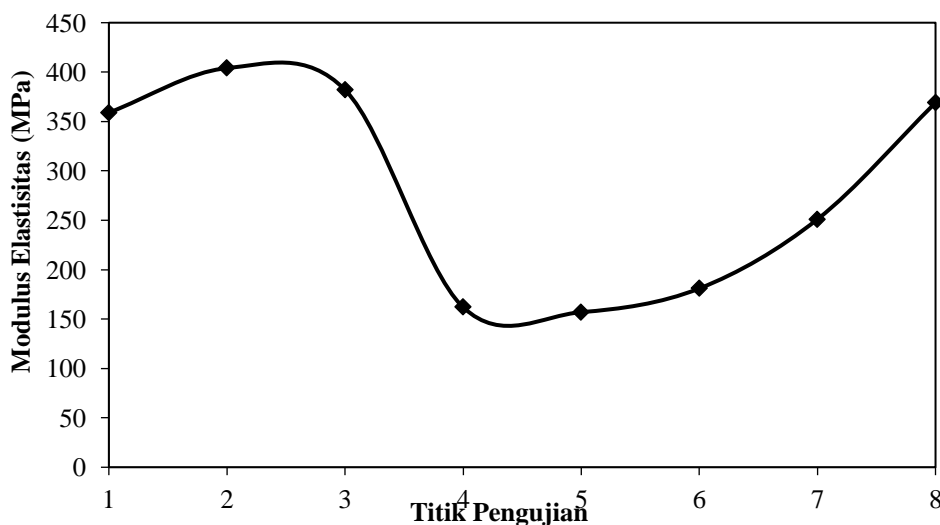


Gambar 4. Hubungan antara titik pengujian dengan nilai defleksi

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa nilai CF yang didapatkan adalah 130,7 mikron atau 0,13 mm. Berdasarkan Tabel MDP, nilai CF sebesar 0,13 mm mengisyaratkan bahwa perkerasan aspal pada ruas tersebut sudah harus di *overlay* dengan memperhatikan kaidah-kaidah perkerasan jalan.

Hubungan Antara Titik Pengujian dengan Nilai Modulus Elastisitas (EVD0)

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara titik pengujian dengan modulus elastisitas pada perkerasan aspal. Terlihat bahwa nilai modulus elastisitas dari alat LWD yang dihasilkan pada masing-masing titik pengujian bervariasi bergantung pada kepadatan masing-masing titik pengujian. Nilai modulus elastisitas terbesar pada titik pengujian 2 sebesar 404,0 MPa sedangkan nilai modulus elastisitas yang terkecil pada titik pengujian 5 sebesar 157 MPa.



Gambar 5. Hubungan antara titik pengujian dengan nilai modulus elastisitas (EVD0)

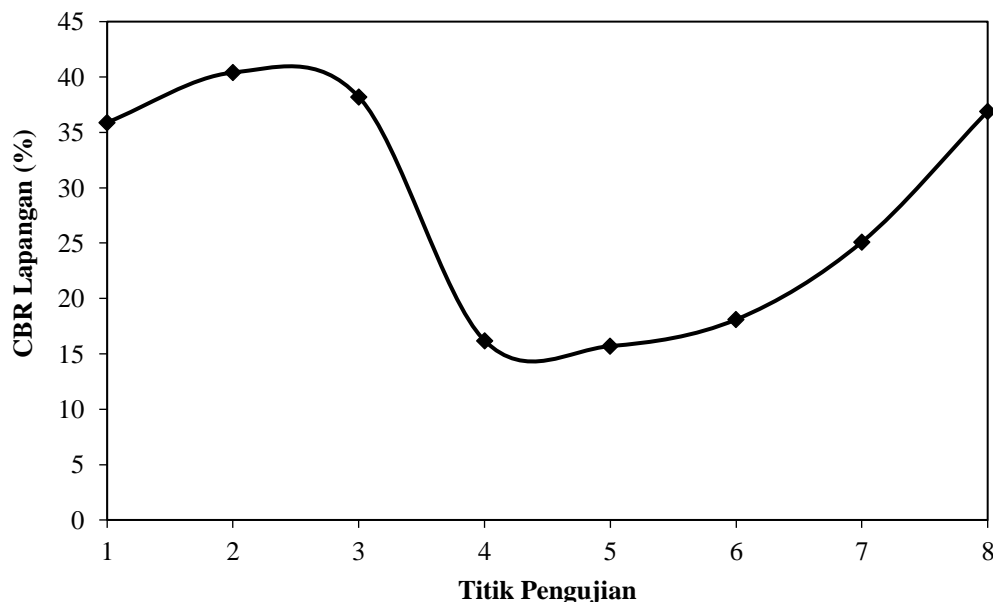
Berdasarkan buku Pedoman Metoda Uji Lendutan menggunakan *Light Weight Deflectometer* (LWD) (Pd 03 – 2016 – B) mensyaratkan bahwa jika nilai EVD0 \geq 250 MPa maka lapis perkerasan tersebut harus diberikan penanganan yaitu *overlay*.

Hubungan Antara Titik Pengujian dengan Nilai CBR Lapangan

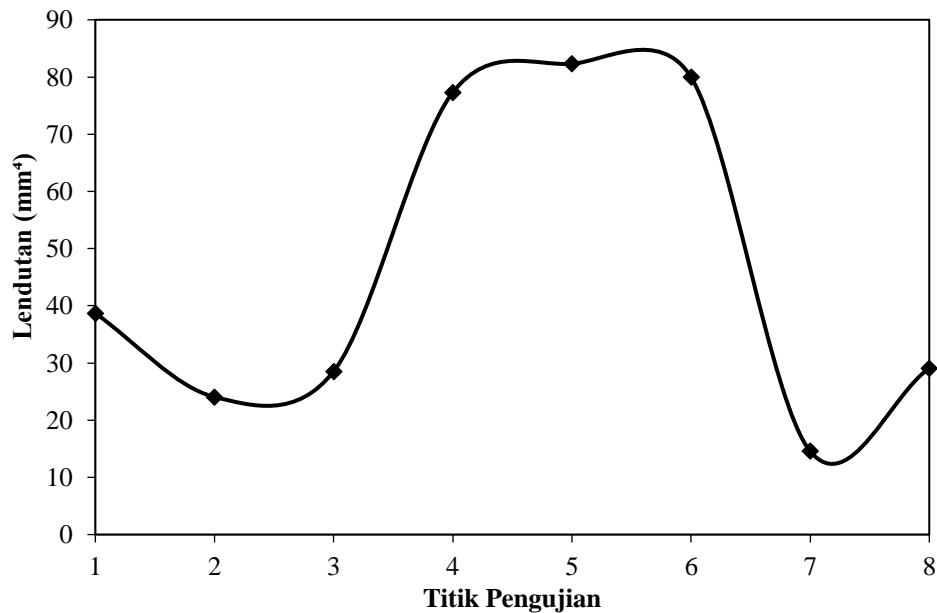
Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara titik pengujian dengan nilai CBR lapangan. Nilai CBR lapangan yang dihasilkan berkorelasi dengan nilai modulus elastisitas yang dihasilkan dari pengujian LWD. Terlihat pula bahwa nilai CBR lapangan bergantung pada kepadatan masing-masing titik pengujian. Nilai CBR lapangan terbesar pada titik pengujian 2 sebesar 40,4% sedangkan nilai modulus elastisitas yang terkecil pada titik pengujian 5 sebesar 15,7%.

Hubungan Antara Titik Pengujian dengan Nilai Lendutan

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara titik pengujian dengan nilai lendutan yang dihasilkan dari perkerasan aspal. Terlihat bahwa nilai lendutan yang dihasilkan bervariasi pada masing-masing titik pengujian. Berdasarkan buku Pedoman Metoda Uji Lendutan menggunakan *Light Weight Deflectometer* (LWD) (Pd 03 – 2016 – B) mensyaratkan bahwa jika nilai lendutan $> 41 \text{ mm}^4$ maka jalan tersebut harus di rekonstruksi sedangkan jika nilai lendutan yang dihasilkan $< 41 \text{ mm}^4$ maka jalan tersebut harus di *overlay*.



Gambar 6. Hubungan antara titik pengujian dengan nilai CBR lapangan



Gambar 7. Hubungan antara titik pengujian dengan nilai lendutan

Pada titik pengujian 1, 2, 3 dan 8 terlihat bahwa nilai lendutan yang dihasilkan $< 41 \text{ mm}^4$. Sehingga pada titik itu harus diberikan penanganan berupa overlay sedangkan pada titik pengujian 4, 5, 6 dan 7 nilai lendutan yang dihasilkan $> 41 \text{ mm}^4$ dan harus diberikan penanganan berupa rekonstruksi. Secara garis besar terlihat bahwa perkerasan aspal pada ruas jalan Merauke – Tanah Merah, Provinsi Papua harus diberikan penanganan berupa *overlay*.

KESIMPULAN

1. Jenis kerusakan jalan yang terjadi dengan metode pengukuran menggunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*) adalah pada ruas perkerasan aspal dan perkerasan tanah di beberapa STA dalam kondisi baik ($\text{EVD0} \leq 250 \text{ MPa}$) dan juga di beberapa STA yang lainnya dalam kondisi yang kurang baik ($\text{EVD0} \geq 250 \text{ MPa}$).
2. Volume kerusakan dan strategi penanganan sesuai dengan jenis dan tingkat kerusakan jalan tersebut adalah pada beberapa STA dalam kondisi baik dan STA lainnya dalam kondisi yang kurang baik. Strategi penanganan yang diberikan adalah berupa *overlay* dan rekonstruksi. Hal ini dapat dibuktikan jika nilai $\text{EVD0} \geq 250 \text{ MPa}$ maka lapis perkerasan tersebut harus diberikan penanganan yaitu *overlay*.

DAFTAR PUSTAKA

Ebrahimi, A. dan Tuncer B.E. 2011. Light-weight Deflectometer for Mechanistic Quality Control of Base Course Materials, ice proceedings, pp : 1-10.

- Elhakim, A.F., Elbaz, K. dan Amer, M.I. 2013. The Use of Light Weight Deflectometer for In Situ Evaluation of Sand Degree of Compaction, Volume 10 Issue 3, pp : 298-307.
- Arnold, G., Morkel, C. and Weshuizen, G.v.d. 2011. Development of tensile fatigue criteria for bound materials. NZ Transport Agency research report 463. 135p.
- Austrroads (1992). Pavement design – a guide to the structural design of road pavements. AP17/92, Austrroads, Sydney.
- Thagesen, B. 1996. Tropical Rocks and Soil, In : *Highway and Traffic Engineering in Developing Countries* : B, Thagesen, ed. Chapman and Hall, London.
- EN Standard 1971. 2000. Composition, spesifikasi and conformity criteria for common cements. ENV 197-1: 1992. European Standard, Norme Europeenne Europaische Norm.
- Kerbs, R.D., dan Walker, R.D. 1971, Highway Materials McGrawhill Book Company, New York.
- Rao, N., George, V. dan Shivashankar, R. 2008. PFWD, CBR and DCP Evaluation of Lateritic Subgrades of Dakshina Kannada, India, The 12th International Confrence of International Association for Computer Methods and Advances in Geomachanics (IACMAG), pp. 4417-4423.
- Ryden, N. dan Mooney, M.A. 2009. Analysis of surface waves from the light weight deflectometer, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29, pp. 1134–1142.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2016. Pd 03-2016-B. Pedoman Metoda Uji Lendutan Menggunakan *Light Weight Deflectometer* (LWD),
- Shen, S. and Carpenter, S.H., 2007. Development of asphalt fatigue model based on energy principles. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 76, 525–574.
- Stephen B. 2015. The Shell Bitumen Handbook, University of Nottingham, sixth edition, ISBN: 978-0-7277-5837-8.