

**DISERTASI**

**HUBUNGAN NILAI MODULUS KEKAKUAN PADA ALAT  
MARSHALL TEST TERHADAP ALAT LIGHT WEIGHT  
DEFLECTOMETER (LWD) LABORATORIUM**

*(Correlation of Marshall Test Based With Light Weight  
Deflectometer (LWD) Laboratory Based Elasticity Modulus  
of Asphalt Mixture)*

**LUCKY CAROLES  
D013172001**



**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

**DISERTASI**

**HUBUNGAN NILAI MODULUS KEKAKUAN PADA ALAT  
MARSHALL TEST TERHADAP ALAT LIGHT WEIGHT  
DEFLECTOMETER (LWD) LABORATORIUM**

Disusun dan Diajukan Oleh

**LUCKY CAROLES**  
**Nomor Pokok D013172001**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
Pada tanggal 23 Desember 2020  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

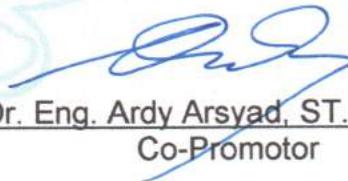
Menyetujui  
Komisi Penasehat



Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT  
Promotor



Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT  
Co-Promotor

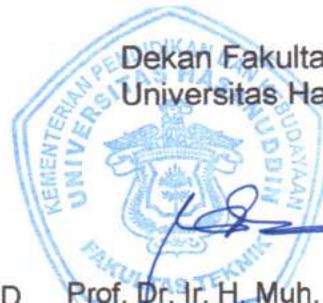


Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc  
Co-Promotor



Ketua Program Studi  
S3 Teknik Sipil

Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D



Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS/DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Lucky Caroles  
Nomor mahasiswa : D013172001  
Program studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis/disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 Januari 2021

Yang menyatakan



Lucky Caroles

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan yang maha kuasa yang atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni **“Hubungan Modulus Kekakuan Pada Alat Marshall Test Terhadap Alat Light Weight Deflectometer”** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan amat mendalam kepada bapak **Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT**, atas bimbingan, arahan dan petunjuknya sehingga penelitian dan penyusunan disertasi ini dapat kami laksanakan dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada **Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT** dan **Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc** selaku Co-Promotor yang banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami. Kepada bapak kami mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang begitu tulus dan ikhlas.

Penghargaan yang setinggi tingginya kepada; Rektor Universitas Hasanuddin (Ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA**), bapak **Prof. Dr. H. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), bapak **Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng** (Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas

Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, MS., M.Eng.Sc., Ph.D** (Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin), bapak **Dr. Ir. Sigfried, M.Sc** sebagai peneliti senior Pusjatan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dan bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Unhas dan staf Prodi S3 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, kami sampaikan banyak terima kasih.

Ucapan terimakasih yang setinggi tingginya atas segala keikhlasan, pikiran dan tenaganya yang tidak ternilai. Hanya dengan doa semoga Tuhan Yang Maha Kuasa dapat membalasnya. Akhirnya kami ucapkan salam sejahtera untuk kita semua.

Makassar, Januari 2021  
Salam

Lucky Caroles

## ABSTRAK

**LUCKY CAROLES.** Hubungan Nilai Modulus Kekakuan Pada Alat Marshall Test Terhadap Alat Light Weight Deflectometer (LWD) Laboratorium (dibimbing oleh **Abd. Rachman Djamaluddin, A. Arwin Amiruddin** dan **Ardy Arsyad**).

Kondisi tegangan yang terjadi akibat beban roda pada lapisan perkerasan dapat diuji di laboratorium namun dengan banyak faktor yang disederhanakan. Pada kondisi sesungguhnya tekanan atau beban diterapkan tiga dimensi. Oleh karena itu, sejumlah pengujian yang telah disederhanakan, diperkenalkan untuk dapat menguji sejumlah aspek-aspek tertentu dari perilaku in-situ. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan korelasi antara nilai modulus elastisitas yang dihasilkan oleh alat Marshall test dengan nilai modulus elastisitas yang dihasilkan oleh alat LWD versi laboratorium. Penelitian ini berupa uji eksperimental di laboratorium. Rancangan penelitian diaplikasikan pada campuran AC-WC dengan melakukan pengujian Marshall test dan LWD versi laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya hubungan nilai korelasi yang kuat antara modulus elastisitas yang dihasilkan oleh LWD laboratorium dengan nilai Marshall quotient yang dihasilkan alat Marshall dan modulus yang dihasilkan UMATTA yaitu  $E_{LWD \text{ laboratorium}} = 1,073 E_{\text{Marshall quotient}}$  dan  $E_{LWD \text{ laboratorium}} = 1,068 E_{\text{UMATTA}}$ . Alat LWD laboratorium dapat digunakan sebagai instrument dalam menentukan nilai lendutan dan modulus pada perkerasan beraspal skala laboratorium.

**Kata kunci :** Modulus kekakuan, Marshall test, LWD laboratorium



A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line at the end.

## ABSTRACT

**LUCKY CAROLES.** Correlation of Modulus Values in The Marshall Test of Laboratory Light Weight Deflectometer (LWD) (supervised by **Abd. Rachman Djamaluddin, A. Arwin Amiruddin dan Ardy Arsyad**).

Stress conditions that occur due to wheel load on the pavement layer can be tested in the laboratory but with many simplified factors. In actual conditions pressure or load is applied in three dimensions. Therefore, a number of simplified tests were introduced to be able to test certain aspects of in-situ behavior. This study aims to find the correlation between the modulus of elasticity produced by the Marshall test with the modulus of elasticity produced by the laboratory version of the LWD. This research is in the form of experimental tests in the laboratory. The study design was applied to the AC-WC mixture by testing the Marshall test and LWD laboratory version. The results showed that there was a strong correlation between the modulus of elasticity produced by the laboratory LWD with the Marshall quotient value produced by the Marshall instrument and the modulus produced by UMATTA, namely laboratory  $E_{LWD} = 1.073 E_{\text{Marshall quotient}}$  and  $E_{LWD \text{ laboratory}} = 1.068 E_{UMATTA}$ . Laboratory LWD tools can be used as instruments in determining deflection and modulus values in laboratory scale asphalt pavement.

**Keywords :** Elasticity modulus, Marshall test, Laboratory LWD



A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line at the bottom.

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	xiv
<b>BAB I    PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	9
C. Tujuan Penelitian.....	10
D. Batasan Masalah.....	10
E. Manfaat Penelitian.....	11
F. Sistematika Penulisan .....	12
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Isu Penggunaan Alat Light Weight Deflectometer (LWD) Untuk Memprediksi Umur Rencana Jalan.....	15
B. Perkerasan Lentur Jalan .....	17
C. Pengukuran Gelombang atau Getaran.....	32
D. Derajat Kebebasan Tunggal (Single Degree of Freedom) .....	43

E. Pengujian Nilai Modulus Pada Material Aspal.....	63
F. Komponen Alat LWD Laboratorium.....	81
G. Kerangka Pikir Penelitian.....	85
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	87
B. Rancangan Penelitian.....	91
C. Instrumen Penelitian .....	93
D. Pengujian Karakteristik Campuran Lataston Lapis Aus .....	101
E. Metode Analisis Data .....	103
F. Tahapan-Tahapan Penelitian.....	110
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Komponen Alat LWD Laboratorium .....	116
B. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Material.....	118
C. Penentuan Gradasi Campuran.....	122
D. Prediksi Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) Berdasarkan Kadar Aspal Perkiraan .....	124
E. Rancangan Campuran (Mix Design) HRS-WC .....	125
F. Nilai Modulus Benda Uji Marshall Menggunakan Alat UMATTA Dalam Kondisi Prediksi KAO .....	126
G. Pengujian Lendutan Benda Uji Marshall Variasi Kadar Aspal .....	128

H. Pengaruh Rendaman Air Terhadap Nilai Lendutan dan Modulus Benda Uji Marshall.....	131
I. Karakteristik Marshall Campuran HRS-WC .....	132
J. Korelasi Antara Nilai Modulus LWD Laboratorium Dengan Alat Marshall dan Alat UMATTA .....	143
K. Korelasi Antara Nilai Modulus Alat LWD Laboratorium Dengan Alat LWD dan FWD Lapangan .....	145
L. Temuan Empirik .....	152
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
A. Kesimpulan.....	153
B. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Material.....	154
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>155</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Nomor</b>	<b>Halaman</b>
1. Perbandingan Antara Derajat Kepadatan Aktual dan Derajat Kepadatan Dengan LWD Pada Lapisan Pasir Dengan Kepadatan 2,67 .....	74
2. Perbandingan Antara Derajat Kepadatan Aktual dan Derajat Kepadatan Dengan LWD Pada Lapisan Pasir Dengan Kepadatan 2,67 .....	75
3. Spesifikasi Beberapa Alat LWD .....	77
4. Metode Pengujian Karakteristik Agregat .....	95
5. Metode Pengujian Karakteristik Aspal Minyak Pen. 60/70 .....	95
6. Gradasi Agregat Gabungan Lataston.....	99
7. Jumlah Benda Uji Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) .....	100
8. Jumlah Benda Uji Variasi Perendaman Pada Kadar Aspal Optimum (KAO) .....	101
9. Karakteristik Agregat Kasar.....	118
10. Karakteristik Agregat Halus.....	119
11. Karakteristik Aspal Penetrasi 60/70 .....	120
12. Gradasi Agregat Gabungan .....	123
13. Komposisi Campuran HRS-WC (Dalam Berat 1200 Gram Benda Uji .....	126
14. Resilient Modulus Benda Uji Marshall Dalam Kondisi KAO .....	127

15.	Nilai Lendutan Benda Uji Marshall Menggunakan LWD Laboratorium .....	128
16.	Nilai Lendutan Benda Uji Marshall Akibat Rendaman Air.....	131
17.	Hasil Pengujian Karakteristik Marshall Untuk Seluruh Parameter .....	141
18.	Analisis Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal Panas Menggunakan Aspal Minyak .....	142
19.	Karakteristik Marshall Pada Kadar Aspal Optimum (8,0%) .....	143
20.	Rangkuman Nilai Uji .....	144

## DAFTAR GAMBAR

<b>Nomor</b>		<b>Halaman</b>
1.	Struktur Perkerasan Lentur .....	18
2.	Hubungan Antara CBR dengan Modulus Reaksi Tanah Dasar .	21
3.	Modulus Reaksi Tanah Dasar Wetergaard .....	22
4.	Defleksi Pelat Beton yang Dibebani. ....	22
5.	Sistem Sumbu Koordinat Untuk Persamaan Boussineq .....	23
6.	Ilustrasi Teori Winkler.....	26
7.	Ilustrasi Teori Pasternak.....	27
8.	Domain Waktu Suatu sinyal, Domain Frekuensi Suatu Sinyal.....	34
9.	Panjang Gelombang, Frekuensi dan Amplitudo .....	37
10.	Sinyal Analog dan Sinyal Digital .....	39
11.	Sistem Getar Parameter yang Disatukan .....	43
12.	Derajat Kebebasan untuk Sistem Getaran .....	42
13.	Getaran Bebas dari Sistem Pegas Massa .....	45
14.	Perpindahan, Kecepatan, dan Akselerasi untuk Getaran Bebas dari Sistem Pegas Massal .....	49
15.	Getaran Mengikat dari Sistem Pegas Massa.....	50
16.	Getaran Mengikat dari Sistem Pegas Massa, Variasi magnifica- Faktoritas dengan $w/w_n$ , Perpindahan dengan Waktu Pada Resonansi .....	53
17.	Getaran Grafis dari Sistem Mass-Spring = Dashpot.....	59
18.	Tegangan yang Terjadi pada Lapisan perkerasan .....	64

19.	Diagram Tegangan-regangan .....	66
20.	Skema Pengujian dengan Menggunakan LWD .....	76
21.	Skematik LWD .....	83
22.	Mangkuk Defleksi .....	84
23.	Kerangka Pikir Penelitian .....	82
24.	Bagan Alir Penelitian.....	88
25.	Proses pembuatan Benda Uji Marshall .....	90
26.	Proses Penelitian Skenario Lapangan Skala Laboratorium .....	91
27.	Proses Perancangan Alat LWD Laboratorium.....	93
28.	Alat Pengujian Marshall.....	103
29.	Pengoperasian Alat LWD .....	104
30.	Alat dan Komponen-Komponen LWD .....	104
31.	Komponen-Komponen Alat LWD Laboratorium .....	108
32.	Proses pengujian Dengan Alat LWD Laboratorium .....	109
33.	Tahapan-Tahapan Penelitian .....	115
34.	Komponen Alat LWD Laboratorium.....	116
35.	Gradasi Agregat Gabungan.....	124
36.	Pulse (Beban Impact) Berdasarkan Waktu Hasil Pengujian UMATTA.....	127
37.	Hubungan Antara Kadar Aspal Dengan Lendutan .....	130
38.	Hubungan Antara Kadar Aspal Dengan Modulus.....	130
39.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai Stabilitas.....	133

40.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai Flow.....	134
41.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai Marshall Quetiont.....	135
42.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai Kepadatan.....	137
43.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai VIM .....	138
44.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai VMA .....	139
45.	Hubungan Kandungan Kadar Aspal Minyak Terhadap Nilai VFB .....	140
46.	Skema Lapangan Skala Laboratorium .....	145
47.	Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Lendutan (D0) LWD dan FWD Lapangan .....	146
48.	Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Modulus LWD dan FWD Lapangan .....	146
49.	Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Lendutan (D0) LWD Lapangan dan LWD Laboratorium .....	149
50.	Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Modulus LWD Lapangan dan LWD Laboratorium .....	149
51.	Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Lendutan (D0) FWD Lapangan dan LWD Laboratorium .....	151

52. Hubungan Antara Nilai Titik Percobaan dan Modulus FWD Lapangan dan LWD Laboratorium .....	151
---	-----

## DAFTAR NOTASI

<b>NP</b>	= Nilai kerusakan perkerasan
$\sigma$	= Tegangan (MPa)
$\epsilon$	= Regangan (mm)
<b>F</b>	= Gaya (N)
<b>A</b>	= Luas penampang (mm <sup>2</sup> )
<b><math>\Delta L</math></b>	= Perubahan panjang (mm)
<b>L<sub>0</sub></b>	= Panjang mula-mula (mm)
<b>S<sub>me</sub></b>	= Modulus kekakuan campuran aspal beton (MPa)
<b>S<sub>b</sub></b>	= Modulus kekakuan aspal (MPa)
<b>m</b>	= Jumlah pukulan palu
<b>LWD</b>	= Light Weight Deflectometer
<b>PA</b>	= Kadar aspal efektif perkiraan terhadap berat agregat
<b>AK</b>	= Persentase agregat kasar tertahan saringan No. 8
<b>AH</b>	= Persentase agregat halus lolos saringan No. 8 tertahan No. 200
<b>F</b>	= Persentase agregat lolos saringan No. 200
<b>S</b>	= Stabilitas (kg)
<b>F</b>	= Flow (pelelehan) (mm)
<b>E</b>	= Modulus elastisitas (MPa)
<b>d<sub>0</sub></b>	= Penurunan yang diukur (mm)
<b>v</b>	= Rasio poisson
<b><math>\sigma_0</math></b>	= Tegangan terapan (MPa)
<b>a</b>	= Jari-jari pelat (mm)
<b>f</b>	= Faktor bentuk tergantung pada distribusi tegangan
<b>d</b>	= Diameter benda uji (cm)
<b>P<sub>max</sub></b>	= Beban maksimum (kN)
<b>t</b>	= Ketebalan benda uji (mm)
<b>°C</b>	= Derajat celcius
<b>%</b>	= Persen

<b><math>\pi</math></b>	=	PI radian
<b>cm</b>	=	Centimeter
<b>mm</b>	=	Milimeter
<b>Pen</b>	=	Penetrasi
<b>MQ</b>	=	Marshall Quotient
<b>VIM</b>	=	Void in Mix
<b>VMA</b>	=	Void Mineral in Agregat
<b>ASTM</b>	=	American Society for Testing Materials
<b>SNI</b>	=	Standar Nasional Indonesia
<b>KAO</b>	=	Kadar Aspal Optimum
<b>AASHTO</b>	=	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>Dx</b>	=	Kekakuan Lentur (Flexuran Ridity Pelat Ortotropik Atah Sumbu X
<b>Dy</b>	=	Kekakuan Lentur (Flexuran Ridity Pelat Ortotropik Atah Sumbu Y
<b>B</b>	=	Kekakuan Puntir (Torsional Rigidity) Pelat Ortotropik
<b>Ex</b>	=	Modulus Elastisitas Pelat Arah X
<b>Ey</b>	=	Modulus Elastisitas Pelat Arah Y
<b>x</b>	=	Poisson's Ratio Arah X
<b>ux</b>	=	Poisson's Ratio Arah Y
<b>uy</b>	=	Modulus Elastisitas Pelat Arah X
<b><math>\rho</math></b>	=	Massa Jenis
<b>h</b>	=	Tebal Pelat
<b><math>\gamma</math></b>	=	Koefisien Redaman
<b>w(x,y,t)</b>	=	Fungsi Lendutan yang Tergantung Pada Fungsi Posisi dan Fungsi Waktu
<b>pz(x,y,t)</b>	=	Fungsi Beban Transversal Arah Z Yang Tergantung Pada Fungsi Posisi Dan Fungsi Waktu
<b>Nx</b>	=	Beban In-Plane Arah X
<b>Ny</b>	=	Beban In-Plane Arah Y

<b>rif</b>	= Rasio beban In-Plane
<b>k</b>	= Kekakuan Pegas Pondasi Pasternak
<b>Gs</b>	= Kekakuan Geser Pondasi Pasternak
<b>Po</b>	= Amplitudo dari Beban
<b>x(t), y(t)</b>	= Fungsi Posisi dari Beban di Arah X dan Y
<b><math>\alpha</math></b>	= Koefisien Beban
<b><math>\omega</math></b>	= Frekuensi dari Kendaraan
<b>C1, C2</b>	= Parameter dari Winkler – Pasternak
<b>W</b>	= Defleksi Secara Vertikal
<b>fz</b>	= Beban Vertikal yang Bekerja Pada Suatu Lapisan
<b>[C]</b>	= Matriks Konstanta C1 dan C2
<b>B</b>	= Setengah Lebar Pondasi
<b><math>C_{1W}, C_{2W}</math></b>	= Konstanta Winkler
<b>H</b>	= Kedalaman Zona Deformasi

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Saat ini salah satu konsentrasi pembangunan fisik di bidang infrastruktur yang paling pesat adalah pembangunan jalan terutama jalan yang berstatus jalan nasional. Pemerintah pusat dalam program utamanya berusaha menghubungkan beberapa tempat ke tempat lain atau juga membuat jalan baru baik itu jalan biasa ataupun jalan tol dengan tujuan memperbaiki kelancaran arus barang dan manusia demi tercapainya percepatan dan pemerataan pembangunan.

Demi meningkatkan kualitas dan kuantitas jalan Nasional, Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dalam 2 tahun terakhir telah melakukan suatu program kegiatan dengan judul Survey Kondisi Jalan jembatan dan Lereng dengan maksud memperoleh data real dan digunakan sebagai data base dalam hal pemograman kegiatan di lingkup Dirjen Bina Marga dan juga sebagai acuan dalam pembuatan program kerja jangka panjang dan jangka pendek.

Salah satu kegiatan survei tersebut adalah menyediakan data mengenai kondisi jalan real yang berada pada status jalan nasional dan jalan strategis nasional. Pengambilan data yang diperlukan adalah, kondisi permukaan (ketidakrataan dengan menggunakan alat Roughness

meter), survei inventarisasi (menggunakan cara manual atau juga dengan kamera mata garuda), survei *pavement condition* indeks atau survei kondisi jalan (bisa menggunakan peralatan kamera dan manual) dan survey kapasitas Struktur jalan (lendutan) dengan menggunakan alat Bankleman Beam atau *Falling Weight Deflectometer* (FWD) atau bisa juga dengan alat *Light Weight Deflectometer* (LWD). Khusus mengenai pengambilan data lendutan ketiga peralatan tadi bisa digunakan asal sesuai dengan ketentuan dan kondisi area survei.

Prinsip kerja ketiga alat tersebut hampir sama yakni bagaimana memberi beban pada permukaan perkerasan dan diharapkan akan mendapatkan hasil berupa besarnya lendutan dan modulus pada permukaan sampai tanah dasar. Berdasarkan faktor kemudahan dan ekonomis dan kecepatan pengambilan data maka dari ketiga peralatan tersebut yang paling memungkinkan adalah alat LWD. Hal ini disebabkan karena alat tersebut lebih ringan, pengambilan sampel dilapangan juga lebih banyak, sampel dilapangan juga bisa langsung mendapatkan nilai lendutan dan modulus dan harganya relatif lebih murah.

Ketiga cara diatas semua dilakukan di lapangan namun untuk skala laboratorium saat ini kita mengenal beberapa cara untuk mendapatkan nilai modulus, bisa dengan cara analitis dan dengan cara uji langsung. Untuk uji langsung saat ini peralatan yang dapat mengeluarkan nilai modulus secara langsung pada perkerasan aspal hanyalah UMATTA, alat *Marshall test* juga dapat menghasilkan nilai modulus namun tidak secara

langsung melainkan melalui proses perhitungan dari data yang ada yakni nilai stabilitas dan nilai flow.

Kondisi tegangan yang terjadi akibat beban roda pada lapisan perkerasan dapat diuji di laboratorium namun dengan banyak faktor yang disederhanakan. Pada kondisi sesungguhnya tekanan atau beban diterapkan tiga dimensi. Oleh karena itu, sejumlah pengujian yang telah disederhanakan, diperkenalkan untuk dapat menguji sejumlah aspek-aspek tertentu dari perilaku in-situ. Pengujian tersebut dibagi menjadi tiga kelompok. Kelompok pengujian pertama adalah pengujian dasar uji beban berulang triaksial (*repeated load triaxial test*), uji tekan statik untuk rangkak (*unconfined static uniaxial creep compression test*), uji beban tarik berulang (*repeated load indirect tensile test*), uji dinamik kekakuan dan kelelahan (*dynamic stiffness and fatigue tests*). Kelompok pengujian kedua adalah pengujian simulasi di laboratorium (*simulative*): Uji Roda-pelacakan (*wheel-tracking test*) dan kelompok pengujian yang ketiga adalah pengujian empiris dengan uji Marshall (*Marshall tests*), (*Shell Bitumen Handbook*, 2013).

Berbagai penelitian-penelitian terdahulu telah dilakukan dengan menggunakan alat LWD untuk menghitung nilai modulus pada perkerasan jalan. Mazari *et al.*, 2017 memperkenalkan teknologi *Intelligent Compaction* (IC) yang telah muncul selama satu dekade terakhir untuk mengevaluasi kekakuan lapisan perkerasan yang dipadatkan. Penerapan teknologi IC untuk memadatkan lapisan geomaterial yang tidak terikat

telah dikombinasikan dengan perangkat *nondestructive testing* (NDT) untuk lebih memberikan karakteristik parameter kekakuan. Area yang diidentifikasi tidak terkoneksi dengan baik dalam melakukan *tes spot* NDT. Hubungan antara nilai-nilai kekakuan berbasis *accelerometer* dari rol dan hasil NDT dapat secara signifikan mempengaruhi interpretasi IC data yang dikumpulkan. Bagian dari situs konstruksi dipilih untuk mengevaluasi korelasi antara hasil dua uji spot NDT, uji beban plat (PLT) dan uji *Light Weight Deflectometer* (LWD) dengan data IC. Hasil penelitian ini merupakan suatu sistem penentuan posisi global dan pendekatan reduksi data. Perangkat LWD tampaknya menjadi perangkat yang tepat untuk memverifikasi area yang kurang kaku yang terdeteksi dari data IC.

Rahman *et al.*, 2007 membahas kekakuan tanah dasar yang diperoleh dari perangkat pemadatan baru yang disebut *Roller Intelligent Compaction* (IC) pada proyek tanggul jalan raya di Kansas. Tiga bagian uji pada dua rute dipadatkan menggunakan roller cerdas tunggal drum baja halus Bomag Variocontrol (BVC) yang memadatkan dan pada saat yang sama mengukur nilai kekakuan tanah yang dipadatkan. Pengukuran kontrol pemadatan tradisional seperti pengujian kepadatan, kadar air in-situ, pengukuran kekakuan tanah menggunakan Geogage, tes defleksi permukaan menggunakan *Light Falling Weight Deflectometer* (LFW) dan *Falling Weight Deflectometer* (FWD) dan tes penetrasi menggunakan *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa IC roller mampu mengidentifikasi lokasi kekakuan tanah yang lebih rendah

dalam arah spasial. Secara umum, kekakuan roller IC menunjukkan sensitif terhadap kadar kelembaban lapangan. Tidak ada korelasi universal yang diamati antara kekakuan roller IC, kekakuan Geogage, modulus tanah tanah dasar yang dihitung ulang dari data defleksi LFWD dan FWD dan *California Bearing Ratio* (CBR) yang diperoleh dari hasil pengujian DCP.

Senseney *et al.*, 2012 menyajikan skema perhitungan kembali LWD untuk mengetahui parameter lapisan, termasuk ketebalan lapisan atas, dari sistem pekerjaan tanah dua lapis. Pendekatan dapat di selesaikan dengan menggunakan model elemen hingga dinamis (FE) untuk perhitungan data defleksi LWD, dan mengimplementasikan algoritma genetika (GA) sebagai solver. Fungsi objektif diformulasikan sebagai ukuran ketidaksesuaian data antara data yang diprediksi dan yang diamati, dinormalisasi oleh defleksi puncak, dan mencakup 180 titik data dari riwayat waktu defleksi dinamis. Fungsi objektif berisi beberapa lokal minimum yang berpotensi menjebak algoritma pencarian gradien, sehingga memvalidasi aplikasi GA sebagai teknik pencarian global untuk masalah ini. GA diterapkan untuk data sintetik dan eksperimental, dan menunjukkan bahwa ketebalan lapisan atas yang dianalisis, modulus lapisan atas dan modulus yang mendasari untuk data eksperimental dibandingkan dengan nilai yang diharapkan.

Tehrani & Meehan, 2010 mengeksplorasi sensitivitas hasil tes in-situ berbasis modulus yang diukur terhadap efek kadar air pematatan, sebuah

studi lapangan dilakukan di Negara Bagian Delaware pada musim panas 2008. Dua alat LWD digunakan dalam penelitian ini. Untuk mengukur nilai modulus tanah yang dipadatkan, satu dengan diameter pelat kontak 300 mm dan satu dengan diameter pelat 200 mm. Bahan pengisi diuji selama penelitian ini adalah pasir dinilai buruk dengan lanau (SP-SM). Tujuan dari makalah ini adalah untuk menunjukkan sensitivitas nilai modulus tanah yang diukur terhadap fluktuasi kadar air tanah di lapangan, dan untuk mendiskusikan pendekatan yang mungkin untuk menafsirkan jenis data LWD variabel ini.

Tirado *et al.*, 2015 mengevaluasi kinerja LWD dalam berbagai kondisi pemuatan, ukuran pelat yang berbeda, dan beragam sifat geomaterial. Kedalaman pengaruh dianalisis dengan menggunakan kriteria tegangan dan regangan. Parameter model konstitutif nonlinier tampaknya memiliki pengaruh signifikan terhadap kedalaman pengaruh yang diukur dari kedua perangkat yang digunakan. Namun, sifat fungsional yang berbeda dari masing-masing perangkat ditemukan menjadi sumber variasi dalam hasil.

Buechler *et al.*, 2012 menggunakan metode elemen-diskrit (DEM) untuk menyelidiki hubungan antara sifat-sifat tanah dan respons mekanik untuk pelat (simulasi LWD) dan pemuatan drum-roller. Simulasi tanah granular yang murni tanpa kohesi ditunjukkan untuk menunjukkan medan tegangan dan regangan yang jauh berbeda dibandingkan dengan simulasi tanah kohesif. Hasil penelitian menunjukkan kemampuan DEM untuk

secara akurat memodelkan fitur-fitur makro dari variabel mikro dan interaksi. Perbandingan antara model elemen hingga dan prediksi dibuat untuk tanah dengan berbagai kemampuan untuk mengirimkan gaya tarik.

Kessler K., 2009 menguraikan asal-usul DCP untuk pengujian tanah dan aplikasi masing-masing untuk berbagai konfigurasi DCP. Berbagai jenis LWD dan hasil yang didapatkan dijelaskan yaitu upaya yang sedang berjalan dalam penggunaan instrumen ini serta standar untuk QC/QA (kontrol kualitas/jaminan kualitas) untuk tanah dasar dan dasar agregat untuk jalan.

Kongkitkul *et al.*, 2014 melakukan penelitian terhadap tanah lateritic yaitu tes pemadatan Proctor yang dimodifikasi untuk menentukan kadar air (opt w) yang optimal dan kepadatan kering maksimum yang sesuai), Uji California Bearing Ratio (CBR) pada spesimen yang disiapkan di opt w, tes kerucut pasir untuk menemukan kepadatan lapangan dan karenanya tingkat pemadatan (c D); dan tes LWD untuk menemukan kekakuan permukaan (LWD k). Sementara secara bertahap meningkatkan upaya pemadatan di lubang uji, kerucut pasir dan tes LWD dilakukan pada tanah yang dipadatkan. Ditemukan bahwa ada korelasi yang relevan antara cD dan% CBR dan LWD k. Ketika korelasi ini diketahui, uji LWD dapat menjadi alternatif untuk mengevaluasi cD dan% CBR secara tidak langsung untuk kontrol pemadatan.

Elhakim *et al.*, 2013 melakukan penelitian yaitu pertama, indeks sifat-sifat tanah dari tanah yang diuji termasuk distribusi ukuran butir; rasio void

maksimum dan minimum dan gravitasi spesifik diperoleh. Analisis petrografi dari pasir yang diuji juga dilakukan untuk menentukan komposisi mineraloginya. Ruang dengan luas 1-m<sup>2</sup> dibangun untuk melakukan pengujian LWD di laboratorium. Penelitian dilakukan untuk kerapatan relatif 20%, 40%, 60% dan 80% untuk mewakili perilaku pasir yang sangat longgar, longgar, padat dan padat. Efek dari keberadaan batas kaku di bawah tanah yang diuji pada hasil pengujian juga diselidiki untuk menentukan zona pengaruh deflectometer ringan.

Hariprasad *et al.*, 2016 menggunakan Light Weight Deflectometer (LWD) sebagai perangkat kontrol kualitas untuk menilai kualitas lapisan perkerasan yang dipadatkan. Sebagai bagian dari penelitian ini, program pengujian lapangan LWD yang luas dilakukan di jalan bebas hambatan di sepanjang Outer Ring Road (ORR) yang berlokasi di Hyderabad, India, untuk menentukan modulus deformasi (ELWD) lapisan dasar dan permukaan perkerasan. ELWD lapisan dasar dan permukaan yang dipadatkan masing-masing berkisar antara 37,6 hingga 58,6 MPa, dan 89,3 hingga 125,7 MPa. Selain itu, studi kasus pada jalan volume rendah disajikan untuk menunjukkan hubungan antara ELWD dan kepadatan in situ yang diperoleh dari uji kerucut pasir. LWD ternyata mudah dioperasikan dan memberikan hasil tes cepat pada setiap lapisan trotoar. Oleh karena itu, frekuensi uji kontrol kualitas dapat ditingkatkan yang mengarah pada peningkatan kualitas keseluruhan lapisan perkerasan yang dipadatkan.

Berdasarkan latar belakang dan penelitian terdahulu yang telah dikemukakan di atas, maka studi ini dilakukan untuk mengembangkan alat LWD namun untuk versi di laboratorium. Dengan kondisi di laboratorium alat ini dibuat tentunya mengikuti kaidah-kaidah atau parameter-parameter yang ada di lapangan, sehingga penulis membuat penelitian ini dengan judul **“Hubungan Nilai Modulus Kekakuan Pada Alat Marshall Test Terhadap Alat *Light Weight Deflectometer (LWD)* Laboratorium”**.

## **B. Rumusan Masalah**

Seperti yang telah diuraikan diatas bahwa saat ini pengambilan nilai lendutan dan modulus elastisitas di laboratorium khususnya laboratorium perkerasan jalan sangat terbatas jenis alatnya dan juga tentunya tidak murah sehingga dari masalah ini muncul sebuah ide bagaimana kita membuat suatu alat yang bisa menjadi alternatif lain dalam penentuan nilai lendutan dan modulus elastisitas yang tentunya lebih cepat, dan lebih murah dan dapat terpercaya. Dari permasalahan tersebut, maka dapat dirumuskan yaitu :

1. Bagaimana memodifikasi alat LWD lapangan hasil pengembangan pusat penelitian jalan dan jembatan sehingga dapat dipakai untuk skala laboratorium.
2. Bagaimana pengaruh tinggi jatuh terhadap lama perendaman dan kadar aspal campuran HRS-WC terhadap nilai lendutan dan modulus elastisitas dengan menggunakan alat LWD skala laboratorium.

3. Bagaimana hubungan antara nilai Marshall Quotion dan stabilitas yang dihasilkan oleh alat Marshall Test terhadap nilai modulus yang dihasilkan oleh dan alat UMATTA dan alat LWD versi laboratorium.

### **C. Tujuan Penelitian**

Terkait dengan latar belakang dan rumusan permasalahan diatas, maka dalam penelitian ini perlu dilakukan suatu studi dan analisis yang bertujuan untuk :

1. Memodifikasi alat LWD lapangan hasil pengembangan pusat penelitian jalan dan jembatan sehingga dapat dipakai untuk versi laboratorium.
2. Menganalisis tinggi jatuh terhadap lama perendaman dan kadar aspal campuran HRS-WC terhadap nilai lendutan dan modulus elastisitas dengan menggunakan alat LWD versi laboratorium.
3. Merumuskan model hubungan antara nilai Marshall Quotion dan stabilitas yang dihasilkan oleh alat Marshall terhadap nilai modulus yang dihasilkan oleh dan alat UMATTA dan alat LWD versi laboratorium.

### **D. Batasan Masalah**

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka ruang lingkup pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal yaitu :

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.

2. Penelitian ini menggunakan uji beban yang bersifat impac dan monotonik pada benda uji berbentuk selinder dalam pengujian stabilitas Marshall.
3. Penelitian ini menggunakan alat LWD versi laboratorium yang telah dibuat sendiri atau dimodifikasi dari alat LWD lapangan.
4. Tinggi jatuh alat LWD laboratorium yang digunakan yaitu sebesar 49,5 cm.
5. Penelitian ini menggunakan campuran HRS-WC konvensional sebagai campuran beraspal yang diuji dengan menggunakan alat LWD, Marshall dan UMATTA.
6. Lama perendaman air yang digunakan dalam penelitian ini adalah 30, 60 dan 90 menit.
7. Penelitian ini tidak membahas tegangan yang diakibatkan oleh perubahan suhu dan pemuaian.
8. Penelitian ini hanya melihat perlakuan benda uji terhadap beban yang bekerja.

### **E. Manfaat Penelitian**

Seiring dengan tujuan yang ingin dicapai, maka manfaat yang diharapkan dari penelitian ini mencakup dalam dua aspek yaitu :

#### 1. Aspek akademis

Hasi penelitian yang ingin dicapai merupakan upaya akademik berdasarkan standar dan kaidah ilmiah. Oleh karena itu secara akademis

penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan dapat dijadikan acuan (referensi) atau landasan teoritis, khususnya yang terkait dengan hubungan antara nilai marshall Quation dan stabilitas yang dihasilkan dari alat *Marshall Test* dengan nilai modulus yang dihasilkan pada alat LWD versi laboratorium khususnya jenis perkerasan HRS-WC (*Hot Rollet Sheet Wearing Course*).

## 2. Aspek praktis

Manfaat penelitian ini tentunya diharapkan bisa mempunyai sumbangsih yang besar pada ilmu teknik sipil teristimewa Ilmu perkerasan jalan di laboratorium melalui suatu alat/instrument yang dapat menjawab keperluan data yang lebih cepat dan akurat tanpa menunggu data yang diperoleh dari lapangan.

## **F. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan disusun agar tetap terarah pada tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini. Sistematika penulisan yang dituliskan dalam penelitian ini adalah :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Dalam bab ini, berisi tentang latar belakang masalah penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian serta batasan penelitian serta sistematika penulisan. Bab ini menjelaskan permasalahan yang diamati, menjelaskan tujuan dan pentingnya hasil penelitian bagi pengembangan ilmu perkerasan jalan, ruang lingkup sebagai batasan

dalam penulisan, serta sistematika dan organisasi tentang pengenalan isi per bab dalam disertasi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang teori perkerasan lentur jalan yang terdiri dari pengertian perkerasan jalan, struktur perkerasan lentur, standar mutu perkerasan jalan, konstruksi tanah dasar, konstruksi perkerasan berbutir, konstruksi perkerasan Lentur, pengelolaan perkerasan jalan dan kerusakan pada perkerasan lentur. Selain itu, berisi tentang pengujian nilai modulus pada material aspal yang terdiri dari teori tegangan dan regangan, modulus kekakuan aspal, metode brown and brunton, metode shell bitumen, Universal Material Testing Apparatus (UMATA), *Light Weight Defloctometer* (LWD), Marshall test *Single degree of freedom* (SDOF) dan *Fast Fourier Transform*(FFT). Pemodelan yaitu pembuatan Model Alat LWD Laboratorium dan kerangka berpikir yaitu konsep dasar pengembangan alat LWD laboratorium dan hasil yang diharapkan.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metodologi penelitian, tempat dan waktu penelitian, design penelitian, instrumen penelitian dan metode analisis data.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, dijelaskan hasil-hasil yang diperoleh yang dilakukan di laboratorium, berupa prinsip kerja alat LWD laboratorium, hasil

pemeriksaan karakteristik material, rancangan campuran (*mix design*) HRS-WC, nilai modulus benda uji Marshall dengan menggunakan alat UMATTA dan berbagai hasil pengujian lendutan dengan menggunakan alat LWD lapangan, FWD dan LWD laboratorium serta hasil pengujian karakteristik Marshall.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Isu Penggunaan Alat *Light Weight Defloctometer* (LWD) Sebagai Alat untuk Mengevaluasi Struktur Perkerasan

Ada beberapa sistem jaringan jalan, salah satunya yang sangat berperan penting adalah sistem jakringan 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 pemeliharannya 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.

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 menganalisa lendutan dan elastistas pada tanah, lapisan pondasi dan lapisan campuran aspal adalah LWD (*Light-Weight Deflectometer*). Ali Ebrahimi dan Tuncer B.E. 2011. menggunakan alat LWD (*Light-Weight Deflectometer*) untuk menganalisa 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. Ch. Nageshwar Rao dkk 2008, menggunakan LWD untuk menguji elastistas tanah laterit yang telah dikupas permukaannya sedalam 30 cm. Elastisitas tanah laterit berdasarkan alat LWD adalah antara 25 MPa hingga 200 MPa.

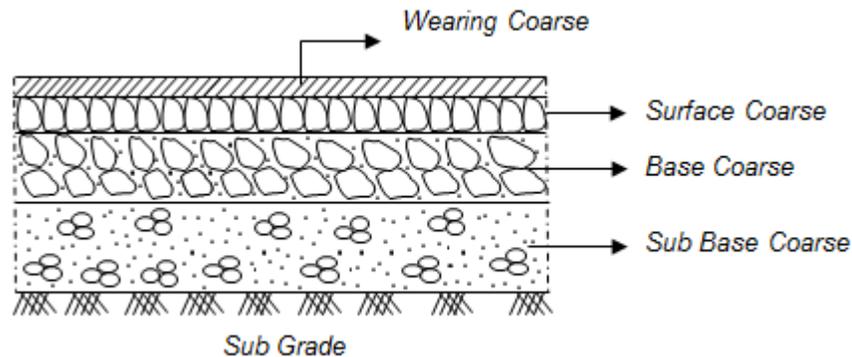
Dalam penelitian ini untuk mengetahui bagaimana tingkat kerusakan yang terjadi pada lokasi penelitian diatas berdasarkan umur rencana, maka perlu dilakukan pengamatan secara visual kemudian dilakukan analisis indeks kondisi perkerasan yaitu tingkatan dari kondisi permukaan perkerasan

yang terjadi. Analisis indeks kondisi perkerasan dilakukan dengan menggunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*) untuk mengetahui lendutan yang terjadi pada ruas tersebut.

Hal penting dalam pengelolaan sistem perkerasan jalan adalah kemampuan dalam menentukan gambaran kondisinya saat sekarang dari suatu jaringan jalan, dan memperkirakan kondisinya di masa datang. Untuk memprediksi kondisi perkerasan dengan baik, maka suatu metode penilaian untuk identifikasi harus digunakan. Sistem ini merupakan alat bagi personil penilai dalam melakukan penilaian kerusakan perkerasan. Sistem atau metode penilaian kondisi perkerasan yang terdiri dari Metode Dirgolaksono Mochtar dan metode Bina Marga. Metode ini sering digunakan untuk menilai kondisi perkerasan jalan. Namun pada saat ini, biasa digunakan alat LWD (*Light Weight Deflectometer*) untuk mengetahui besarnya lendutan yang terjadi pada perkerasan jalan.

## **B. Perkerasan Lentur Jalan**

Perkerasan lentur merupakan perkerasan yang dibangun di atas tanah dasar (*subgrade*) dimana tanah dasar tersebut harus mempunyai daya dukung yang memadai untuk menahan gaya-gaya akibat beban kendaraan yang lewat di atasnya. Susunan struktur lapisan perkerasan lentur jalan dari bagian atas ke bawah di tunjukan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Struktur perkerasan lentur (Ali N. dkk., 2010)

Standar adalah dokumen yang berisi ketentuan teknis dari sebuah produk, metode, proses atau sistem, yang dirumuskan secara konsensus dan ditetapkan oleh instansi yang berwenang (Haryono, 2005). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 102 Tahun 2000 menyebutkan bahwa standar adalah spesifikasi teknis yang dibakukan termasuk tata cara dan metode yang disusun berdasarkan konsensus semua pihak yang terkait dengan memperhatikan syarat-syarat keselamatan, keamanan, kesehatan, lingkungan hidup, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta pengalaman, perkembangan masa kini dan masa yang akan datang untuk memperoleh manfaat yang sebesar-besarnya.

Jahren & Federle (1999) mendefinisikan mutu dalam dua hal: (i) pemenuhan terhadap tuntutan dari pelanggan; dan (ii) suatu produk atau jasa yang bebas dari kekurangan. Berdasarkan definisi tersebut, mutu terkait dalam suatu sistem, program, atau proyek yang memiliki elemen-elemen *input*, *proses*, *output*, *outcome* dan *impact* dari suatu program.

Didalam perkembangannya, Balitbang Departemen Kimpraswil (2002) telah menyusun standar peraturan dalam bentuk NSPM (Norma, Standar, Pedoman, Manual) bidang konstruksi dan bangunan sebagai standar yang diterapkan dalam pekerjaan pembangunan dan pemeliharaan prasarana dan sarana kimpraswil bagi masyarakat, NSPM dikelompokkan menjadi 2 (dua) bagian, yaitu: (i) metode, spesifikasi dan tatacara yang ditetapkan oleh BSN (Badan Standardisasi Nasional); dan (ii) pedoman/petunjuk teknis dan manual yang disahkan oleh Menteri Kimpraswil.

Corhran (2002) menyatakan bahwa pengendalian mutu produk dan evaluasi industri jasa konstruksi diperlukan peranan kinerja sumber daya yang optimal dan komprehensif, yang meliputi manusia, peralatan, bahan.

Bapekin (2004) menyatakan bahwa pemberlakuan standar mutu konstruksi dipengaruhi oleh bagaimana bentuk/tipe standar mutu mudah dipahami dan disiapkan di lapangan, misalnya sistem komunikasinya, dilengkapi manual atau tidak. Langkah awal yang harus ditindaklanjuti dalam sistem manajemen mutu adalah pemahaman substansi standar mutu (Singh & Shoura, 1999; Mc Cambridge & Tucker, 1998). Pemahaman substansi standar memerlukan peningkatan pendidikan pengendali mutu, dukungan laboratorium (peralatan uji), kemudahan mendapatkan material uji dan buku standar.

Aspek-aspek yang mempengaruhi persiapan implementasi sistem mutu konstruksi di lapangan, adalah: (i) kualitas sumber daya manusia, instrumen,

kelembagaan dan legalisasi standar (Martin, 1993; Inokuma, 2002; Henry, 2002; Harris & Mc Caffer, 2001; Porter, 1998); (ii) peralatan dan obyek penelitian (Hecker, 1997; Porter, 1998); dan (iii) akurasi peralatan dan suplai material (Kini, 1999; Kessides, 1994; Kasi, 1995).

Salah satu faktor yang menjadi kendala lapangan dalam implementasi standar mutu adalah peran aktif kelembagaan yang belum optimal, pendidikan sumber daya manusia yang masih rendah, biaya perawatan peralatan uji yang masih rendah dan ketidakjelasan manual; hal ini terutama terjadi di negara sedang berkembang (Kubal, 1996; Kumar, 2000). Keandalan alat, manual alat, dan spesifikasi alat juga merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi pemberlakuan standar mutu (Kini, 1999). Beberapa penyimpangan yang sering terjadi dalam pemberlakuan standar mutu perkerasan jalan (Mulyono & Riyanto, 2005) adalah: (i) penyimpangan terhadap metode pelaksanaan; (ii) penyimpangan terhadap perencanaan; (iii) penyimpangan terhadap spesifikasi teknis material; dan (iv) penyimpangan terhadap metode pengujian mutu.

Sjahdanulirwan (2006) menyatakan bahwa jenis kerusakan struktural dini yang sering terjadi pada perkerasan lentur jalan adalah : (i) jalan ambles; (ii) permukaan jalan mengalami retak (*cracking*); (iii) permukaan jalan berlubang (*potholes*); (iv) permukaan jalan beralur bekas roda kendaraan (*rutting*); dan (v) pelepasan butiran agregat pada permukaan jalan (*ravelling*).

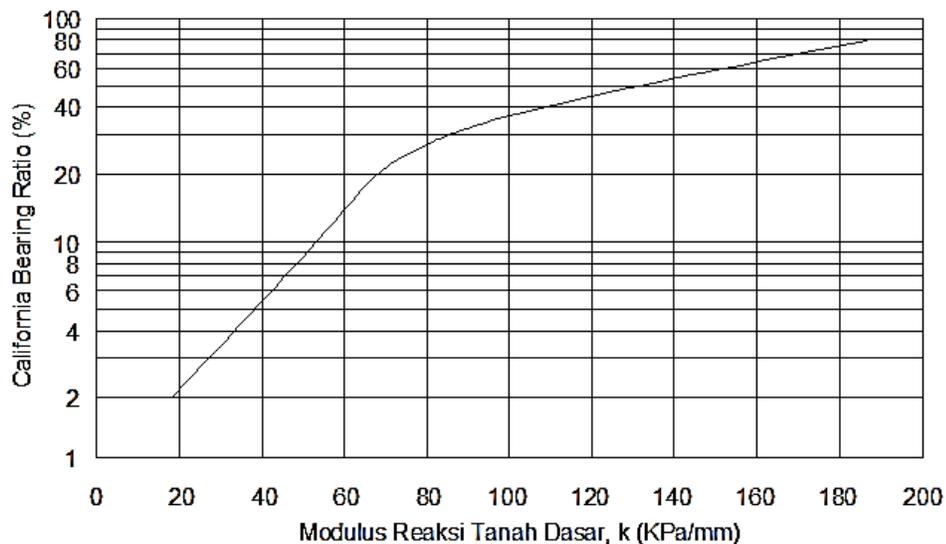
## 1. Konstruksi Tanah Dasar

Tanah dasar adalah permukaan tanah semula atau permukaan tanah galian atau tanah permukaan timbunan yang dipadatkan dan merupakan permukaan dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan yang lainnya. Kekuatan dan keawetan konstruksi perkerasan jalan tergantung dari sifat-sifat daya dukung tanah.

Umumnya permasalahan yang terjadi menyangkut tanah dasar berupa perubahan bentuk tetap, sifat mengembang dan daya dukung tidak merata. Bahan *subgrade* akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah dasar tersebut.

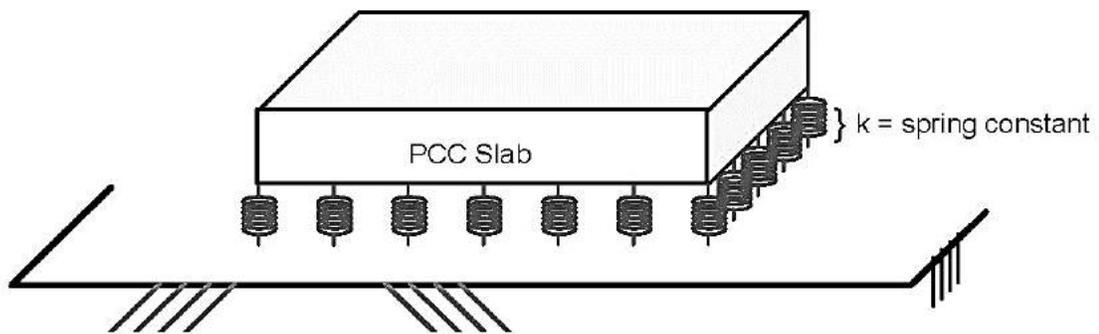
### a. Modulus reaksi tanah

Hubungan antara CBR dan modulus reaksi tanah dapat dilihat pada Gambar 2.

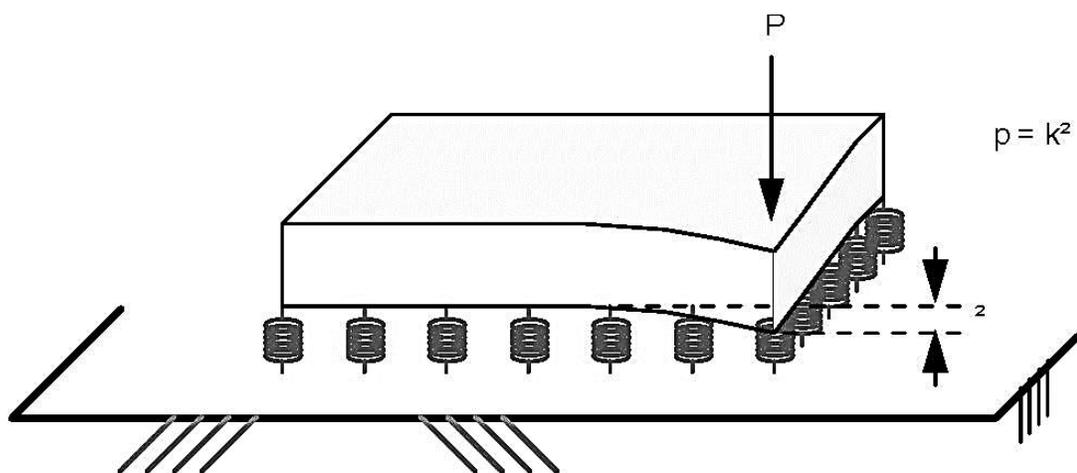


**Gambar 2.** Hubungan antara CBR dengan modulus reaksi tanah dasar (Pd T-14-2003)

Kekuatan tanah dasar pada struktur perkerasan kaku dinyatakan dengan modulus reaksi tanah ( $k$ ). Daya dukung atau kapasitas dasar pada konstruksi perkerasan kaku yang umum digunakan adalah CBR yang nilainya dikorelasikan menjadi modulus reaksi tanah dasar ( $k$ ). Modulus reaksi tanah dasar merupakan estimasi kapasitas daya dukung lapisan di bawah pelat beton pada struktur perkerasan kaku atau rigid pavement.



**Gambar 3.** Modulus reaksi tanah dasar Westergaard (Zhou, 2006)

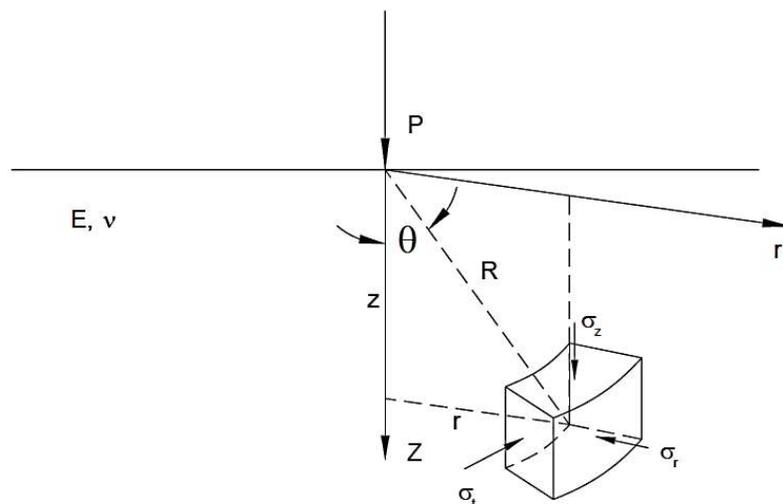


**Gambar 4.** Defleksi pelat beton yang dibebani (Zhou, 2006)

Modulus reaksi tanah dasar awalnya dikembangkan oleh Westergaard pada tahun 1920 yang menyatakan nilai  $k$  sebagai konstanta pegas pada model dukungan atau tumpuan di bawah pelat beton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Tekanan reaktif untuk melawan beban sebanding dengan deformasi pada pegas dan nilai  $k$  sebagaimana yang di tunjukan pada Gambar 4.

b. Tegangan pada subgrade

Boussinesq merupakan orang pertama yang menguji respon perkerasan terhadap beban. Serangkaian persamaan dibuat oleh Boussinesq untuk menentukan tegangan, regangan dan deformasi dalam media yang bersifat homogen, isotropik, elastis linier dengan modulus elastisitas ( $E$ ), dan poisson ratio ( $\mu$ ) sebagai akibat dari beban terpusat statis pada permukaan perkerasan (Tu, W., 2007).



**Gambar 5.** Sistem sumbu koordinat untuk persamaan Boussinesq (Tu, W, 2007)

Gambar 5 memperlihatkan notasi sumbu koordinat untuk persamaan Boussinesq dimana  $z$  adalah kedalaman dan  $r$  adalah jarak radial dari beban terpusat. Model sistem satu lapis ini merupakan cara yang paling sederhana untuk memodelkan struktur perkerasan seperti yang ditunjukkan Gambar 5. Beberapa persamaan Boussinesq ditunjukkan pada persamaan di bawah ini, dimana:

$$R = \sqrt{z^2 + r^2} \dots \dots \dots (1)$$

Tegangan normal :

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \theta \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left[ 3\cos\theta \sin^2\theta - \frac{1-2\mu}{1+\cos\theta} \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$\sigma_t = \frac{(1-2\mu)P}{2\pi R^2} \left[ -\cos\theta + \frac{1}{1+\cos\theta} \right] \dots \dots \dots (4)$$

Tegangan geser :

$$\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^2\theta \sin\theta \dots \dots \dots (5)$$

$$\tau_{rt} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

$$\tau_{tz} = 0 \dots \dots \dots (7)$$

Regangan normal :

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\mu)P}{2\pi R^2 E} [3\cos^3\theta - 2\mu\cos\theta] \dots \dots \dots (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\mu)P}{2\pi R^2 E} \left[ -3\cos^3\theta + (3 - 2\mu)\cos\theta - \frac{1-2\mu}{1+\cos\theta} \right] \dots \dots \dots (9)$$

$$\varepsilon_t = \frac{(1+\mu)P}{2\pi R^2 E} \left[ -\cos\theta + \frac{1-2\mu}{1+\cos\theta} \right] \dots\dots\dots(10)$$

*Displacements :*

$$dz = \frac{(1+\mu)P}{2\pi RE} [2(1-\mu) + \cos^2\theta] \dots\dots\dots(11)$$

$$dr = \frac{(1+\mu)P}{2\pi RE} \left[ \cos\theta \sin\theta - \frac{(1-2\mu)\sin\theta}{1+\cos\theta} \right] \dots\dots\dots(12)$$

$$dt = 0 \dots\dots\dots(13)$$

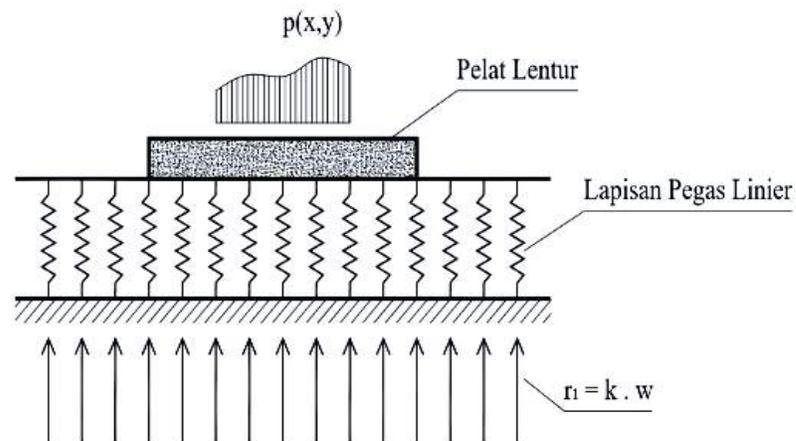
Sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan di atas, modulus elastisitas tidak memiliki pengaruh pada tegangan dan regangan normal serta tegangan geser. persamaan Boussinesq awalnya dikembangkan untuk beban statik terpusat dan selanjutnya persamaan Boussinesq dikembangkan oleh para peneliti dengan beban terbagi rata. Yoder dan Witczak (1975) menyarankan bahwa teori Boussinesq dapat digunakan untuk memperkirakan tegangan, regangan dan lendutan pada subgrade ketika modulus pada lapis pondasi (*base*) hampir sama dengan nilai modulus subgrade. Modulus permukaan perkerasan dihitung dengan menggunakan pengukuran lendutan permukaan berdasarkan persamaan Boussinesq, persamaannya dapat digunakan sebagai sebuah indikator menyeluruh dari kekakuan perkerasan (Ullidtz,1998). Ukuran kekakuan dari sebuah material yaitu berupa modulus elastisitas yang dapat digunakan untuk menunjukkan nilai fleksibilitas dari suatu perkerasan. Modulus elastisitas didapatkan dari hubungan tegangan dan regangan dari suatu material.

c. *California Bearing Ratio (CBR)*

Daya dukung tanah dasar untuk struktur perkerasan kaku ditentukan dengan pengujian CBR insitu sesuai dengan SNI 03-1731-1989 atau CBR laboratorium sesuai dengan SNI 03-1744-1989. Apabila tanah dasar mempunyai CBR lebih kecil dari 2%, maka harus ditambahkan pondasi bawah yang terbuat beton kurus (*lean mix-concrete*) setebal 15 cm yang dianggap mempunyai CBR tanah dasar efektif 5%.

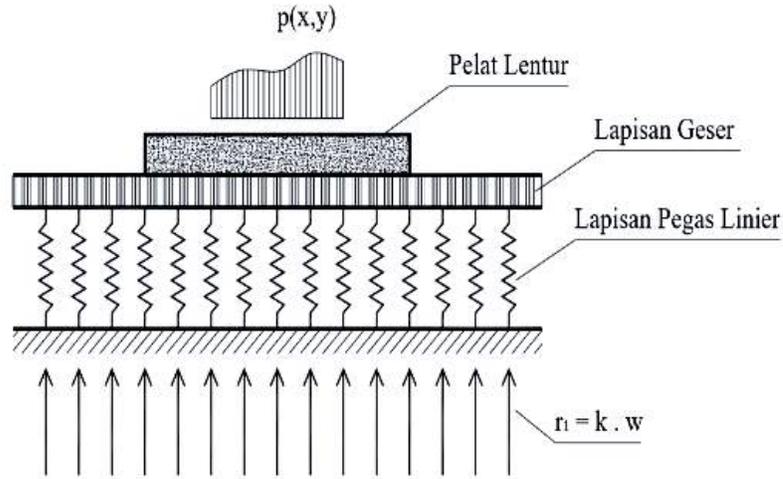
d. Teori Winklar dan Pasternak

Untuk memodelkan tanah dibawah pelat, berbagai macam model dapat digunakan salah satunya adalah model Theory Winkler-Pasternak. Gambar 6 dan Gambar 7 masing-masing memperlihatkan ilustrasi dari teori Winkler dan teori Pasternak. Persamaan 14 dan 15 masing-masing memperlihatkan rumus dari teori Winkler dan Pasternak. Persamaan ini dapat diaplikasikan untuk model pelat lentur.



**Gambar 6.** Ilustrasi teori Winklar

$$D_x \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) + 2.B. \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + D_y \left( \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + r_1 = -P_z(x,y) \dots \dots \dots (14)$$



**Gambar 7.** Ilustrasi teori Pasternak

$$D_x \left( \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} \right) + 2.B. \left( \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + D_y \left( \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} \right) + \rho \cdot h \cdot \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial t^2} + \gamma \cdot h \cdot \frac{\partial w(x,y,t)}{\partial t} + k \cdot w(x,y,t) - G \cdot \left( \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial y^2} \right) = p_z(x,y,t) \dots \dots \dots (15)$$

Dimana:

$D_x$  = Kekakuan lentur (flexural rigidity) pelat ortotropik arah sumbu x

$$D_x = \frac{h^3}{12} \cdot \left( \frac{E_x}{1 - \nu_x \nu_y} \right)$$

$D_y$  = Kekakuan lentur (flexural rigidity) pelat ortotropik arah sumbu y

$$D_y = \frac{h^3}{12} \cdot \left( \frac{E_y}{1 - \nu_x \nu_y} \right)$$

$B$  = Kekakuan puntir (torsional rigidity) pelat ortotropik

$$B = \sqrt{D_x D_y}$$

$E_x$  = Modulus elastisitas pelat arah x

$E_y$  = Modulus elastisitas pelat arah y

$\nu_x$  = Poisson's ratio arah x

$\nu_y$  = Poisson's ratio arah y

$\nu_z$  = Poisson's ratio arah z

$\rho$  = Massa jenis

$h$  = Tebal pelat

$\gamma$  = Koefisien redaman

$w(x,y,t)$  = fungsi lendutan yang tergantung pada fungsi posisi dan fungsi waktu

$p_z(x,y,t)$  = fungsi beban transversal arah z yang tergantung pada fungsi posisi dan fungsi waktu

$N_x$  = Beban in-plane arah x

$N_y$  = Beban in-plane arah y

$r_{if}$  = Rasio beban in-plane

$k$  = Kekakuan pegas Pondasi Pasternak

$G_s$  = Kekakuan geser Pondasi Pasternak

Beban transversal  $p(x,y,t)$  didefinisikan sebagai beban kendaraan yang bergerak dengan kecepatan konstan pada arah x dengan posisi arah y yang selalu sama ( $b/2$ ) dapat diekspresikan pada persamaan 16.

$$p(x,y,t) = P_0(1 + \alpha \cos \omega t) \delta[x - x(t)]\delta[y - y(t)] \dots\dots\dots(16)$$

Dimana :

$P_0$  = amplitudo dari beban

$x(t), y(t)$  = fungsi posisi dari beban di arah x dan y

$\alpha$  = koefisien beban

$\omega$  = frekuensi dari kendaraan

Model untuk persamaan keseimbangan arah vertikal :

$$C_1 \cdot w - C_2 \cdot \Delta w = f_z \dots \dots \dots (17)$$

Dimana:

$C_1, C_2$  = parameter dari Winkler – Pasternak

$W$  = defleksi secara vertikal.

$f_z$  = Beban Vertikal yang bekerja pada suatu lapisan

Konstanta Winkler-Pasternak  $c_1$  dan  $c_2$  dihitung dari kondisi matriks kepatuhan yang sama dari pijakan strip tak terbatas yang kaku tak terhingga pada lapisan bawah tanah winkler-pasternak dan elastis. Kondisi ini diwakili oleh persamaan 19.

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2[\sqrt{C_1 W F C_2 W F + b C_1 W F}]} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2[b^2 \sqrt{C_1 W F C_2 W F + b C_2 W F + \frac{b^3}{3} C_1 W F}]} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^n \frac{1}{2\sqrt{H[(2n+1)\sqrt{C_1 W C_2 W} + (2n+1)^2 b C_1 W]}} & 0 \\ 0 & \sum_{n=0}^n \frac{1}{2\sqrt{H[(2n+1)b^2 \sqrt{C_1 W C_2 W} + b C_2 W + (2n+1)^2 \frac{b^3}{3} C_1 W]}} \end{bmatrix}$$

Dimana :

[C] = Matriks Konstanta C1 dan C2

B = Setengah lebar pondasi

$C_{1W}$

= Konstanta Winkler

$C_{2W}$

H = Kedalaman zona deformasi.

## 2. Konstruksi Perkerasan Berbutir

Bahan dasar dari perkerasan, umumnya berupa material granuler yang terdiri dari kerikil atau batu pecah yang mempunyai gradasi tertentu, sehingga membentuk material yang stabil, mudah dikerjakan dan dipadatkan. Lapis pondasi adalah bagian dari perkerasan yang letaknya tepat di bawah lapis permukaan. Lapis pondasi diletakkan di atas lapis pondasi bawah atau jika tanpa lapis pondasi bawah, maka letaknya langsung di atas tanah dasar. Lapis pondasi mendukung beban yang berat, sehingga merupakan bagian perkerasan yang penting.

Persyaratan material lapis pondasi lebih ketat dibandingkan dengan persyaratan lapis pondasi bawah atau tanah dasar. Material lapis pondasi (base course) untuk perkerasan lentur didasarkan pada pertimbangan ekonomis, antara lain :

- a. Kerikil pecah atau tak dipecah
- b. Batu pecah bergradasi
- c. Makadam

- d. Batu kapur
- e. Koral
- f. Terak (*slag*)

Bahan-bahan lapis pondasi harus cukup kuat dan awet, sehingga dapat menahan beban-beban yang bekerja padanya. Oleh karena itu, sebelum menentukan bahan-bahan untuk lapis pondasi, maka perlu dilakukan pengujian bahan. Untuk beban lalu lintas tinggi, material lapis pondasi juga sering distabilisasi dengan aspal, semen, kapur, kalsium klorida, sodium klorida dan abu terbang (*fly ash*).

Material lapis pondasi harus menyediakan karakteristik drainase dan stabilitas yang baik. Tebal lapis pondasi bergantung pada sifat-sifat lapisan di bawahnya. Material lapis pondasi umumnya dihamparkan sampai di bawah bahu jalan dan kereb. Lapis pondasi, tidak hanya melayani beban lalu lintas, namun juga harus memberikan lapis drainase yang lancar jika lapis permukaan kemasukan air dari permukaan. Bagian lapis pondasi yang berada di bawah bahu jalan, agar bisa memberikan aliran drainase yang kontinyu, sering dibuatkan saluran drainase bawah permukaan yang arahnya sejajar dengan sumbu jalan.

Kriteria kekuatan lapis pondasi (*base*) dan lapis pondasi bawah (*subbase*) biasanya didasarkan pada nilai CBR atau nilai-R (*R-value*). Untuk memperoleh karakteristik tegangan-regangan (modulus elastisitas), maka nilainya dapat ditentukan dari uji tiaksial dengan beban berulang.

Menurut SNI 1732-1989-F dan Pt T-01-2002-B, macam-macam bahan alam yang mempunyai  $CBR \geq 50\%$  dan indeks plastisitas ( $PI \leq 4$ ) dapat digunakan untuk lapis pondasi, contohnya : batu pecah, kerikil pecah dan tanah yang telah distabilisasi dengan bahan tertentu seperti semen atau kapur. Sedangkan DPU (2005) mensyaratkan lapis pondasi mempunyai CBR antara 65-95% (bergantung pada klasifikasinya) dan  $PI \leq 5$ .

### **C. Pengukuran Gelombang Atau Getaran**

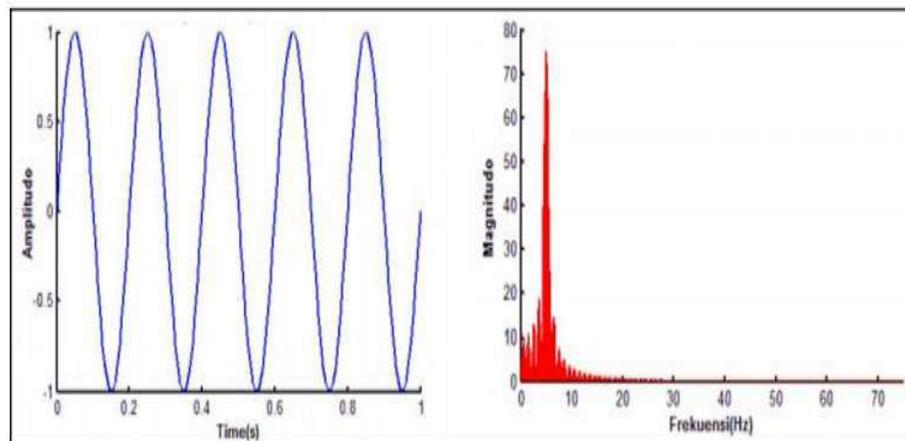
Pengukuran getaran yang banyak dilakukan sekarang bersifat kontak langsung, artinya instrumen yang digunakan untuk melakukan pengukuran harus melakukan kontak langsung dengan benda yang akan diamati. Hal ini menimbulkan banyak masalah, terutama apabila benda berada didalam dan tidak dapat kontak langsung oleh instrument. Untuk mengatasi masalah pengukuran getaran benda yang tidak dapat kontak langsung dengan instrumen digunakan metode pengukuran getaran tanpa kontak langsung dengan objek. Metode uji ini disebut pengujian tidak merusak atau Non Destructive Testing (NDT). Aktivitas tes atau inspeksi dengan NTD digunakan untuk mengetahui adanya cacat, retak atau discontinuity benda tanpa merusak benda yang di tes atau inspeksi. Perkembangan ilmu pengetahuan & teknologi terutama di bidang elektronika menyebabkan banyak aplikasi elektronika yang dapat diprogram secara otomatis. Komponen elektronika cerdas yang banyak digunakan dalam aplikasi sistem otomatis adalah

mikrokontroler. Dalam komponen mikrokontroler terdapat prosesor dan memori. Prosesor berfungsi untuk pengolahan data dan memori berfungsi sebagai menyimpan data. Sehingga dengan perangkat mikrokontroler dapat dibuat sistem getar dengan waktu getaran yang dapat di program.

### **1. Domain Waktu dan Domain Frekuensi**

Domain waktu dan domain frekuensi merupakan dua jenis mode yang sering digunakan dalam proses analisis data. Pada domain waktu, ketika diplot salah satu sumbu dengan variabel waktu maka variabel lainnya adalah amplitudo. Sinyal domain waktu berupa gelombang berjalan yang direpresentasikan pada waktu terhadap amplitudo dari sinyal. Amplitudo pada sinyal domain waktu menunjukkan keras lemahnya sinyal yang diterima. Sehingga, sinyal yang diterima tidak memiliki karakteristik yang berbeda tiap waktunya. Pada sinyal domain frekuensi, ketika diplot berupa spektrum dengan penyajian frekuensi terhadap magnitudo. Spektrum frekuensi sinyal pada dasarnya adalah komponen frekuensi (spektral frekuensi) sinyal yang menunjukkan frekuensi apa yang muncul. Frekuensi menunjukkan tingkat perubahan. Jika suatu variabel sering berubah, maka disebut berfrekuensi tinggi. Namun, jika tidak sering berubah, maka disebut berfrekuensi rendah. Jika variabel tersebut tidak berubah sama sekali, maka disebut tidak mempunyai frekuensi (nol frekuensi). Magnitudo pada sinyal domain frekuensi menunjukkan tinggi rendahnya sinyal yang diterima. Contoh hasil plot sinyal ke domain waktu dan domain frekuensi dapat dilihat pada Gambar

8. Kedua mode analisis ini sudah digunakan secara luas pada bidang elektronik, musik, telekomunikasi, dan sebagainya. Analisis pada domain frekuensi digunakan apabila prosesnya membutuhkan filtering, amplifying, dan mixing, sedangkan analisis pada domain waktu akan memberikan hasil kebiasaan dari sinyal terhadap variable waktu, dimana analisis pada domain waktu memungkinkan untuk melakukan prediksi dan model regresi terhadap sinyal. Analisis pada domain waktu merupakan proses menganalisis data terhadap periode waktu tertentu. Domain frekuensi juga dapat digunakan dalam proses menganalisis data. Namun analisis yang dilakukan pada domain frekuensi merupakan proses untuk menganalisis fungsi matematika atau sinyal mengenai frekuensi. Analisis pada domain frekuensi lebih banyak digunakan terhadap sinyal atau fungsi yang bersifat periodik terhadap waktu. Salah satu konsep terpenting dari analisis pada domain frekuensi adalah transformasi.



**Gambar 8.** Kiri : domain waktu suatu sinyal, **kanan** : domain frekuensi suatu sinyal

Proses transformasi digunakan untuk mengubah fungsi pada domain waktu ke dalam fungsi pada domain frekuensi atau sebaliknya. Salah satu transformasi yang sering digunakan adalah transformasi Fourier. Transformasi Fourier digunakan untuk mengubah sinyal dari berbagai bentuk kedalam sejumlah gelombang sinusoidal tak terbatas.

## **2. Frekuensi Dasar, Frekuensi Harmoni dan Overtone**

Sinyal asli memiliki berbagai frekuensi, amplitudo yang berbeda. Ada dua jenis frekuensi yang dimiliki oleh suatu sinyal, antara lain frekuensi dasar dan frekuensi harmoni. Frekuensi dasar adalah frekuensi terendah dari suatu gelombang periodik. Frekuensi harmoni merupakan bagian frekuensi dari sinyal yang berupa kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar (Jeremy, 2002).

Overtone merupakan frekuensi-frekuensi natural yang bernilai di atas frekuensi dasar. Perbedaan overtone dengan harmoni adalah frekuensi harmoni sudah pasti overtone, tapi overtone belum tentu harmoni. Overtone adalah frekuensi-frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi dasar yang belum tentu berkelipatan bulat, jadi segala frekuensi di atas bilangan bulat adalah overtone. Namun, frekuensi harmoni adalah frekuensi-frekuensi yang bernilai di atas frekuensi dasar yang berkelipatan bulat. Jadi, untuk menentukan nilai frekuensi dasar dari sebuah gelombang dapat digunakan konsep overtone dari frekuensi harmoni dari gelombang tersebut dengan cara membagi nilai dari frekuensi harmoni dengan bilangan bulat positif.

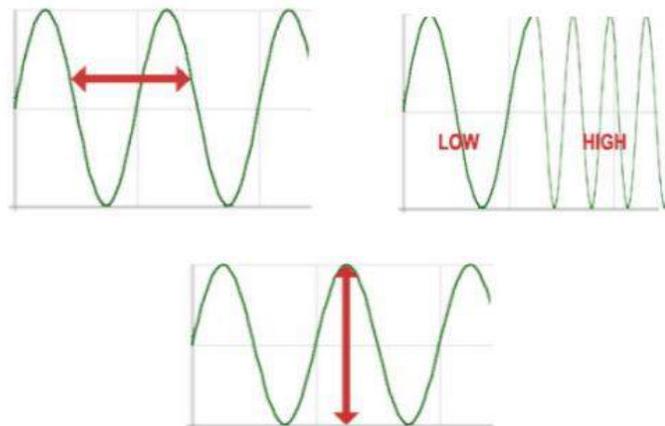
### **3. Teori Sinyal**

Sinyal adalah suatu isyarat untuk melanjutkan atau meneruskan suatu kegiatan. Biasanya isyarat ini berbentuk tanda-tanda, lampu-lampu, suara-suara, dan lain-lain. Dalam kereta api, misalnya, isyarat berarti suatu tanda untuk melanjutkan atau meneruskan perjalanan ke tempat/stasiun berikutnya, dan biasanya isyarat ini dikirimkan oleh stasiun yang terkait. Dalam dunia Keteknikan, khususnya Teknik Elektro, Teknik Informasi, dan Teknik Kendali, isyarat adalah besaran yang berubah dalam waktu dan atau dalam ruang dan membawa suatu informasi. Menurut ITU (International Telecommunication Union), sinyal adalah suatu gejala fisika dimana satu atau lebih dari karakteristiknya melambangkan informasi. Sinyal ini biasanya berupa sinyal elektrik. Sinyal ini bisa merupakan besaran elektrik murni (tegangan, arus, dan lain-lain), tetapi pada umumnya adalah besaran fisik lain yang dijadikan elektrik dengan bantuan sensor. Contoh sinyal elektrik adalah sinyal suara yang berasal dari radio, sinyal citra yang berasal dari kamera fotografi, dan sinyal video yang berasal dari kamera video.

#### **a. Sinyal Suara**

Audio diartikan sebagai suara atau reproduksi suara. Gelombang suara adalah gelombang yang dihasilkan dari sebuah benda yang bergetar. Gambarnya adalah senar gitar yang dipetik, gitar akan bergetar dan getaran ini merambat di udara, atau air, atau material lainnya. Satu-satunya tempat dimana suara tak dapat merambat adalah ruangan hampa udara.

Gelombang suara ini memiliki lembah dan bukit, satu buah lembah dan bukit akan menghasilkan satu siklus atau periode. Siklus ini berlangsung berulang-ulang, yang membawa pada konsep frekuensi. Jelasnya, frekuensi adalah jumlah dari siklus yang terjadi dalam satu detik. Satuan dari frekuensi adalah Hertz atau disingkat Hz. Telinga manusia dapat mendengar bunyi antara 20 Hz hingga 20 KHz (20.000 Hz) sesuai dengan batasan sinyal suara. Karena pada dasarnya sinyal suara adalah sinyal yang dapat diterima oleh telinga manusia. Angka 20 Hz sebagai frekuensi suara terendah yang dapat didengar, sedangkan 20 KHz merupakan frekuensi tertinggi yang dapat didengar.



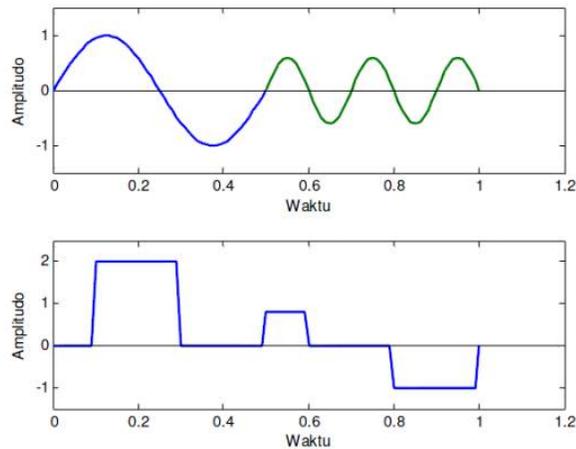
**Gambar 9.** Panjang Gelombang, Frekuensi dan Amplitudo

Panjang gelombang merupakan jarak antara titik gelombang dan titik ekuivalen pada fasa berikutnya. Amplitudo merupakan kekuatan atau daya gelombang sinyal. Gelombang yang lebih tinggi diinterpretasikan sebagai gelombang yang lebih tinggi, sehingga dinamakan ampliflier untuk perangkat

yang berfungsi untuk menambah amplitudo. Frekuensi merupakan jumlah getaran dalam waktu satu detik. Diukur dalam Hertz atau siklus per detik. Getaran gelombang suara semakin cepat, maka frekuensi semakin tinggi. Frekuensi lebih tinggi diinterpretasikan sebagai jalur yang lebih tinggi. Misalnya, bila menyanyi dalam pita suara tinggi, maka memaksa tali suara untuk bergetar secara cepat. Panjang gelombang, amplitudo, dan frekuensi digambarkan pada Gambar 9.

#### **b. Sinyal dan Sistem**

Sinyal adalah fenomena dari lingkungan yang terukur atau terkuantisasi, sementara sistem merupakan bagian dari lingkungan yang menghubungkan sinyal dengan sinyal lainnya, atau dengan kata lain merespon sinyal masuk dengan menghasilkan sinyal keluaran. Ada berbagai macam contoh sinyal dan sistem, salah satunya adalah suara pembicaraan dan sistem komunikasi telepon. Berdasarkan bentuknya, data dan sinyal dapat dibedakan ke dalam data dan sinyal analog atau data dan sinyal digital (Gambar 10). Suatu data atau sinyal dikatakan analog apabila amplitudo dari data atau sinyal tersebut terus menerus ada dalam rentang waktu tertentu (kontinyu) dan memiliki variasi nilai amplitudo tak terbatas. Misalnya, data yang berasal dari suara (voice) tergolong sebagai data analog. Sebaliknya data atau sinyal dikatakan digital apabila amplitudo dari data atau sinyal tersebut tidak kontinyu dan memiliki variasi nilai amplitudo yang terbatas (diskrit).



**Gambar 10.** Sinyal analog (atas) dan Sinyal digital (bawah)

### c. Menganalisis Sinyal

Proses penting dalam Digital Signal Processing (DSP) adalah menganalisis suatu sinyal input maupun output untuk mengetahui karakteristik sistem fisis tertentu. Proses analisis dan sintesis dalam domain waktu memerlukan analisis cukup panjang dengan melibatkan turunan dari fungsi, yang dapat menimbulkan ketidaktepatan hasil analisis. Analisis dan sintesis sinyal akan lebih mudah dilakukan pada domain frekuensi, karena besaran yang paling menentukan suatu sinyal adalah frekuensi. Oleh karena itu, untuk dapat bekerja pada domain frekuensi dibutuhkan suatu formulasi yang tepat sehingga proses manipulasi sinyal sesuai dengan kenyataan. Salah satu formulasi yang ampuh untuk proses pengolahan sinyal adalah menggunakan Discrete Fourier Transform (DFT). Prinsip DFT adalah mentransformasikan (alih bentuk) sinyal yang semula analog menjadi diskret dalam domain waktu, dan kemudian diubah ke dalam domain frekuensi. Hal

ini dilakukan dengan mengalikan sinyal diskret dengan suatu fungsi kernel. Algoritma lain yang lebih cepat adalah Fast Fourier Transform (FFT). Prinsip kerja FFT adalah membagi sinyal hasil penyamplingan menjadi beberapa bagian yang kemudian masing-masing bagian diselesaikan dengan algoritma yang sama dan hasilnya dikumpulkan kembali. Ada tiga kelas FFT yang umum digunakan di dalam suatu software DSP yaitu Decimation in Time (DIT), Decimation in Frequency (DIF) dan Split Radix. Ide ketiga jenis FFT tersebut adalah proses iterasi sequence data dilakukan secara berbeda dan memanfaatkan fungsi kernel yang memiliki sifat yang simetris pada suatu nilai tertentu dalam satu periode suatu sinyal. Jenis lain FFT yang sudah digunakan adalah paralel FFT dimana sequence data dikerjakan dengan menggunakan parallel computing sehingga proses transformasi akan lebih cepat.

Fast Fourier Transform (FFT) yang ditemukan tahun 1965 merupakan pengembangan dari Fourier Transform (FT). Penemu FT adalah J. Fourier pada tahun 1822. FT membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. Definisi Fast Fourier Transform (FFT) adalah metode yang sangat efisien untuk menghitung koefisien dari Fourier diskrit ke suatu finite sekuen dari data yang kompleks. Karena substansi waktu yang tersimpan lebih dari pada metoda konvensional, fast fourier transform merupakan aplikasi temuan yang penting didalam sejumlah bidang yang berbeda seperti analisis spectrum, speech

and optical signal processing, design filter digital. Algoritma FFT berdasarkan atas prinsip pokok dekomposisi perhitungan discrete fourier transform dari suatu sekuen sepanjang N kedalam transformasi diskrit Fourier secara berturut-turut lebih kecil. Cara prinsip ini diterapkan memimpin ke arah suatu variasi dari algoritma yang berbeda, di mana semuanya memperbandingkan peningkatan kecepatan perhitungan. Fast Fourier Transform, adalah suatu algoritma untuk menghitung transformasi fourier diskrit dengan cepat dan efisien. Karena banyak sinyal-sinyal dalam sistem komunikasi yang bersifat kontinyu, sehingga untuk kasus sinyal kontinyu kita gunakan transformasi fourier. Transformasi Fourier didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned}
 X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi ft) dt
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(18)$$

$x(t)$  = fungsi atau sinyal dalam domain waktu,

$e^{-j\pi ft}$  = Fungsi kernel

$X(f)$  = fungsi dalam domain frekuensi,

$f$  = frekuensi.

Persamaan (18) digunakan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke dalam domain frekuensi. FFT (Fast Fourier Transform) merupakan salah satu metode untuk transformasi sinyal suara dalam domain waktu menjadi sinyal dalam domain frekuensi, artinya proses perekaman

suara disimpan dalam bentuk digital berupa gelombang spectrum suara yang berbasis frekuensi sehingga lebih mudah dalam menganalisa spectrum frekuensi suara yang telah direkam. Dengan keterbatasan biaya eksekusi pada komputer, maka persamaan (18), khususnya bagian real, didekati dengan

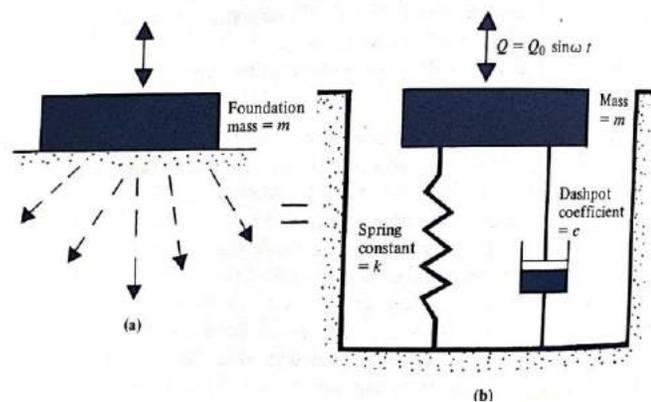
$$\begin{aligned}
 \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt &\rightarrow \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi f n \Delta t) \Delta t \\
 &= \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi m n \Delta t \Delta f) \Delta t \\
 &= \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi \frac{nm}{N}) \Delta t \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

Dalam domain waktu periode suatu sinyal dinyatakan sebagai  $T = N\Delta t$ , sedangkan pada domain frekuensi  $\Delta f = \frac{f_s}{N}$  dengan  $\Delta f$  menyatakan interval antar frekuensi dan  $f_s = \frac{1}{\Delta t} = N\Delta f$ . Dengan demikian, dalam persamaan (19)  $\Delta t \Delta f = \frac{1}{N}$ , dengan domain frekuensi. Bila jumlah data lebih kecil dari  $f_s$  maka frekuensi yang dihasilkan tidak presisi. Disisi lain  $f_s$  haruslah  $\geq 2f$  maksimum untuk menghindari aliasing frekuensi di dekat frekuensi yang dicari. Aliasing merupakan fenomena munculnya frekuensi yang sama dari hasil transformasi yang mana kita tidak bisa membedakan antara frekuensi yang asli dengan frekuensi bayangan. Pada umumnya, transformasi Fourier menggunakan alat yang disebut real-time spectrum analyzer yang telah terintegrasi dalam bentuk chip untuk menghitung sinyal diskret dalam domain waktu yang

berasal dari microphone. Untuk dapat menganalisis spektrum frekuensi, di dalam prosessor DSP disusun program Discrete Fourier Transform (DFT) (Schuler, 2003: 477).

#### D. Derajat kebebasan Tunggal (*Single degree Of Freedom*)

Untuk mengatasi masalah getaran sistem parameter terpusat, perlu diketahui dasar-dasar rekayasa getaran. Oleh karena itu, ulasan singkat tentang solusi matematika dari masalah getaran sederhana disajikan pada Gambar 11.

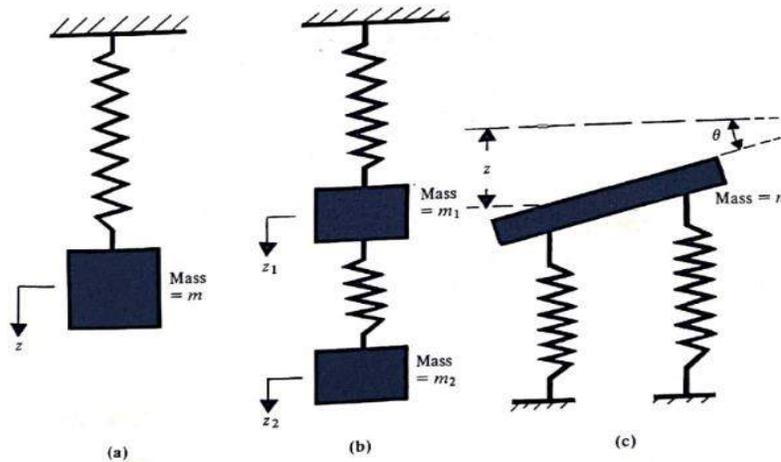


**Gambar 11.** Sistem getar parameter yang disatukan

#### 1. Defenisi Dasar

Getaran bebas adalah sistem di bawah aksi gaya yang melekat dalam sistem itu sendiri dan dengan tidak adanya gaya diluar, getaran Paksa. Gaya getaran adalah suatu sistem disebabkan oleh gaya luar. Derajat Kebebasan adalah Jumlah koordinat independen yang diperlukan untuk menggambarkan

solusi sistem getar. Sebagai contoh, posisi massa  $m$  pada Gambar 12.a dapat digambarkan dengan satu koordinat  $z$ , jadi itu adalah satu derajat dari sistem kebebasan. Pada Gambar 12.b, dua koordinat ( $z_1$  dan  $z_2$ ) diperlukan untuk menggambarkan gerakan sistem; karenanya sistem ini memiliki dua derajat kebebasan. Demikian pula, pada Gambar 12.c, diperlukan dua koordinat ( $z$  dan  $\theta$ ), dan jumlah derajat kebebasannya adalah dua.



**Gambar 12.** Derajat kebebasan untuk sistem getar

**2. Getaran Bebas dari Sistem Massa Pegas**

Gambar 13 menunjukkan fondasi yang bertumpu pada pegas. pegas mewakili sifat elastis tanah dimana beban  $W$  mewakili berat pondasi ditambah dengan yang berasal dari mesin yang disangga pondasi. Jika luas pondasi sama dengan  $A$ , intensitas beban yang ditransmisikan ke tanah dasar dapat ditentukan dengan persamaan 20.

$q = W/A \dots \dots \dots (20)$

Karena beban  $w$ , defleksi statis  $Z_s$ , dapat dikembangkan dalam persamaan,

$$k = W/z_s, \dots\dots\dots (21)$$

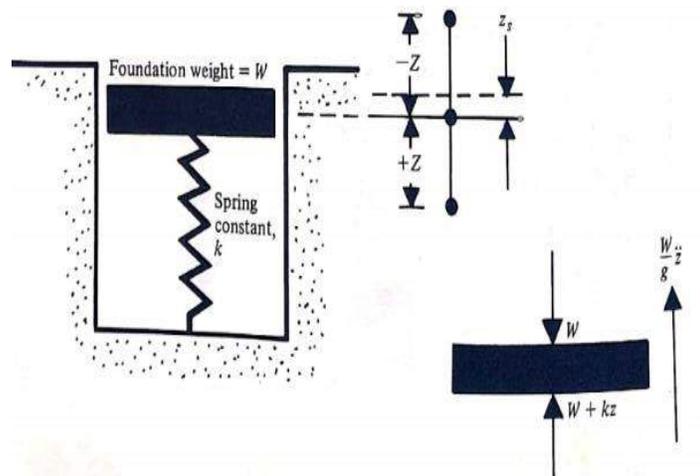
di mana  $k$  adalah konstanta musim semi untuk dukungan elastis.

Koefisien reaksi subgrade  $k_s$ , didefinisikan sebagai:

$$k = q/z_s, \dots\dots\dots (22)$$

Jika fondasi terganggu dari posisi keseimbangannya, sistem akan bergetar. Persamaan gerak fondasi ketika telah terganggu melalui jarak  $z$  dapat ditulis dari hukum gerak kedua Newton sebagai

$$(W/g) \ddot{z} + kz = 0 \dots\dots\dots (23)$$



**Gambar 13.** Getaran bebas dari sistem pegas massa

Atau

$$\ddot{z} + (k/m) z = 0 \dots\dots\dots (24)$$

di mana  $g$  adalah akselerasi karena gravitasi,  $z = d^2z/dt^2$ ,  $t$  adalah waktu, dan  $m$  adalah massa =  $W/g$  untuk memecahkan persamaan (23), menjadi

$$z = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t \dots\dots\dots(24)$$

di mana  $A_1$ , dan  $A_2$ , keduanya konstanta dan  $\omega_n$  adalah frekuensi alami circular. substitusikan persamaan (24) ke Persamaan (23) Hasilnya

$$\omega_n^2 (A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t) + \left(\frac{k}{m}\right) (A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t) = 0$$

$$\text{atau } \omega_n = \pm \sqrt{k/m} \dots\dots\dots(25)$$

Unit  $\omega$ , berada dalam radian per detik (rad /detik). Maka

$$z = A_1 \cos (\sqrt{k/m}t) + A_2 \sin (\sqrt{k/m}t) \dots\dots\dots(26)$$

Untuk menentukan nilai  $A_1$ , dan  $A_2$ , harus, mengganti kondisi batas yang tepat. Pada saat itu = 0, Perpindahan  $z = z_0$ . Dan Kecepatan =  $dz/dt = \dot{z} = v_0$ . Substitusi kondisi batas pertama dalam Persamaan (27)

$$z_0 = A_1, \dots\dots\dots (27)$$

Selanjutnya untuk Persamaan (28),

$$\dot{z} = -A_1 \sqrt{k/m} \sin (\sqrt{k/m}t) + A_2 \sqrt{k/m} \cos (\sqrt{k/m}t) \dots\dots\dots (28)$$

Substitusi kondisi batas kedua dalam persamaan (28),

$$\dot{z} = v_0 = A_2 \sqrt{k/m}$$

Atau

$$A_2 = v_0 / \sqrt{k/m} \dots \dots \dots (29)$$

Kombinasi dari persamaan (26), (27), dan (29) menjadikan

$$z = z_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + \frac{v_0}{\sqrt{k/m}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \dots \dots \dots (30)$$

selanjutnya

$$z_0 = Z \cos \alpha \dots \dots \dots (31)$$

dan

$$\frac{v_0}{\sqrt{k/m}} = Z \sin \alpha \dots \dots \dots (32)$$

Subtitusikan persamaan (31) dan (32) menjadi persamaan (30) hasilnya

$$z = Z \cos(\omega_n t - \alpha) \dots \dots \dots (33)$$

Dimana,

$$\alpha = \tan^{-1}(v_0 / z_0 \sqrt{k/m}) \dots \dots \dots (34)$$

$$Z = \sqrt{z_0^2 + v_0^2 / (k/m)} = \sqrt{z_0^2 + (m/k)v_0^2} \dots \dots \dots (35)$$

Kaitan perpindahan Pondasi yang diberikan oleh Persamaan (33) dapat diwakili secara grafis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14. Pada saat itu

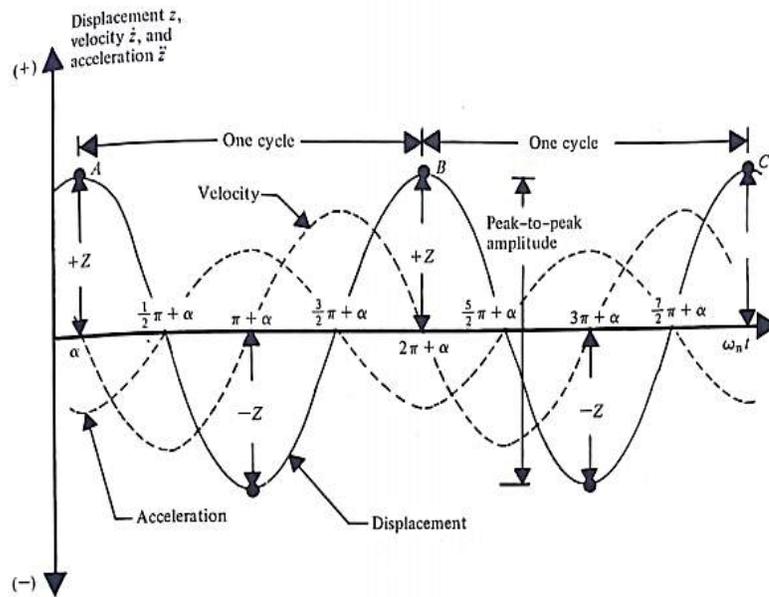
$$\begin{aligned}
 t = 0, & \quad z = Z \cos(-\alpha) & = Z \cos \alpha \\
 t = \frac{\alpha}{\omega_n}, & \quad z = Z \cos\left(\omega_n \frac{\alpha}{\omega_n} - \alpha\right) & = Z \\
 t = \frac{\frac{1}{2}\pi + \alpha}{\omega_n}, & \quad z = Z \cos\left(\omega_n \frac{\frac{1}{2}\pi + \alpha}{\omega_n} - \alpha\right) & = 0 \\
 t = \frac{\pi + \alpha}{\omega_n}, & \quad z = Z \cos\left(\omega_n \frac{\pi + \alpha}{\omega_n} - \alpha\right) & = -Z \\
 t = \frac{\frac{3}{2}\pi + \alpha}{\omega_n}, & \quad z = Z \cos\left(\omega_n \frac{\frac{3}{2}\pi + \alpha}{\omega_n} - \alpha\right) & = 0 \\
 t = \frac{2\pi + \alpha}{\omega_n}, & \quad z = Z \cos\left(\omega_n \frac{2\pi + \alpha}{\omega_n} - \alpha\right) & = Z
 \end{aligned}$$

Dari Gambar 14, dapat dilihat bahwa sifat perpindahan kekuatan adalah sinusoidal. Besarnya perpindahan maksimum sama dengan  $Z$ . Ini biasanya disebut sebagai amplitudo tunggal. Amplitudo perpindahan puncak ke puncak sama dengan  $2Z$ , yang kadang-kadang disebut sebagai amplitudo ganda. Waktu yang diperlukan agar gerakan terulang disebut sebagai periode getaran. Perhatikan bahwa, pada Gambar 14, gerakan ini berulang di titik A, B, dan C. Oleh karena itu, periode  $T$  dari gerakan ini dapat diberikan oleh

$$T = 2\pi/\omega_n \dots \dots \dots (36)$$

Frekuensi osilasi  $f$  didefinisikan sebagai jumlah siklus dalam waktu satuan, atau

$$f = 1/T = \omega_n/2\pi \dots \dots \dots (37)$$



**Gambar 14.** Perpindahan, kecepatan, dan akselerasi untuk getaran bebas dari sistem pegas massal

Catatan: kecepatan mendahului perpindahan oleh  $1/2 \pi$  rad. Kemudian akselerasi mendahului kecepatan oleh  $1/2 \pi$  rad. Hal ini telah ditunjukkan di Persamaan (25) bahwa, untuk sistem ini,  $\omega_n = \pm\sqrt{k/m}$ . Sehingga

$$f = f_n = (1/2\pi)\sqrt{k/m} \dots \dots \dots (38)$$

Istilah f, umumnya disebut sebagai frekuensi alami yang tidak tertahan. Karena  $k = W/2$ , dan  $m = W/8$ , persamaan (38) juga dapat dinyatakan sebagai

$$f_n = (1/2\pi)\sqrt{g/z_s} \dots \dots \dots (39)$$

Variasi kecepatan dan akselerasi gerakan dengan waktu juga dapat diwakili secara grafis. Dari persamaan (33), ekspresi untuk kecepatan dan akselerasi dapat diperoleh sebagai

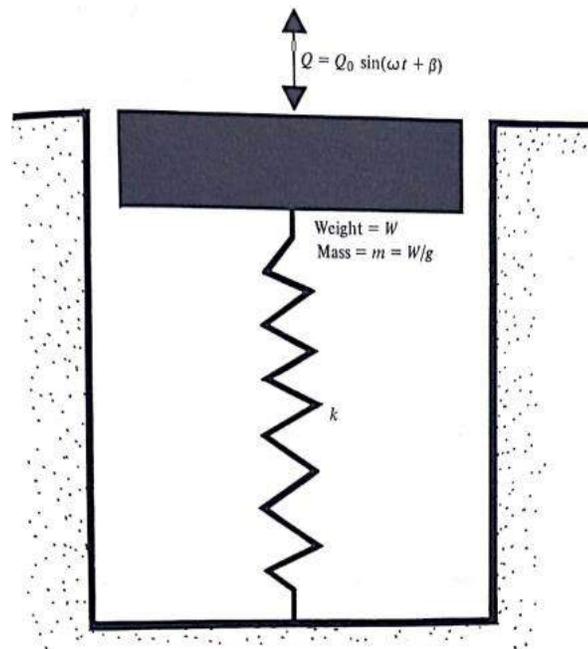
$$\dot{z} = -(Z\omega_n) \sin(\omega_n t - \alpha) = Z\omega_n \cos(\omega_n t - \alpha + \frac{1}{2} \pi) \dots \dots \dots (40)$$

dan

$$\ddot{z} = -Z\omega_n^2 \cos(\omega_n t - \alpha) = Z\omega_n^2 \cos(\omega_n t - \alpha + \pi) \dots \dots \dots (41)$$

### 3. Gaya getar pegas pada system pembebanan

Gambar 15 menunjukkan fondasi yang telah di idealkan dengan sistem massa musim semi sederhana. Bobot  $W$  sama dengan berat fondasi itu sendiri dan yang didukung olehnya; konstanta pegas adalah  $k$ . Hal ini diberikan dalam persamaan  $Q_0 \sin(\omega t + \beta)$ . kondisi ini umumnya ditemui pada fondasi yang mendukung getaran mesin dan sebagainya. Persamaan gerak untuk kondisi ini dapat diberikan oleh :



**Gambar 15.** Getaran paksa dari sistem pegas massal

$$m\ddot{z} + kz = Q_0 \sin(\omega t + \beta) \dots \dots \dots (42)$$

$$z = A_1 \sin(\omega t + \beta)$$

menjadi solusi khusus untuk Persamaan (58) ( $A, = \text{const}$ ). Substitusi ini ke Persamaan (58) memberikan

$$\omega^2 m A_1 \sin(\omega t + \beta) + k A_1 \sin(\omega t + \beta) = Q_0 \sin(\omega t + \beta)$$

$$A_1 = (Q_0/m)/(k/m - \omega^2) \dots\dots\dots(43)$$

Oleh karena itu, solusi khusus untuk persamaan (43) adalah bentuk

$$z = A_1 \sin(\omega t + \beta) = \frac{Q_0/m}{k/m - \omega^2} \sin(\omega t + \beta) \dots\dots\dots(44)$$

Solusi komplementer persamaan (44) harus memenuhi

$$m\ddot{z} + kz = 0$$

Seperti yang ditunjukkan pada bagian sebelumnya, solusi untuk persamaan di atas dapat diberikan sebagai

$$z = A_2 \cos \omega_n \cdot t + A_3 \sin \omega_n \cdot t \dots\dots\dots(45)$$

Dimana,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad A_2, A_3 = \text{const}$$

Oleh karena itu, solusi umum untuk persamaan (42) diperoleh dengan menambahkan persamaan (44) dan (45), atau

$$z = A_1 \sin(\omega t + \beta) + A_2 \cos \omega_n \cdot t + A_3 \sin \omega_n \cdot t \dots\dots\dots(46)$$

Sekarang, biarkan kondisi batas sebagai berikut: Pada saat  $t = 0$ ,

$$Z = z_0 = 0 \dots\dots\dots(47)$$

$$\frac{dz}{dt} = \text{velocity} = v_0 = 0 \dots\dots\dots(48)$$

dari persamaan (46) dan (47),

$$A_1 \sin\beta + A_2 = 0$$

$$\text{Atau } A_2 = -A_1 \sin\beta \dots\dots\dots (49)$$

Selanjutnya untuk Persamaan (49),

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = A_1 \omega \cos(\omega t + \beta) - A_2 \omega_n \sin \omega_n t + A_3 \sin \omega_n t$$

Mensubstitusi kondisi batas yang diberikan oleh persamaan (49) di persamaan

$$A_1 \omega \cos\beta + A_3 \omega_n = 0$$

atau

$$A_3 = -(A_1 \omega / \omega_n) \cos\beta \dots\dots\dots(50)$$

Menggabungkan persamaan (46), (49), and (50)

$$z = A_1 \left[ \sin(\omega t + \beta) - \cos(\omega t) \cdot \sin\beta - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \sin(\omega_n t) \cdot \cos\beta \right] \dots\dots\dots(51)$$

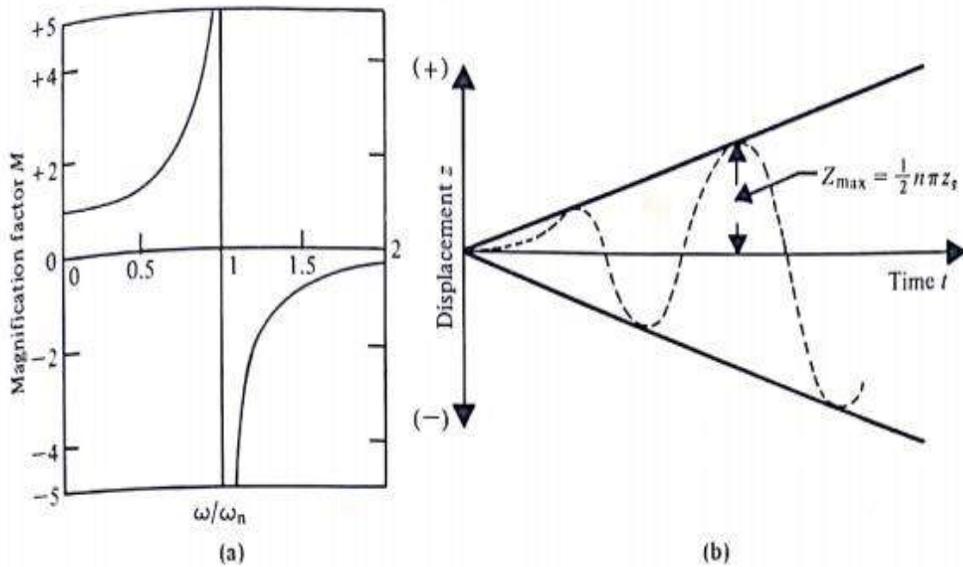
$$\begin{aligned} z &= A_1 \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \\ &= \frac{Q_0/m}{k/m - \omega^2} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \\ &= \frac{Q_0/k}{1 - \omega^2/\omega_n^2} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \dots\dots\dots(52) \end{aligned}$$

Untuk sistem nyata, dua istilah terakhir di dalam tanda kurung di persamaan (51) akan hilang karena redaman, yang menyisakan satu-satunya istilah untuk solusi kestabilan. Jika fungsi gaya bertahap dengan sistem

getaran (yaitu,  $\beta=0$  ). Namun,  $\frac{Q_0}{k} = z_s =$  defleksi statis. sehingga memungkinkan  $\frac{1}{(1 - \omega^2/\omega_n^2)}$  sama dengan M (sama dengan faktor pembesaran  $A_1/(Q_0/k)$  ). Sehingga persamaan tersebut adalah

$$z = z_s M(\sin \omega t - (\omega/\omega_n)\sin \omega_n t) \dots \dots \dots (53)$$

Sifat variasi faktor pembesaran M dengan  $\omega/\omega_n$  , ditunjukkan pada Gambar 16 a. Perhatikan bahwa faktor pembesaran tidak terbatas Ketika :



**Gambar 16.** Gaya getar dari sistem pegas massa: (a) variasi dari factor pembesaran dengan  $\omega/\omega_n$  (b) variasi dari perpindahan dengan waktu pada resonansi  $\omega=\omega_n$

$\omega/\omega_n = 1$ .Ini disebut kondisi resonansi. Untuk kondisi resonansi,sisi kanan Persamaan (53) menghasilkan 0/0. Dengan demikian, menerapkan aturan L'Hôpital,

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_n} (z) = \frac{(d/d\omega)[\sin\omega t - (\omega/\omega_n)\sin\omega_n t]}{(d/d\omega)(1 - \omega^2/\omega_n^2)}$$

atau

$$z = \frac{1}{2} z_s (\sin\omega_n t - \omega_n t \cos\omega_n t) \dots\dots\dots (54)$$

Kecepatan sebagai kondisi resonansi dapat diperoleh dari persamaan (54)

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{1}{2} z_s (\omega_n \cos\omega_n t - \omega_n \sin\omega_n t + \omega_n^2 \sin\omega_n t) \\ &= \frac{1}{2} (z_s \omega_n^2 t) \sin\omega_n t \dots\dots\dots (55) \end{aligned}$$

Karena kecepatan sama dengan nol pada titik di mana perpindahan berada di maksimum, untuk perpindahan maksimum :

$$\dot{z} = 0 = \frac{1}{2} (z_s \omega_n^2 t) \sin\omega_n t$$

atau

$$\sin\omega_n t = 0 \quad \text{i.e.,} \quad \omega_n t = n\pi \dots\dots\dots (56)$$

di mana n adalah bilangan bulat.

Untuk kondisi yang diberikan oleh persamaan (56), persamaan perpindahan persamaan (54)

$$|z_{max}]_{res} = \frac{1}{2} n\pi z_s \dots\dots\dots (57)$$

Dimana  $z_{max}$  = perpindahan maksimum.

Perlu diketahui bahwa, ketika nilai  $n$  sampai tak terhingga,  $z_{\max}$  juga tak terbatas sehingga berbahaya bagi pondasi. Sifat variasi  $z/z_s, v_s$  adalah waktu untuk kondisi resonansi ditunjukkan pada Gambar 16b,

### **Gaya Maximun pada Subgrade Foundation**

Kekuatan maksimum dan minimum pada subgrade fondasi akan terjadi pada waktu saat amplitudo maksimum. ketika kecepatan sama dengan Nol. Ini dapat berasal dari persamaan perpindahan (52),

$$z = \frac{Q_0}{k} \frac{1}{(1 - \omega^2/\omega_n^2)} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right)$$

Dengan demikian, kecepatan setiap saat adalah

$$\dot{z} = \frac{Q}{k} \frac{1}{(1 - \omega^2/\omega_n^2)} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right)$$

Untuk defleksi maksimum,  $\dot{z} = 0$ , or

$$\omega \cos \omega t - \omega \cos \omega_n t = 0$$

Karena tidak sama dengan nol,

$$\cos \omega t - \cos \omega_n t = 2 \sin \left( \frac{1}{2} \omega_n - \omega \right) t \sin \left( \frac{1}{2} \omega_n + \omega \right) t = 0$$

sehingga

$$\left( \frac{1}{2} \omega_n - \omega \right) t = n\pi ; \quad t = 2n\pi / (\omega_n - \omega) \dots \dots \dots (58)$$

atau

$$\left(\frac{1}{2}\omega_n + \omega\right)t = m\pi; \quad t = 2n\pi/(\omega_n + \omega) \quad \dots\dots\dots (59)$$

di mana  $m$  dan  $n$  - 1,2,3

Persamaan (58) tidak relevan (fenomena tumbukan) substitusi persamaan (59) menjadi persamaan (52) dan menyederhanakannya lebih lanjut,

$$z = z_{max} = \frac{Q_0}{k} \cdot \frac{1}{(1-\omega/\omega_n)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi m\omega}{\omega_n+\omega}\right) \dots\dots\dots (60)$$

Untuk menentukan gaya dinamis maksimum, nilai maksimum Diperlukan  $z_{max}$

Persamaan (60):

$$z_{max(max)} = (Q_0/k)(1 - \omega/\omega_n)^{-1} \quad \dots\dots\dots (61)$$

jadi,

$$F_{dynam(max)} = k[z_{max(max)}] = k(Q_0/k)(1 - \omega/\omega_n)^{-1} = Q_0(1 - \omega/\omega_n)^{-1} \dots\dots(62)$$

Oleh karena itu, total kekuatan pada subgrade akan bervariasi di antara batas

$$W - Q_0(1 - \omega/\omega_n)^{-1} \text{ dan } W + Q_0(1 - \omega/\omega_n)^{-1}$$

#### 4. Getaran Bebas dengan Peredam Kaku

Dalam kasus getaran bebas yang tidak teredam. getaran akan berlanjut setelah system di atur gerakannya. Namun dalam kasus praktis, semua getaran mengalami penurunan amplitudo secara bertahap seiring waktu. Karakteristik getaran ini disebut sebagai redaman. Gambar 14.b menunjukkan fondasi yang didukung oleh pegas dan dashpot. Dashpot

mewakili karakteristik redaman tanah. Dashpot koefisien sama dengan  $c$ . Untuk getaran gratis dari fondasi (yaitu, gaya  $Q=Q_0 \sin \omega t$  pada fondasi adalah nol), persamaan diferensial gerak dapat diberikan oleh

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = 0 \dots\dots\dots(63)$$

diaman  $z = Ae^{rt}$  menjadi solusi untuk Persamaan (62), di mana  $A$  adalah konstanta. Substitusi ini ke Persamaan (62)

$$mAr^2e^{rt} + cAre^{rt} + kAe^{rt} = 0$$

atau

$$r^2 + (c/m)r + k/m = 0 \dots\dots\dots(64)$$

Solusi untuk Persamaan (64) dapat diberikan sebagai

$$r = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}} \dots\dots\dots(65)$$

Ada tiga kondisi umum yang dapat dikembangkan dari Persamaan (65):

1. Jika  $c/2m > \sqrt{k/m}$ , kedua akar Persamaan (64) nyata dan negatif, Ini disebut sebagai overdamped.

2. Jika  $c/2m = \sqrt{k/m}$ ,  $r = -c/2m$ . Ini disebut kasus redaman kritis. Jadi, untuk kasus ini  $c = c_c = c/(2\sqrt{km})$

3. Jika  $c/2m < \sqrt{k/m}$ , akar Persamaan (64) kompleks :

$$r = -\frac{c}{2m} \pm i \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}}$$

Ini disebut sebagai kasus underdamping. Dimungkinkan sekarang untuk mendefinisikan rasio redaman  $D$ , yang dapat diekspresikan sebagai

$$D = c/c_c = c/(2\sqrt{km}) \dots \dots \dots (66)$$

Menggunakan rasio redaman, Persamaan 65) dapat ditulis ulang sebagai

$$r = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}} = \omega_n(-D \pm \sqrt{D^2 - 1}) \dots \dots \dots (67)$$

Dimana,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  untuk kondisi overdamped ( $D > 1$ ),

$$r = \omega_n(-D \pm \sqrt{D^2 - 1})$$

Untuk kondisi ini, persamaan untuk perpindahan (i.e.,  $z = Ae^{rt}$ ) dapat ditulis sebagai

$$z = A_1 \exp[\omega_n t(-D + \sqrt{D^2 - 1})] + A_2 \exp[\omega_n t(-D - \sqrt{D^2 - 1})] \dots \dots \dots (68)$$

Di mana  $A_1$  dan  $A_2$  adalah dua konstanta Sekarang, dibiarkan

$$A_1 = \frac{1}{2} (A_3 + A_4) \dots \dots \dots (69)$$

dan

$$A_2 = \frac{1}{2} (A_3 - A_4) \dots \dots \dots (70)$$

Penggantian persamaan (69) dan (70) ke persamaan (71) dan penyusunan kembali memberikan

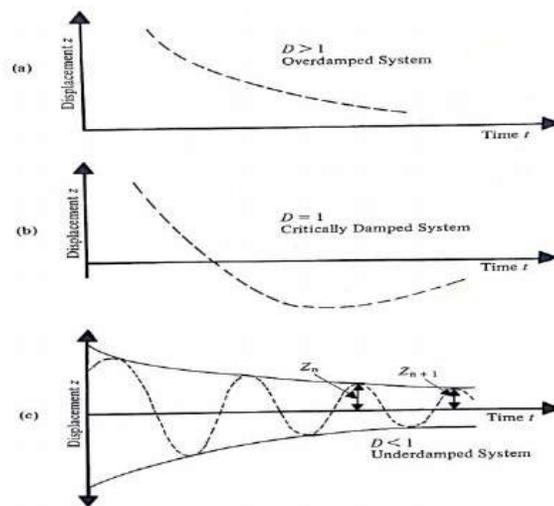
$$z = e^{-D\omega_n t} \left\{ \frac{1}{2} A_3 \left[ \exp(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) + \exp(-\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) \right] + \frac{1}{2} A_4 \left[ \exp(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) - \exp(-\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) \right] \right\}$$

or

$$z = e^{-D\omega_n t} \left[ A_3 \cosh(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) + A_4 \sinh(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) \right] \quad (\text{for } D > 1)$$

.....(71)

Persamaan (71) menunjukkan bahwa sistem yang overdamped tidak akan berosilasi sama sekali. Variasi  $z$  dengan waktu akan mengambil format yang ditunjukkan pada Gambar 17.a.



**Gambar 17.** Getaran bebas dari sistem massa-pegas-dashpot: (a) kasus overdamped ; (b) kasus yang diredam secara kritis; (c) kasus underdamped.

Konstanta  $A_3$  dan  $A_4$  di persamaan (71) dapat dievaluasi dengan mengetahui kondisi awal. kemudian, pada saat itu  $t = 0$ , perpindahan =  $z = z_0$  dan kecepatan =  $dz/dt = v_0$ . Dari persamaan (71) dan kondisi batas pertama

$$z = z_0 = A_3 \dots\dots\dots(72)$$

lagi, dari persamaan (71) dan kondisi batas kedua,

$$dz/dt = v_0 = (\omega_n \sqrt{D^2 - 1} A_4) - D\omega_n A_3$$

Atau

$$A_4 = \frac{v_0 + D\omega_n A_3}{\omega_n \sqrt{D^2 - 1}} = \frac{v_0 + D\omega_n z_0}{\omega_n \sqrt{D^2 - 1}} \dots\dots\dots (73)$$

Substitusi persamaan (72) dan (73) ke persamaan (70),

$$z = e^{-D\omega_n t} \left[ z_0 \cosh(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) + \frac{v_0 D \omega_n z_0}{\omega_n \sqrt{D^2 - 1}} \sinh(\omega_n \sqrt{D^2 - 1} t) \right]$$

Untuk kondisi kritis ( $D = 1$ ), dari persamaan (67),

$$r = -\omega_n \dots\dots\dots (74)$$

Mengingat kondisi ini, persamaan untuk perpindahan ( $z = Ae^{rt}$ ) Mungkin dapat ditulis sebagai,

$$z = (A_5 + A_6 t) e^{-\omega_n t} \dots\dots\dots(75)$$

dimana  $A_5$  dan  $A_6$  adalah dua konstanta. Ini mirip dengan kasus sistem overdamped kecuali fakta bahwa tanda  $z$  hanya berubah sekali. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 17b. Nilai  $A_5$  dan  $A_6$  dalam Persamaan (75) dapat ditentukan dengan menggunakan kondisi awal getaran. Biarkan, pada saat

$t = 0,$

$$z = z_0 \quad , \quad dz/dt = v_0$$

Dari dua kondisi di atas dan persamaan (75),

$$z = z_0 A_5 \dots \dots \dots (76)$$

Demikian pula dari kondisi kedua dan Persamaan (75),

$$dz/dt = v_0 = -\omega_n A_5 + A_6 = -\omega_n z_0 + A_6$$

Atau

$$A_6 = v_0 + \omega_n z_0 \dots \dots \dots (77)$$

Kombinasi Persamaan (75) - (77) hasil

$$z = [z_0 + (v_0 + \omega_n z_0)t]e^{-\omega_n t} \dots \dots \dots (78)$$

Terakhir, untuk kondisi underdamped ( $D < 1$ ),

$$r = \omega_n(-D \pm i\sqrt{1 - D^2})$$

Dengan demikian, bentuk umum persamaan untuk perpindahan ( $z = Ae^{rt}$ )

Dapat dinyatakan sebagai

$$z = e^{-D\omega_n t} [A_7 \exp(i\omega_n \sqrt{1 - D^2} t) + A_8 \exp(-i\omega_n \sqrt{1 - D^2} t)] \dots \dots \dots (79)$$

di mana  $A_7$ , dan  $A_8$  adalah dua konstanta.

Persamaan (79) dapat disederhanakan ke formular

$$z = e^{-D\omega_n t} [A_9 \cos(\omega_n \sqrt{1-D^2} t) + A_{10} \sin(\omega_n \sqrt{1-D^2} t)] \dots \dots \dots (80)$$

di mana  $A_9$ , dan  $A_{10}$  adalah dua konstanta.

Nilai konstanta  $A_9$ , dan  $A_{10}$  Persamaan (80) dapat ditentukan oleh menggunakan kondisi awal getaran berikut. Biarkan, pada waktunya  $t=0$ ,

$$z = z_0 \quad \text{and} \quad dz/dt = v_0$$

Tersedia persamaan akhir dengan kondisi batas di atas akan menjadi bentuk

$$z = e^{-D\omega_n t} \left[ z_0 \cos(\omega_n \sqrt{1-D^2} t) + \frac{v_0 + D\omega_n z_0}{\omega_n \sqrt{1-D^2}} \cdot \sin(\omega_n \sqrt{1-D^2} t) \right] \dots \dots \dots (89)$$

Persamaan (89) selanjutnya dapat disederhanakan sebagai

$$z = Z \cos(\omega_d t - \alpha) \dots \dots \dots (90)$$

Dimana

$$Z = e^{D\omega_n t} \sqrt{z_0^2 + \left( \frac{v_0 + D\omega_n z_0}{\omega_n \sqrt{1-D^2}} \right)^2} \dots \dots \dots (91)$$

$$\alpha = \tan^{-1} (v_0 + D\omega_n z_0) / \omega_n z_0 \sqrt{1-D^2} \dots \dots \dots (92)$$

$$\omega_d = \text{frekuensi melingkar alami yang teredam} = \omega_n \sqrt{1-D^2} \dots \dots \dots (93)$$

Efek redaman adalah mengurangi secara bertahap amplitudo getaran seiring waktu. Untuk mengevaluasi besarnya penurunan amplitude getaran dengan

waktu, Menbiarkan  $Z_n$ , and  $Z_{n+1}$  menjadi dua parameter positif atau negatif secara berturut-turut atau nilai maksimum negatif, dan  $t_{n+1}$  dari mulai getaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17c. Dari Persamaan (91).

$$\frac{Z_{n+1}}{Z_n} = \frac{\exp(-D\omega_n t_{n+1})}{\exp(-D\omega_n t_n)} = \exp[-D\omega_n(t_{n+1} - t_n)] \dots\dots\dots(94)$$

Sementara ,  $t_{n+1} - t_n$  adalah periode getaran T,

$$T = 2\pi/\omega_d = 2\pi/\omega_n\sqrt{1 - D^2} \dots\dots\dots(95)$$

Dengan demikian, menggabungkan Persamaan (94) dan (95).

$$\delta = \ln(Z_n/Z_{n+1}) = 2\pi D/\sqrt{1 - D^2} \dots\dots\dots(96)$$

Waktu  $\delta$  disebut dekrement logaritma.

Jika rasio redaman D kecil, Persamaan (96) dapat diperkirakan

$$\delta = \ln(Z_n/Z_{n+1}) = 2\pi D \dots\dots\dots(97)$$

## **E. Pengujian Nilai Modulus Pada Material Aspal**

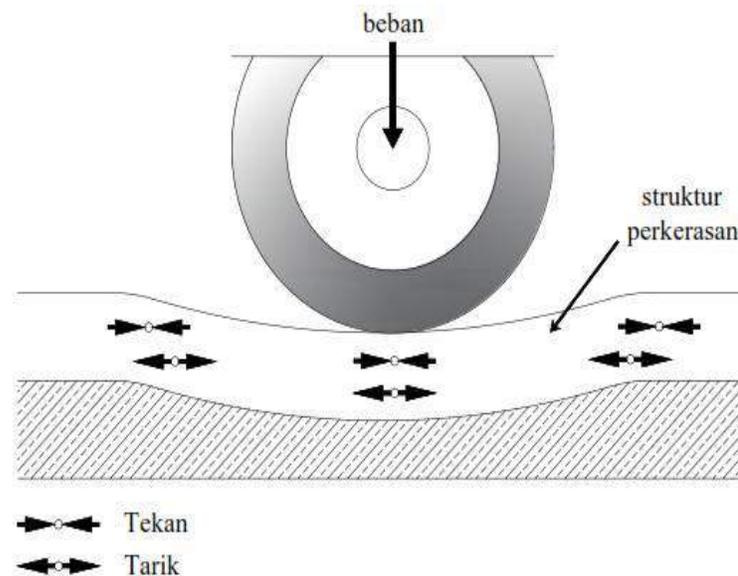
### **1. Nilai Tegangan dan Regangan**

Proses pembebanan yang dilakukan secara terus menerus pada suatu material akan menghasilkan tegangan dan implikasinya menghasilkan regangan. Tegangan merupakan intensitas beban reaksi pada setiap titik

dalam material yang dikenakan oleh beban layanan atau beban rencana, umur layan dari perkerasan jalan, kondisi perakitan, fabrikasi, dan perubahan termal atau perubahan suhu yang terjadi pada material (Jastrzabski, 1987).

Tegangan (*stress*) menyatakan besarnya beban maksimum yang dapat diterima terhadap luas penampang suatu benda, atau dapat dikatakan gaya yang bekerja sebanding dengan panjang benda dan berbanding terbalik dengan luas penampangnya.

Pada lapisan perkerasan, beban lalu lintas yang ada melewati lapisan perkerasan dapat menyebabkan tegangan tekan, yaitu pada lapisan bagian atas, serta tegangan tarik pada lapisan bagian bawah seperti yang ditampilkan pada Gambar 18.



**Gambar 18.** Tegangan yang terjadi pada lapisan perkerasan (*Highway Materials, Soils and Concretes* (Atkins, 2003))

Tegangan dinyatakan dalam persamaan 98.

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (98)$$

Dimana :

$\sigma$  = Tegangan (MPa)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

Regangan menyatakan deformasi relatif akibat adanya tegangan (tarik atau tekan) (Walubita, 2000). Nilai regangan diperoleh dari hasil perbandingan antara besarnya perubahan dimensi ( $\Delta L$ ) yang terjadi akibat pembebanan terhadap dimensi mula-mula ( $L_0$ ), atau dituliskan dengan persamaan 99.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (99)$$

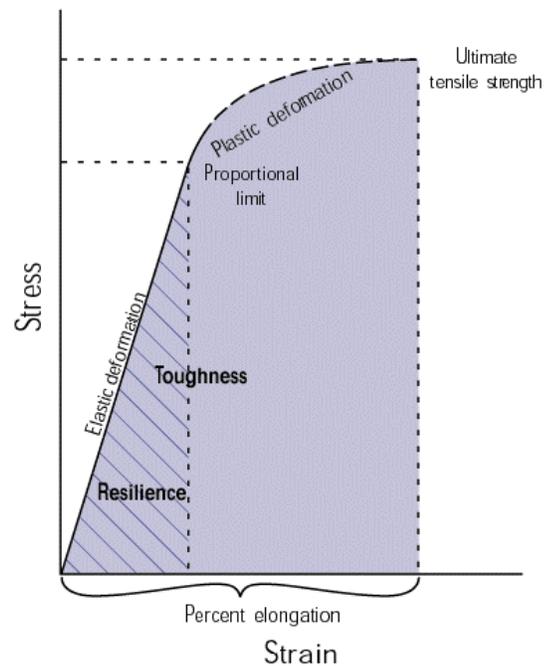
Dimana :

$\varepsilon$  = Regangan (mm)

$\Delta L$  = Perubahan panjang (mm)

$L_0$  = Panjang mula-mula (mm)

Gambar 19 memperlihatkan diagram hubungan tegangan dan regangan menurut Jastrzabski, 1987.



**Gambar 19.** Diagram tegangan-regangan (Jastrzabski, 1987)

## 2. Modulus Kekakuan Aspal

Modulus elastisitas adalah angka yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Salah satu jenis dalam modulus elastisitas adalah modulus kekakuan.

Modulus kekakuan adalah modulus elastis yang digunakan dalam teori elastis. Seperti diketahui bahwa hampir seluruh material perkerasan tidak bersifat elastis tapi mengalami deformasi permanen setelah menerima pengulangan beban. Tetapi jika beban tersebut relatif kecil terhadap kekuatan material, maka deformasi permanen yang terjadi pada setiap

pengulangan beban yang tinggi hampir dapat kembali secara sempurna dan proporsional terhadap beban. Pada kondisi ini material tersebut dapat dipertimbangkan sebagai material yang elastis (Huang, 1993).

Kekakuan (*Stiffness*) adalah ketahanan suatu material terhadap deformasi elastis, karena sifat rheologinya kekakuan aspal merupakan hubungan antara tegangan dan regangan sebagai suatu fungsi lama pembebanan dan temperatur. Van der Poel (1954) memberi istilah *Stiffness of bitumen* ( $S_b$ ) sebagai perbandingan antara tegangan-regangan pada aspal, yang merupakan fungsi dari lamanya pembebanan (frekuensi) yang diterapkan, perbedaan temperatur dengan T800 dan *Penetration Index*. T800 adalah temperatur pada saat penetrasi mencapai 800.

Berdasarkan Bina Marga (2013) karakteristik modulus bahan untuk iklim dan kondisi pembebanan Indonesia pada jenis AC-WC adalah 1100 MPa. *AASHTO* (1993) mengatakan perlunya diperhatikan terhadap beton aspal lapis permukaan (*Asphalt concrete surface coarse*) yang mempunyai nilai Modulus Kekakuan diatas 450.000 psi. Tingginya nilai modulus kekakuan menyebabkan beton aspal lebih kaku dan tahan terhadap lendutan, namun rentan terhadap suhu dan retak lelah (*fatigue cracking*).

Aspal adalah material yang bersifat viskoelastis dimana sifat material ini akan berubah dari viskos ke elastis tergantung pada temperatur dan waktu pembebanan. Pada temperatur tinggi dan waktu pembebanan yang lama aspal akan berperilaku sebagai *viscous-liquid*, sedangkan bila pada

temperatur yang rendah dan waktu pembebanannya singkat maka aspal akan bersifat elastis-padat.

Kondisi yang umum terjadi pada aspal merupakan peralihan dari kedua sifat tersebut, yaitu aspal akan bersifat *viscous-elastis*. Van der Poel mendefinisikan modulus kekakuan aspal sebagai perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan regangan yang dihasilkan pada waktu pembebanan tertentu.

### 3. Metode Brown dan Brunton

Terdapat dua cara pendekatan untuk mengukur nilai modulus kekakuan (*Stiffness Modulus*) suatu bahan campuran aspal, yaitu dengan pendekatan tidak langsung (*indirect methods*) dan pendekatan langsung (*direct methods*). Pada pendekatan tak langsung kekakuan diperkirakan melalui data rutin aspal menggunakan formula maupun nomogram yang telah dikembangkan oleh Brown Brunton maupun Shell Bitumen.

Menurut metode Brown dan Brunton (1984) modulus kekakuan campuran aspal beton (*Sme*) dipengaruhi oleh modulus kekakuan aspal (*Sb*) dan VMA (*voids in Mineral Agregate*). Modulus kekakuan aspal (*Sb*) dipengaruhi oleh temperatur, *recovered penetration*, *recovered softening point*, *penetration index* dan lamanya pembebanan. Adapun persamaan metode Brown dan Brunton adalah :

$$Sme = Sb \left[ 1 + \frac{257,5 - 2,5 VMA}{n \times (VMA - 3)} \right] n \dots \dots \dots (100)$$

$$n = 0,83 \times \log (4,10^{10}/S_b) \dots \dots \dots (101)$$

dengan :

$S_{me}$  = Modulus kekakuan campuran aspal beton/*Mix Stiffness* (MPa)

$S_b$  = Modulus kekakuan aspal/*Bitumen Stiffness* (MPa)

#### 4. Metode Shell Bitumen

Menurut metode Shell Bitumen (1990) merupakan modulus kekakuan campuran aspal beton ( $S_m$ ) yang dipengaruhi oleh modulus kekakuan aspal ( $S_b$ ) dan kadar pori udara ( $C_v$ ) yang terdapat dalam campuran aspal. Modulus kekakuan aspal ( $S_b$ ) dipengaruhi oleh T800, *penetration index*, temperatur perkerasan dan lamanya pembebanan. Adapun persamaan metode Shell Bitumen adalah :

$$S_m = S_b \left[ 1 + \frac{2,5 \times C_v}{n \times (1 - C_v)} \right]^n \dots \dots \dots (102)$$

dengan :

$S_m$  = kekakuan campuran beton aspal/*Mix Stiffness* (N/m<sup>2</sup>)

$S_b$  = kekakuan aspal/*Bitumen Stiffness* (N/m<sup>2</sup>)

$$n = 0,83 \times \log (4,10^{10}/S_b)$$

$$C_v = 0,70 - 0,90$$

#### 5. *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA)

Modulus kekakuan yang dicari melalui pendekatan langsung diperoleh dari hasil pengujian laboratorium. Pendekatan langsung adalah metode terbaik dalam menentukan nilai Modulus Kekakuan. Pengujian laboratorium

untuk modulus kekakuan mempunyai beberapa ketentuan seperti AASHTO T294-92, 1992 dan SNI 03-6836-2002 dengan menggunakan alat beban berulang triaxial UMATTA (*Universal Materials Testing Apparatus*).

Untuk dapat menentukan nilai Modulus dengan pengujian laboratorium dapat ditentukan melalui pengujian Modulus Dinamis dan Modulus Resilien (Robert dkk., 1991). Modulus dinamis merupakan perbandingan antara tegangan yang bekerja dibanding dengan regangan vertikal yang terukur. Modulus dinamis ditentukan dengan pemberian beban sinusoidal terhadap benda uji silinder yang mempunyai perbandingan tinggi dan diameter 2 : 1. Modulus resilien adalah energi regang persatuan volume yang diperlukan sehingga material mendapat tegangan dari kondisi tidak berbeban hingga titik luluh. Modulus Resilien ditentukan melalui pengujian *Repeated Load Indirect Tensile/RLIT* (Robert dkk., 1991). Pada pengujian *RLIT* ini benda uji tidak dibebani sampai runtuh, akan tetapi hanya dibebani sekitar 2-20% dari kuat tarik tak langsungnya.

Beberapa alat untuk menguji modulus kekakuan yang dapat dilakukan di laboratorium yaitu :

1. *Universal Testing Machine*, merupakan sebuah mesin pengujian untuk menguji tegangan tarik dan kekuatan tekan bahan atau material. Cara penggunaan *Universal Testing Machine* adalah dengan memberikan gaya tekan atau gaya tarik kepada terhadap bahan yang diujikan.

2. *Universal Material Testing Apparatus (UMATTA)*, tes ini dilakukan di bawah beban berulang pada tegangan rendah sehingga respon dari spesimen yang diuji tetap elastis. Pengujian ini dianggap sebagai uji tak rusak dilakukan dengan menggunakan mesin UMATTA menurut ASTM D4123. Peralatan yang dikendalikan komputer dan menggunakan aktuator pneumatik untuk menerapkan beban.
3. *Indirect Tensile Stiffnes Modulus*, tes dilakukan sesuai dengan BS DD 213 : 1993. Metode pengujian menggunakan spesimen silinder baik dibuat dari core lapangan atau laboratorium dibentuk, dengan diameter 100 - 150 mm dan ketebalan antara 30 – 80 mm.
4. *Bending Point Test*, uji bending dilaksanakan dengan pemberian beban pada specimen baik dengan prinsip 3-point bending maupun 4-point bending. Pada 3-point bending momen maksimum hanya terbentuk pada satu titik, yaitu pada titik pemberian beban uji. Namun pada 4-point bending, momen maksimum terbentuk sepanjang jarak titik pembebanan satu dengan titik pembebanan yang lain. Biasanya pengujian ini disebut dengan pengujian fatigue atau kelelahan campuran beraspal.

Jika keempat jenis alat tersebut tidak dimiliki maka pengujian modulus kekakuan aspal beton dapat dilaksanakan dengan alat Marshall Test, yaitu dengan menggunakan pendekatan nilai tegangan dan regangan (Widodo S, 2011). Dari hasil pengujian Marshall didapatkan nilai stabilitas dan flow. Besarnya tegangan diketahui dari nilai stabilitas dibagi dengan luas bidang

tekan, sedangkan besarnya regangan diketahui dari nilai flow dibagi dengan diameter benda uji. Adapun persamaan tegangan dan regangan adalah :

$$\sigma = \frac{p}{d.t} \dots\dots\dots(103)$$

$$\varepsilon = \frac{f}{d} \dots\dots\dots(104)$$

dimana :

$\sigma$  = tegangan yang terjadi pada benda uji

$p$  = beban yang bekerja

$d$  = diameter benda uji

$t$  = tebal/tinggi benda uji

$\varepsilon$  = regangan yang terjadi pada benda uji

$f$  = pelelehan benda uji

Berdasarkan persamaan (103) dan persamaan (104) dapat dibuat kurva hubungan antara tegangan dan regangan, dimana nilai modulus kekakuan merupakan kemiringan garis lurus kurva.

## 6. *Light Weight Deflectometer (LWD)*

Alat LWD pertama kali diperkenalkan pada tahun 1981 di Magderburg, German dan dikembangkan oleh *Highway Research Institute* dan *HMP Company in Germany* (HMP-LFG), The *light drop weight tester*. Pada pasir silika dengan kepadatan relatif 20 - 80% memiliki ELWD sekitar 12-38 MPa. Hasil pengujian lapisan pasir berkapur pada kepadatan relatif dari 20 - 80%

memiliki modulus ELWD 8 - 32 MPa. (Magderburg prufgeratebau GmbH, [www.hmp-onlin.com](http://www.hmp-onlin.com), dalam A.F Elhakim, dkk., 2013).

Pemakaian *Light Weight Deflectometer* (LWD) semakin meningkat. Dalam melakukan pengujian dengan alat LWD ini, pada jalan tanpa penutup, parameter yang diperoleh adalah modulus elastisitas dari lapisan yang diuji. Parameter modulus elastisitas ini bisa dikonversikan menjadi parameter CBR dengan menggunakan korelasi yang diberikan AASHTO 1993. Korelasi ini tergantung dari jenis lapisan yang diuji (tanah dasar, base A atau base B).

Untuk penggunaan LWD pada jalan beraspal yang berlalu lintas rendah, parameter yang didapat berupa modulus elastisitas tanah dasar dan juga modulus elastisitas sistem perkerasan menggunakan persamaan-persamaan yang diberikan pada AASHTO 1993. Modulus elastisitas sistem perkerasan ini bisa digunakan juga untuk menghitung kekuatan struktural sistem perkerasan *existing* yang pada akhirnya bisa untuk menghitung tebal lapis tambah yang dibutuhkan selama umur rencana.

Dari sisi ini penggunaan alat LWD sangat memberikan keuntungan yang lebih besar dibandingkan dengan alat-alat konvensional seperti *Dynamic Cone Penetration* (DCP), CBR langsung, *Plate Bearing Test*, dll. baik dari sisi waktu maupun akurasi. Tabel 1 memperlihatkan perbandingan antara derajat kepadatan aktual dan derajat kepadatan dengan LWD pada lapisan pasir dengan kepadatan 2,67. Derajat kepadatan aktual dengan derajat

kepadatan dengan LWD yang diperlihatkan oleh Tabel 1 tidak berbeda jauh nilainya yang bekisar antara 80 hingga 90%.

**Tabel 1.** Perbandingan antara derajat kepadatan aktual dan derajat kepadatan dengan LWD pada lapisan pasir dengan kepadatan 2,67

No	Pasir Berkapur		Pasir dengan Silika		Pasir Berlanau	
	Derajat Kepadatan Aktual (%)	Derajat Kepadatan dengan LWD (%)	Derajat Kepadatan Aktual (%)	Derajat Kepadatan dengan LWD (%)	Derajat Kepadatan Aktual (%)	Derajat Kepadatan dengan LWD (%)
1	93	90	86	90	90	93
2	95	92	89	93	91	94
3	97	95	92	95	93	95
4	99	98	96	97	95	97

(Sumber : Elhakim, dkk. 2013. *The Use of Light Weight Deflectometer for In Situ Evaluation of Sand Degree of Compaction*. HBRC Journal)

Pada jalan beraspal volume lalu lintas rendah, evaluasi dan monitoring kekuatan struktural sistem perkerasan biasanya dilakukan dengan alat *Benkelman Beam*. Alat ini terdiri dari satu truk standar juga menggunakan sekurang-kurangnya 4 (empat) orang teknisi selain sopir truk sendiri. Selain itu pencatatan yang dilakukan juga secara manual. Dari sisi ini penggunaan LWD untuk jalan beraspal yang mempunyai lalu lintas rendah sampai sedang jelas lebih efisien dibandingkan dengan menggunakan alat *Benkelman Beam*. Sebagai alternatif lain dari penggunaan alat LWD khususnya untuk jalan-jalan

dengan kategori jalan bervolume lalu lintas rendah. Tabel 2 memperlihatkan perbandingan antara derajat kepadatan aktual dengan modulus LWD pada lapisan pasir dengan kepadatan 2,67.

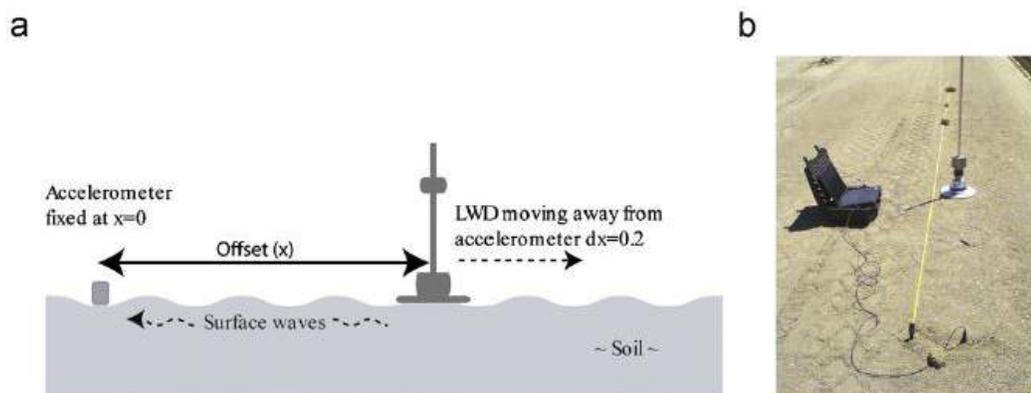
**Tabel 2.** Perbandingan antara derajat kepadatan aktual dan derajat kepadatan dengan LWD pada lapisan pasir dengan kepadatan 2,67

No	Pasir Berkapur		Pasir dengan Silika	
	Modulus LWD (MPa)	Derajat Kepadatan (%)	Modulus LWD (MPa)	Derajat Kepadatan (%)
1	11	86	8	90
2	19	88	17	92
3	31	93	23	95
4	38	97	34	98

(Sumber : Elhakim, dkk. 2013. *The Use of Light Weight Deflectometer for In Situ Evaluation of Sand Degree of Compaction*. HBRC Journal)

Perhitungan yang digunakan adalah berdasarkan teori-teori dasar seismologi serta mekanika tanah khususnya teori Boussinesq untuk menghasilkan nilai modulus elastisitas. Teori dasar seismologi digunakan dalam analisis gelombang sampai mendapatkan nilai lendutan yang dihasilkan. Sedangkan teori Boussinesq adalah untuk menghitung nilai modulus elastisitas lapisan tanah dengan mempertimbangkan nilai lendutan. Dua teori ini dalam pengujian LWD disandingkan untuk mendapatkan

parameter dari tanah yang begitu penting berupa nilai lendutan dan modulus elastisitas. Gambar 20 memperlihatkan skema pengujian alat LWD.



**Gambar 20.** Skema pengujian dengan menggunakan LWD (Nils Ryden dan Michael A. Mooney, 2009)

Penggunaan alat *Light Weigth Deflectometer* ini meliputi pengukuran lendutan dari permukaan lapisan akibat beban impak yang dijatuhkan. Selain dari lendutan pada titik pembebanan, lendutan juga harus bisa diukur pada jarak tertentu dari titik pembebanan tersebut. Lendutan yang didapat bisa digunakan untuk perancangan tebal perkerasan jalan. Selain itu, nilai lendutan ini juga digunakan untuk parameter *quality control* dan *quality assurance* serta kekuatan struktural lapisan perkerasan seperti yang ditunjukkan pada ASTM D4695. Untuk pengujian pada lapisan tertentu (aspal, lapis pondasi, lapis pondasi bawah atau tanah dasar), harus memperhatikan level tegangan yang digunakan pada pengujian. Level tegangan yang harus diperhatikan adalah : (Pedoman Metoda Uji Lendutan

menggunakan LWD), Pd 03-2016-B, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat)

1. Bahan tanah dasar dan lapis pondasi bersifat *stress dependent*, maka harus hati-hati dalam melakukan pengujian LWD pada bahan granural. Sebaiknya nilai  $\sigma$  yang digunakan tidak jauh berbeda dengan tegangan aktual rata-rata yang terjadi selama umur pelayanan perkerasan tersebut.
2. Volume bahan tanah dasar dan lapis pondasi yang dipengaruhi oleh beban merupakan fungsi dari besaran beban itu sendiri.

**Tabel 3.** Spesifikasi beberapa alat LWD

Zorn	Prima	TFT	HMP	APKJt BBPJ 2012	
Jenis Pelat	Solid	Anulus	Anulus	Solid	Solid
Diameter Pelat (mm)	150, 200, 300	100, 200, 300	100, 150, 200, 300	100, 300	
Berat Jatuh (kg)	10	10, 15, 20	10, 15, 20	10, 20	
Tinggi Jatuh (m)	0,72	Bervariasi	Bervariasi	0,72	1, 20
Peredam	Pegas Baja	Karet	Karet	Karet	Karet

Tabel 3 memperlihatkan spesifikasi beberapa alat LWD yang sering digunakan untuk menguji lendutan pada lapisan perkerasan. Dengan menggunakan alat ini maka dapat dihitung rata-rata pengujian ( $\bar{w}$ ), standar deviasi ( $\sigma_w$ ) dan koefisien variasi ( $COV_w$ ) masing-masing berdasarkan persamaan 105, 106 dan 107 dari penurunan yang terjadi pada bantalan plat setiap 3 kali pukulan yang diberikan.

$$\bar{w} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i \dots\dots\dots(105)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (W_i - \bar{w})^2}{m-1}} \dots\dots\dots(106)$$

$$COV_w = \frac{\sigma_w}{\bar{w}} \dots\dots\dots(107)$$

Dimana  $m$  = jumlah pukulan palu dan  $m = 3$  untuk semua STA dan titik uji pada pengujian ini. Untuk rata-rata dari penurunan yang terjadi pada bantalan pelat, modulus deformasi  $E_{LWD}$  dari 3 ruas jalan dapat dihitung berdasarkan persamaan 107.

$$E_{LWD} = \frac{qr(1-\nu^2)}{w} f_r \dots\dots\dots(108)$$

Untuk setiap pengujian, rata-rata, standar deviasi dan koefisien variasi dari modulus deformasi yang didapatkan ( $\bar{E}_{LWD}$ ,  $\sigma_{E-LWD}$  dan  $COV_{E-LWD}$  untuk

tiga jenis ruas jalan tersebut masing-masing dapat dihitung berdasarkan persamaan 109, 110 dan 111.

$$\bar{E}_{LWD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{LWD}(i) \dots \dots \dots (109)$$

$$\sigma_{E-LWD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{LWD}(i) - \bar{E}_{LWD})^2}{n-1}} \dots \dots \dots (110)$$

$$COV_{E-LWD} = \frac{\sigma_{E-LWD}}{\bar{E}_{LWD}} \dots \dots \dots (111)$$

Dimana n = jumlah titik uji dari pengujian yang dilakukan.

Korelasi antara nilai modulus elastisitas dengan CBR dapat menggunakan rumus yaitu : (Nageshwar, dkk., 2008)

$$CBR = 14,0 + 0,66 (E_{LWD}) \dots \dots \dots (112)$$

## 7. Marshall Test

Li *et al* (1999) telah melakukan pengujian campuran aspal dengan metode Marshall dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik dari campuran aspal panas, dimaksudkan untuk mendapatkan stabilitas dan *flow* dibaca langsung dengan dial. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh *Bruce Marshall* dari *Misisipi State Highway Department* sekitar tahun 1940-an. Selain mendapatkan nilai stabilitas dan *flow* akan didapatkan pula nilai VIM, VMA, *density* campuran aspal dan marshall quotient. Dalam penelitian *elastic*

*modulus* campuran aspal beton, design campuran aspal yang digunakan melibatkan metode marshall.

Gul & Guler *et al* (2014) mengatakan bahwa karakteristik deformasi permanen dari campuran aspal dapat dipelajari dengan menggunakan benda uji silinder dipadatkan yang dapat dibuat baik dari superpave atau perangkat pemadat Marshall, terlepas dari metode campuran aspal desain dan jenis agregat. Sedangkan Xiang *et al* (2008) mengemukakan untuk mengevaluasi karakteristik retak pada campuran aspal digunakan metode Marshall dalam mendesain campuran aspal.

Stabilitas merupakan kemampuan suatu campuran aspal untuk menerima beban sampai terjadi kelelahan plastis yang dinyatakan dalam kilogram atau pound. *Flow* (kelelahan) adalah perubahan bentuk plastis suatu campuran aspal yang terjadi akibat beban sampai batas runtuh yang dinyatakan dalam mm atau 0,01". Hasil bagi dari stabilitas (*stability*) dan *flow* (kelelahan plastis) yang besarnya merupakan indikator dari kelenturan yang potensial terhadap keretakan disebut *Marshall Quotient*. Marshall quotient merupakan ukuran kelenturan atau fleksibilitas dari campuran aspal. Nilai *Marshall Quotient* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 113.

$$MQ = \frac{S}{F} \dots\dots\dots(113)$$

Dimana :

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

S = Stabilitas (kg)

F = Nilai *flow* (mm)

## F. Komponen Alat LWD Laboratorium

Penggunaan alat *Light Weight Deflectometer* ini meliputi pengukuran lendutan dari permukaan lapisan akibat beban impak yang dijatuhkan. Selain dari lendutan pada titik pembebanan, lendutan juga harus bisa diukur pada jarak tertentu dari titik pembebanan tersebut. Lendutan yang didapat bisa digunakan untuk perancangan tebal perkerasan jalan. Selain itu nilai lendutan ini juga digunakan untuk parameter *quality control* dan *quality assurance* serta kekuatan struktural lapisan perkerasan seperti yang ditunjukkan pada ASTM D4695. Untuk pengujian pada lapisan tertentu (aspal, lapis pondasi, lapis pondasi bawah atau tanah dasar), harap diperhatikan level tegangan yang digunakan (Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Pd 03-2016-B).

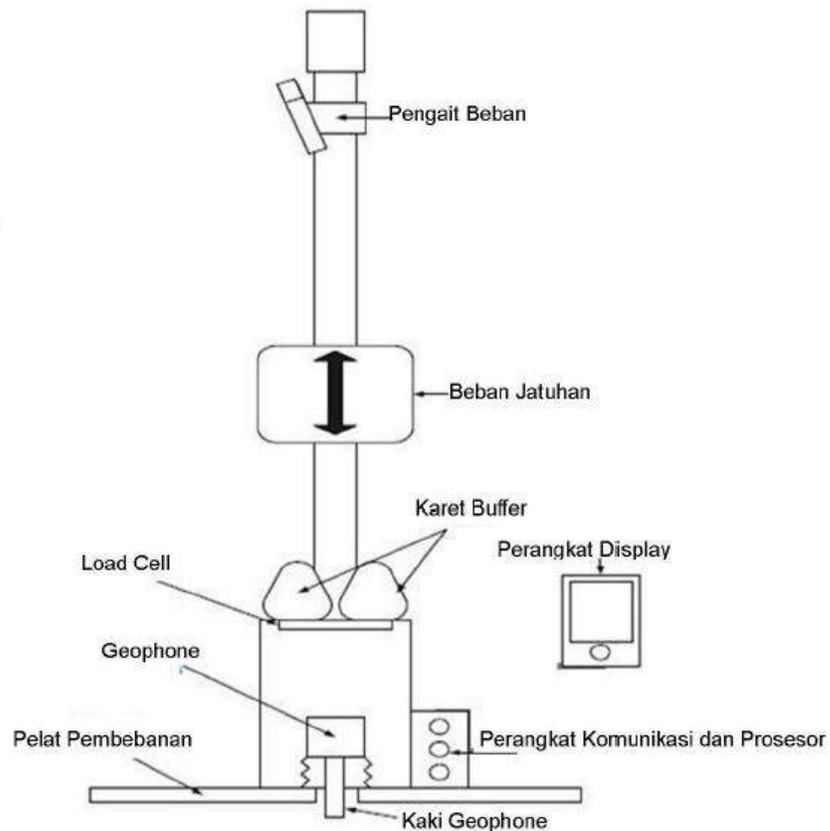
Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Pd 03-2016-B skematik dari alat *Light Weight Deflectometer* ditunjukkan pada Gambar 21. Alat *Light Weight Deflectometer* terdiri dari beberapa komponen utama yaitu :

- a. Pelat pembebanan (*bearing plate*) berbentuk lingkaran dengan diameter 100 mm s/d 300 mm terbuat dari bahan logam dengan lobang

ditengahnya (*annulus*). Diameter *annulus* 50 mm s/d 75 mm, sedangkan tebal pelat ( $10\pm 5$ ) mm.

- b. *Load cell* yang digunakan untuk mengukur besaran beban yang ditimbulkan oleh beban jatuhan. Akurasi dari *load cell* ini minimum 0.1 kN. Di dalam melakukan kalibrasi, *load cell* ini harus dikalibrasi pada rentang 0 - 15 kN.
- c. *Geophone* untuk mengukur lendutan vertikal yang ditimbulkan oleh beban jatuhan. Akurasi dari *geophone* ini  $\pm 2$  mikrometer. Di dalam melakukan kalibrasi, *geophone* ini harus dikalibrasi pada rentang 0 s.d 2000 mikrometer.
- d. Beban jatuhan dengan rentang 10 kg s.d 20 kg yang bisa diangkat pada ketinggian tertentu dan ketika dijatuhkan akan memberikan beban impak pada pelat pembebanan.
- b. Karet *buffer* yang bertujuan untuk menyalurkan beban impak ke pelat pembebanan dalam rentang waktu (16 s.d 30) mili detik.
- c. Prosesor yang dilengkapi dengan *Analog to Digital Converter* (ADC) dan program untuk mencatat data gelombang serta memprosesnya menjadi lendutan. Program yang digunakan memberikan keleluasaan kepada operator untuk memberikan data masukan berupa besaran Poisson's ratio, temperatur, kekakuan plat, lokasi, dan tipe perkerasan yang diuji.
- d. Prosesor harus mampu mencatat lendutan dengan akurasi  $\pm 1$  mikrometer.

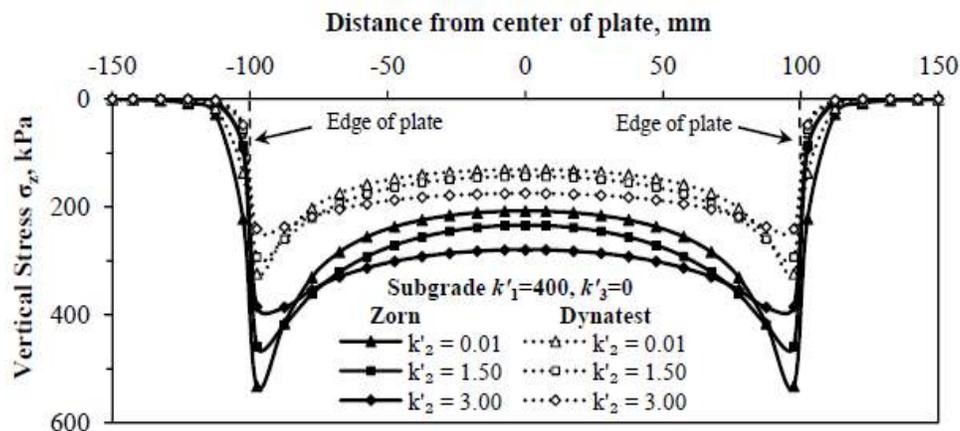
- e. Beban maksimum dan pengukuran lendutan harus tercatat selama perioda minimum 60 mili detik.
- f. Prosesor harus mampu mencatat beban maksimum dengan akurasi  $\pm 1$  kN.



**Gambar 21.** Skematik LWD

Berdasarkan konsep dan komponen yang telah dikeluarkan oleh Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tentang alat LWD lapangan yang menjadi dasar dalam penelitian ini untuk merancang alat LWD laboratorium.

Pada umumnya beban pada LWD Lapangan berupa beban statik atau dinamik yang diterapkan pada permukaan perkerasan melalui pelat beban. Defleksi permukaan perkerasan akibat beban tersebut diukur melalui satu seri sensor perpindahan letak (*displacement sensor*). Apabila gerakan permukaan perkerasan akibat beban semakin besar, maka menandakan sistem perkerasan mempunyai daya dukung rendah atau kurang kaku. Sebaliknya, bila gerakan permukaan perkerasan untuk beban yang sama lebih kecil, maka sistem perkerasan mempunyai kekakuan yang lebih tinggi. Kekakuan menunjukkan reaksi sistem perkerasan terhadap beban pada pelat uji, namun respon pada setiap lapisan perkerasan tidak dapat dikarakteristikan.



**Gambar 22.** Mangkuk defleksi

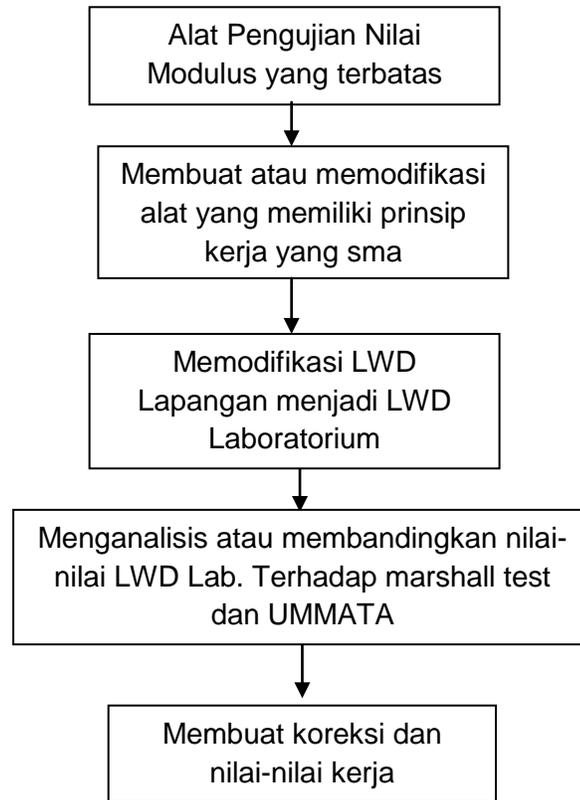
Dengan menggunakan data lendutan, yang biasanya disebut dengan mangkuk defleksi (*deflection bowl*), kekakuan lapisan pembentuk perkerasan dapat ditentukan dari hitungan balik, yaitu dengan menggunakan program-program komputer. Bentuk dari mangkuk defleksi, ditentukan oleh respon

perkerasan terhadap beban yang bekerja. Defleksi terbesar terjadi di bawah beban dan semakin menjauh dari pusat beban, defleksi semakin mengecil. Bentuk mangkuk defleksi diperlihatkan pada Gambar 22.

### **G. Kerangka Pikir Penelitian**

Gambar 23 memperlihatkan kerangka pikir penelitian ini. Konsep dasar pengembangan alat LWD laboratorium yang mengadopsi prinsip-prinsip kerja LWD lapangan. Terdiri dari beberapa hal:

1. Tidak banyaknya pilihan atau alternatif alat untuk mengukur modulus pada perkerasan aspal.
2. Alat-alat yang tersedia saat ini memiliki harga yang cukup mahal.
3. Perkembangan alat uji defleksi dan modulus versi lapangan (LWD dan FWD) sepertinya bisa diterapkan pada skala Laboatorium tentunya memodifikasi beberapa komponen dari alat tersebut.
4. Alat marshall test menghasilkan nilai Marshall Quation dan stabilitas. Dimana saat ini dalam hal desain lebih banyak mengarah ke pendekatan mekanistik emperis
5. Membuat alat yang bisa mobile, lebih praktis tentunya yang murah yang dapat dipakai salah satu instrument quality assurance.



**Gambar 23.** Kerangka pikir penelitian