

**TUGAS AKHIR**  
**RESPON LAPIS-LAPISAN TANAH AKIBAT GEMPA**

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia  
Untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh  
Derajat Sarjana Teknik Sipil



Oleh :

**ARIF SETIAWAN**

No. Mhs. : 93 310 004  
NIRM : 930051013114120004

**YULISMAR**

No. Mhs. : 93 310 128  
NIRM : 930051013114120125

**JURUSAN TEKNIK SIPIL**  
**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**  
**YOGYAKARTA**  
**1999**

**TUGAS AKHIR**  
**RESPON LAPIS-LAPISAN TANAH AKIBAT GEMPA**

Nama : ARIF SETIAWAN  
No. Mhs : 93 310 004  
Nirm : 930051013114120004

Nama : YULISMAR  
No. Mhs : 93 310 128  
Nirm : 930051013114120125

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Ir. Widodo, MSCE, Ph.D  
Dosen Pembimbing I

Ir. H. Ilman Noor, MSCE  
Dosen Pembimbing II

Tanggal:

Tanggal:

26/3/99

25/3 - 1999

## KATA PENGANTAR

*Bismillaahirrahmaanirrahiim*

*Assalaamu'alaikum Wr. Wb.*

Segala puji & syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat dan hidayah-Nya, serta Shalawat dan salam kepada junjungan Nabi besar Muhammad SAW, sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul "**RESPON LAPIS-LAPISAN TANAH AKIBAT GEMPA**".

Tugas Akhir ini merupakan persyaratan dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dengan selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, tidak lupa penyusun menyampaikan terima kasih atas segala bimbingan, saran dan pengarahan serta nasehat, terutama kepada:

1. Bapak Ir. Widodo, MSCE, Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, sekaligus selaku Dosen Pembimbing I.
2. Bapak Ir. H. Tadjuddin BMA, MS, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
3. Bapak Ir. H. Ilman Noor, MSCE, selaku Dosen Pembimbing II.
4. Bapak Ir. Sailendra, yang telah membantu dalam pembuatan program komputer.

5. Ayah, Ibu, Kakak dan adik serta seluruh keluarga yang telah memberikan dorongan moril dan materil sehingga terwujudnya Tugas Akhir ini.
6. Semua pihak yang telah membantu, yang tidak dapat penyusun sebutkan satu persatu, hingga tersusunnya Tugas Akhir ini.

Semoga segala bantuan dan bimbingan serta arahan yang telah diberikan mendapat pahala yang setimpal dari Allah SWT, Amiin.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu segala saran dan kritik untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini penyusun terima dengan senang hati.

Akhirnya penyusun berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penyusun khususnya dan pembaca pada umumnya.

*Billaahitaufiq walhidayah*

*Wassalaamu'alaikum Wr. Wb.*

Yogyakarta, Januari 1999

Penyusun

## MOTTO

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi  
dan silih bergantinya malam dan siang  
terdapat tanda-tanda bagi orang yang berakal.  
(Yaitu) orang-orang yang mengingat Allah  
sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring  
dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi.....”  
(Al Qur'an Surat Ali 'Imran : 190-191)

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.  
Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan),  
kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan ) yang lain”.  
(Al Qur'an Surat Alam Nasyrat : 6-7)

## DAFTAR ISI

	<i>Halaman</i>
LEMBAR JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
MOTTO.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xviii
INTISARI .....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Batasan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Manfaat .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
BAB III LANDASAN TEORI.....	6
3.1 Gempa Bumi .....	6
3.1.1 Pusat Gempa (Fokus), Jarak Episenter dan Kedalaman Fokus. ....	7
3.1.2 Jenis Gempa Ditinjau dari Penyebabnya.....	8

3.1.3 Kondisi Geologi dan Tanah Setempat .....	9
3.2 Tanah.....	13
3.2.1 Umum.....	13
3.2.2 Berat Volume Tanah dan Hubungan-hubungannya.....	13
3.2.3 Klasifikasi Tanah .....	17
3.2.4 Ukuran Partikel Tanah .....	20
3.2.5 Tanah Lempung .....	21
3.2.5.1 Mineral Lempung.....	21
3.2.5.2 Susunan Tanah Lempung.....	23
3.2.5.3 Sifat-sifat Umum Mineral Lempung.....	24
3.2.5.4 Sifat Rekayasa Mineral Lempung.....	26
3.2.5.5 Pengaruh Perubahan Volume pada Tanah Lempung.....	31
3.2.6 Konsolidasi Tanah.....	32
3.2.6.1 Lempung “Normally Consolidated” dan “Overconsolidated” .....	33
3.2.7 Dinamika Tanah.....	34
3.2.7.1 Lapis-Lapisan Tanah.....	34
3.2.7.2 Parameter Gerakan Tanah (Strong Motion Parameters).....	36
3.2.7.3 Karakteristik Statik dan Dinamik Tanah.....	36
3.3 Analisa Dinamik Struktur Tanah .....	43
3.3.1 Umum.....	43
3.3.1.1 Tinjauan Fundamental Analisa Dinamik .....	43
3.3.1.2 Pembebanan Dinamik .....	44

3.3.2	Sistem Derajat Kebebasan Tunggal .....	45
3.3.3	Sistem Derajat Kebebasan Banyak .....	46
3.3.3.1	Persamaan Differensial Gerakan MDOF .....	46
3.3.3.2	Matriks Massa, Kekakuan dan Dumping Ratio .....	47
3.4	Integrasi Numerik Dengan Metode “Central Difference” .....	48
3.5	Model Persamaan Keseimbangan Dinamik Untuk 4 Lapisan Tanah .....	50
BAB IV	METODE PENELITIAN .....	56
4.1	Lokasi Penelitian .....	56
4.2	Data-Data Yang Diperlukan .....	56
4.3	Cara Memperoleh Data .....	57
4.4	Pengolahan dan Analisis Data .....	57
BAB V	ANALISIS PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN .....	59
5.1	Data Lapisan Tanah .....	59
5.2	Lapisan Tanah Lempung .....	60
5.2.1	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Lempung Terendam Air .....	60
5.2.2	Pembahasan Lapisan Tanah Lempung Terendam Air .....	69
5.2.3	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Lempung Tidak Terendam Air .....	72
5.2.4	Pembahasan Lapisan Tanah Lempung Tidak Terendam Air ..	78
5.3	Lapisan Tanah Pasir .....	83
5.3.1	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir Terendam Air .....	83



5.3.2	Pembahasan Lapisan Tanah Pasir Terendam Air.....	92
5.3.3	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir Tidak Terendam Air .....	94
5.3.4	Pembahasan Lapisan Tanah Pasir Tidak Terendam Air .....	100
5.4	Lapisan Tanah Pasir dan Lempung .....	104
5.4.1	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Terendam Air.....	104
5.4.2	Pembahasan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Terendam Air .....	110
5.4.3	Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Tidak Terendam Air.....	113
5.4.4	Pembahasan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Tidak Terendam Air.....	120
5.5	Verifikasi Hasil Penelitian.....	125
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN.....	126
6.1	Kesimpulan.....	126
6.2	Saran-saran.....	127
	DAFTAR PUSTAKA.....	130
	LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

	<i>halaman</i>
Gambar 3.1 Hubungan antara lokasi gempa dan geometri plat tektonik.....	6
Gambar 3.2 Sumber gempa, epicentre dan jarak epicentre .....	7
Gambar 3.3 Potongan memanjang tanah .....	10
Gambar 3.4 Diagram fase tanah.....	14
Gambar 3.5 “U.S Bureu of Soil tiangular classification chart” .....	18
Gambar 3.6 Mineral-mineral lempung.....	23
Gambar 3.7 Batas-batas Atterberg .....	27
Gambar 3.8 Variasi volume dan kadar air pada kedudukan batas cair, batas plastis dan batas susutnya.....	29
Gambar 3.9 Massa tergumpal pada lapisan horizontal tanah .....	35
Gambar 3.10 Tegangan geser lawan regangan geser pada elemen/sampel tanah .....	39
Gambar 3.11 Nilai N Equivalent .....	42
Gambar 3.12 Sistem SDOF tergumpal yang mengalami translasi dasar tegar ...	43
Gambar 3.13 Perbedaan dasar antara beban statik dan dinamik.....	44
Gambar 3.14 Model matematis untuk sistem berderajat kebebasan tunggal .....	45
Gambar 3.15 Sistem dinamis struktur tanah MDOF 2 Lapis.....	47
Gambar 3.16 Derivatif pertama dengan metode “central difference”.....	49
Gambar 3.17 Sistem dinamis struktur tanah MDOF 4 Lapis.....	50

Gambar 5.1	Propil lapisan tanah .....	59
Gambar 5.2	Propil tanah lempung terendam air.....	60
Gambar 5.3	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 .....	65
Gambar 5.4	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2.....	66
Gambar 5.5	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3.....	67
Gambar 5.6	Percepatan tanah maksimum lempung terendam air.....	68
Gambar 5.7	Normalisasi Percepatan tanah maksimum lempung terendam air .....	68
Gambar 5.8	Propil tanah lempung tidak terendam air .....	72
Gambar 5.9	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1.....	74
Gambar 5.10	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2.....	75
Gambar 5.11	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3.....	76
Gambar 5.12	Percepatan tanah maksimum lempung tidak terendam air.....	77
Gambar 5.13	Normalisasi Percepatan tanah maksimum lempung tidak terendam air .....	77
Gambar 5.14	Percepatan tanah maksimum lempung terendam air dan tidak terendam air.....	81
Gambar 5.15	Propil tanah pasir terendam air .....	83
Gambar 5.16	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 .....	88
Gambar 5.17	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2.....	89
Gambar 5.18	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3.....	90
Gambar 5.19	Percepatan tanah maksimum pasir terendam air.....	91
Gambar 5.20	Normalisasi Percepatan tanah maksimum pasir terendam air .....	91

Gambar 5.21	Propil tanah pasir tidak terendam air .....	94
Gambar 5.22	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 .....	96
Gambar 5.23	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2 .....	97
Gambar 5.24	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3 .....	98
Gambar 5.25	Percepatan tanah maksimum pasir tidak terendam air .....	99
Gambar 5.26	Normalisasi Percepatan tanah maksimum pasir tidak terendam air .....	99
Gambar 5.27	Percepatan tanah maksimum pasir terendam air dan tidak terendam air .....	103
Gambar 5.28	Propil tanah pasir dan lempung terendam air .....	104
Gambar 5.29	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 .....	106
Gambar 5.30	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2 .....	107
Gambar 5.31	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3 .....	108
Gambar 5.32	Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung terendam air ... .....	109
Gambar 5.33	Normalisasi Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung terendam air .....	109
Gambar 5.34	Propil tanah pasir dan lempung tidak terendam air .....	113
Gambar 5.35	Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 .....	116
Gambar 5.36	Percepatan tanah akibat gempa Montana 2 .....	117
Gambar 5.37	Percepatan tanah akibat gempa Montana 3 .....	118
Gambar 5.38	Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung tidak terendam air .....	119

Gambar 5.39	Normalisasi Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung tidak terendam air.....	119
Gambar 5.40	Percepatan tanah maksimum pasir terendam air dan tidak terendam air .....	124

## DAFTAR TABEL

		<i>halaman</i>
Tabel 3.1	Definisi dan istilah-istilah dalam tanah.....	15
Tabel 3.2	Nilai $e_{maks}$ , $e_{min}$ , $\phi$ dan berat satuan kering.....	17
Tabel 3.3	Klasifikasi tekstur tanah berdasarkan "U.S. Department of Agricultur Soil Classification".....	19
Tabel 3.4	Klasifikasi tanah sistem AASHTO .....	20
Tabel 3.5	Batasan ukuran golongan tanah .....	21
Tabel 3.6	Aktifitas mineral lempung .....	25
Tabel 3.7	Nilai indeks plastisitas dan macam tanah .....	30
Tabel 3.8	Hubungan antara batas Atterberg dan potensi perubahan volume .....	32
Tabel 3.9	Sudut gesek tanah nonkohesif hasil penyelidikan di lapangan .....	38
Tabel 3.9	Nilai PI dan nilai k .....	40
Tabel 3.10	Nilai "dumping ratio" untuk beberapa jenis tanah.....	42
Tabel 5.1	Hasil perhitungan Gmax lapisan tanah lempung terendam air .....	62
Tabel 5.2	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah lempung terendam air .....	62
Tabel 5.3	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah lempung terendam air .....	63
Tabel 5.4	Hasil perhitungan "dumping ratio" lapisan tanah lempung terendam air.....	64

Tabel 5.5	Hasil perhitungan $G_{max}$ lapisan tanah lempung tidak terendam air .....	73
Tabel 5.6	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah lempung tidak terendam air.....	73
Tabel 5.7	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah lempung tidak terendam air.....	73
Tabel 5.8	Hasil perhitungan “dumping ratio” lapisan tanah lempung tidak terendam air.....	73
Tabel 5.9	Hasil perhitungan $G_{max}$ lapisan tanah pasir terendam air .....	85
Tabel 5.10	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir terendam air .....	85
Tabel 5.11	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah pasir terendam air ..	86
Tabel 5.12	Hasil perhitungan “dumping ratio” lapisan tanah pasir terendam air .....	87
Tabel 5.13	Hasil perhitungan $G_{max}$ lapisan tanah pasir tidak terendam air ..	95
Tabel 5.14	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir tidak terendam air .....	95
Tabel 5.15	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah pasir tidak terendam air .....	95
Tabel 5.16	Hasil perhitungan “dumping ratio” lapisan tanah pasir tidak terendam air.....	95
Tabel 5.17	Hasil perhitungan $G_{max}$ lapisan tanah pasir dan lempung terendam air .....	104

Tabel 5.18	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir dan lempung terendam air.....	105
Tabel 5.19	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah pasir dan lempung terendam air.....	105
Tabel 5.20	Hasil perhitungan “dumping ratio” lapisan tanah pasir dan lempung terendam air.....	105
Tabel 5.21	Hasil perhitungan Gmax lapisan tanah pasir dan lempung tidak terendam air.....	114
Tabel 5.22	Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir dan lempung tidak terendam air.....	114
Tabel 5.23	Hasil perhitungan mode shape lapisan tanah pasir dan lempung tidak terendam air.....	114
Tabel 5.24	Hasil perhitungan “dumping ratio” lapisan tanah pasir dan lempung tidak terendam air.....	115



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Diagram alur
- Lampiran 2 Program komputer
- Lampiran 3 Verifikasi hasil penelitian

## DAFTAR NOTASI

- $D = \xi$  = damping ratio
- $e$  = Angka pori
- $f$  = Frekuensi (Putaran per detik)
- $G_s$  = Berat jenis tanah
- $G_{mak}$  = Modulus geser ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $g$  = Percepatan gravitasi ( $\text{cm/dt}^2$ )
- $h$  = Tebal lapisan tanah (cm)
- $\gamma$  = Berat volume tanah ( $\text{gr/cm}^3$ )
- $\gamma_w$  = Berat volume air ( $\text{gr/cm}^3$ )
- $\gamma'$  = Berat volume tanah jenuh air ( $\text{gr/cm}^3$ )
- $K$  = Kekakuan ( $\text{kg/cm}$ )
- $K_o$  = Koefisien tekanan horisontal tanah saat diam
- $[K]$  = Matrik Kekakuan
- $m$  = Massa ( $\text{kg cm}^2/\text{dt}$ )
- $[M]$  = Matrik Massa
- $N$  = Number equivalent of cycles at  $0.65 \tau_{\max}$
- OCR = Over consolidation ratio
- PI = Indeks Plastisitas (%)
- $\varphi$  = sudut geser tanah ( $^\circ$ )
- $\phi$  = Mode shape

- $T$  = Periode getar (dt)  
 $\Gamma$  = Partisipasi setiap mode  
 $\Delta t$  = Selisih waktu gempa (dt)  
 $\bar{\sigma}_1$  = Tegangan efektif vertikal (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\bar{\sigma}_0$  = Tegangan kekang vertikal (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\omega$  = Frekuensi alam (Rad/dt)  
 $\ddot{y}$  = Percepatan tanah (cm/dt<sup>2</sup>)  
 $y$  = Simpangan tanah (cm)  
 $\ddot{z}$  = Modal amplitudo

## **Intisari**

*Respon lapis-lapisan tanah akibat gempa merupakan suatu parameter gerakan tanah akibat gempa, yang mana pada umumnya gerakan tanah akibat gempa tersebut lebih banyak ditunjukkan pada percepatan tanah dari pada kecepatan dan simpangan permukaan tanah.*

*Analisis yang dilakukan terhadap tanah endapan dengan ketebalan 4000 cm, dengan menggunakan respon riwayat waktu gempa Montana 1, 2 dan 3 yang memiliki durasi gempa yang berbeda. Penyelesaian perhitungan dengan menggunakan metode analisa dinamika struktur "Multi Degree Of Freedom", dengan bantuan bahasa program Qbasic.*

*Hasil analisis perhitungan menunjukkan bahwa percepatan tanah pada permukaan tanah, baik jenis tanah lempung, tanah pasir maupun campuran tanah lempung & pasir dengan kondisi terendam & tidak terendam air, mengalami kenaikan (amplifikasi) nilai percepatan tanah mencapai 150%.*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada kenyataannya gempa seringkali terjadi di Indonesia, baik dalam ukuran yang tidak terasa oleh orang awam maupun gempa yang ukurannya cukup besar yang dapat merusakkan bangunan. Gempa yang ukurannya kecil, umumnya frekwensi kejadiannya bisa berjumlah ribuan kali setiap tahun.

Agar dapat memahami secara baik tentang konsep bangunan tahan gempa, maka perlu diketahui mekanisme terjadinya gempa dan segala akibatnya baik respon tanah akibat gempa maupun respon bangunan akibat gempa tersebut.

Apabila terjadi gempa bumi, maka pertama-tama yang merasakan getaran adalah tanah di sekeliling pusat gempa. Getaran akibat gempa kemudian disebarkan ke segala penjuru sampai pada ke lokasi pencatat gempa di permukaan tanah. Selama getaran menjalar dari pusat gempa sampai ke permukaan tanah, maka faktor tanah sebagai penghantar getaran merupakan parameter penting.

Pada kenyataannya tanah bukan material kaku dan tidak terikat penuh dengan struktur utama. Tanah merupakan media perambatan getaran gempa yang mempunyai kekakuan dan peredaman yang bervariasi, tergantung pada jenis tanah parameter-parameter di dalamnya.

Beberapa parameter yang penting mengenai jenis tanah tersebut meliputi keadaan geologi secara lokal dan kondisi tanah tertentu, akan menyebabkan respon tanah akibat gempa menjadi berlainan. Dengan keadaan seperti itu maka respon bangunan akibat gempa di beberapa tempat juga akan berbeda antara satu dengan yang lain.

Untuk dapat memahami respon tanah ini diperlukan pengetahuan tentang ilmu-ilmu pendukung antara lain yaitu analisa numerik, persamaan differensial, matriks, dan pemograman komputer. Oleh karena itu studi pustaka ini akan berusaha sedapat mungkin menjawab permasalahan tersebut dengan menjabarkan metoda analisis dinamik yang mulai dari pemahaman persamaan dasar yaitu persamaan gerak, persamaan-persamaan berderajat kebebasan tunggal, persamaan-persamaan berderajat banyak, matriks kekakuan struktur. Persamaan-persamaan tersebut dipakai untuk menghitung percepatan tanah akibat beban dinamis atau gempa.

## **1.2. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penulisan ini dilakukan agar analisis menjadi sederhana dan lebih mudah dipahami tetapi diupayakan tetap realistis. Batasan tersebut disebabkan pula oleh keterbatasan referensi dan sarana analisis yang ada seperti keterbatasan kemampuan komputer pengolah data dan ketelitian program hitungan.

Selain hal tersebut di atas, mengingat permasalahan mengenai pemakaian serta pengembangan analisis dinamik ini sangat kompleks ditambah keterbatasan

waktu dan kemampuan penulis, maka objek permasalahan akan dibatasi. Pembatasan permasalahan tersebut meliputi hal-hal sebagai berikut ini :

1. Tanah tanpa beban dan evaluasi pengaruhnya pada karakteristik gelombang getaran yang merambat ke atas dari batuan dasar ke permukaan tanah.
2. Sistem tanah berlapis secara horizontal dengan tebal tanah endapan 4000 cm yang terletak di atas lapisan batu keras atau di atas lapisan tanah dasar.
3. Percepatan tanah yang dianalisis adalah tanah endapan yang mempunyai jumlah lapisan 4 lapis.
4. Jenis tanah yang dianalisis berupa tanah pasir, tanah lempung dan campuran tanah pasir dan tanah lempung.
5. Gempa rencana yang dipakai adalah respon riwayat waktu gempa Montana.
6. Modulus geser yang dipakai adalah modulus geser maksimum ( $G_{mak}$ ) dan "dumping ratio" yang dipakai adalah damping ratio maksimum ( $D_{mak}$ ).

### **1.3 Tujuan**

Tujuan dari analisis ini adalah untuk menghitung dan menganalisa percepatan tanah pada permukaan tanah tanpa beban akibat gempa setelah melalui berbagai macam properti tanah.

### **1.4 Manfaat**

Manfaat penulisan analisis ini adalah untuk pengembangan analisis dinamik struktur di lapangan maupun sebagai bahan masukan dalam penanganan kasus yang melibatkan faktor tanah dalam analisis struktur, yang pada akhirnya merupakan bagian untuk mengembangkan metode analisis yang lebih realistis dalam mencapai optimasi perencanaan bangunan tahan gempa.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Ray W. Clough & J. Penzien (1982) menyatakan jika gerak gempa bumi pada batuan dasar yang dasarnya lapisan tanah diketahui, gerak tanah-bebas dapat diperoleh dengan memperlakukan lapisan tanah persis seperti suatu sistem struktur dimana gerak tumpuannya diketahui. Dengan menggunakan model yang didiskritisasi dan disesuaikan dengan bentuk geometrik tumpukan tanah, seperti dijelaskan di atas dan mengasumsikan bahwa masukan gempa bumi adalah translasi dasar-tegar, respon pada permukaan tanah dapat dihitung dengan persamaan-persamaan.

Werner (1976) mengatakan bahwa representasi terbaik atas gerakan tanah akibat gempa adalah riwayat waktu percepatan tanah (ground acceleration time history). Percepatan tanah akibat gempa direkam secara lengkap menurut fungsi waktu artinya direkam selama terjadinya gerakan tanah.

Widodo (1995) menyatakan bahwa peristiwa amplifikasi percepatan tanah dari dasar tanah keras sampai permukaan tanah dapat diketahui lewat rekaman percepatan tanah akibat gempa maupun dengan analisis.

Gelombang gempa yang merambat pada tanah aluvial ternyata lebih lambat dari pada gelombang yang merambat pada tanah dasar yang lebih padat,



Okamoto (1973). Selanjutnya Okamoto (1973) menyatakan bahwa periode getar tanah akan dipengaruhi oleh jenis, susunan lapis, kepadatan dan ukuran gempa.

Okamoto (1973) untuk percepatan mengatakan bahwa pada periode gempa yang singkat, kadang-kadang percepatan yang terjadi pada tanah berbatu sedikit lebih besar. Namun demikian percepatan tanah keras berbatu lebih kecil dibanding dengan tanah lunak.

Percepatan tanah akibat gempa untuk berbagai jenis tanah pada kenyataannya berbeda satu dengan yang lain. Tanah lempung lembek tidak saja akan memberikan simpangan yang lebih besar tetapi juga akan memberikan percepatan tanah yang lebih besar, Okamoto (1973).

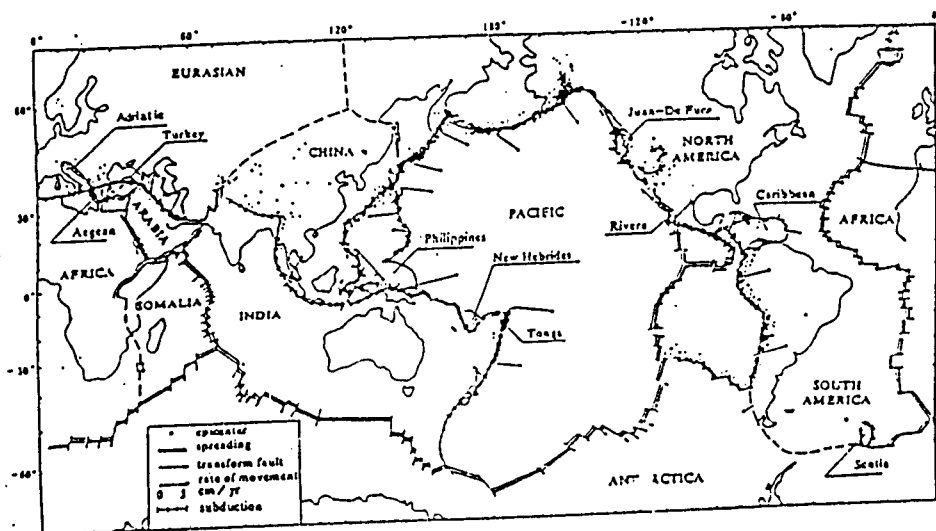
### BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah salah satu bencana alam yang sering membuat kerusakan baik kerusakan struktur tanah maupun bangunan yang berada di atasnya. Secara umum gempa dapat dikatakan sebagai guncangan-guncangan tanah dalam perut bumi yang terjadi secara alami.

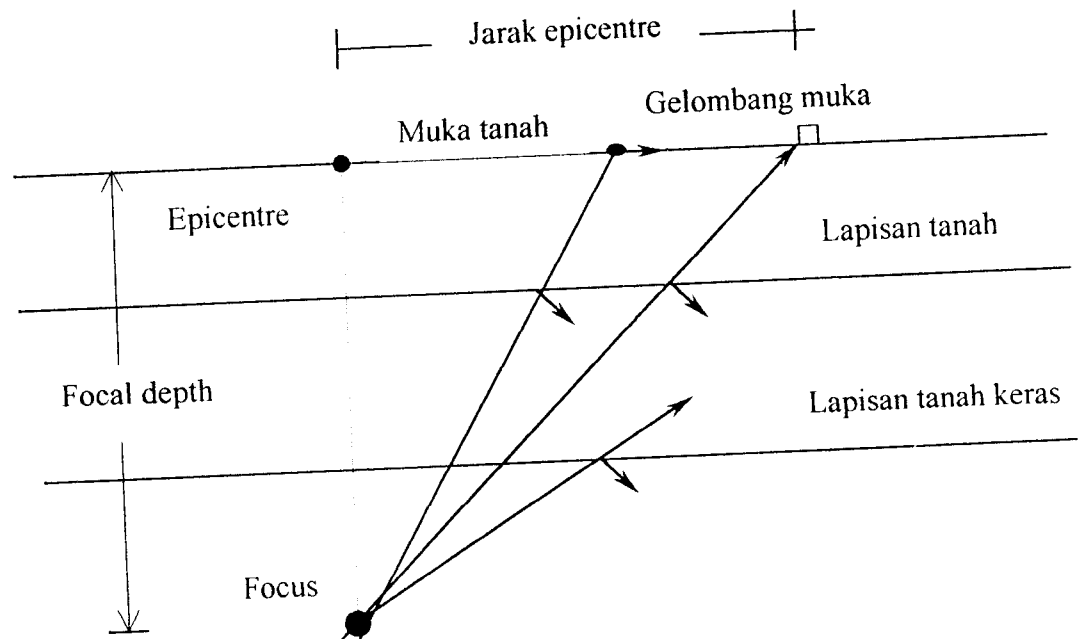
Pada umumnya gempa disebabkan oleh perpecahan dan pergeseran massa sepanjang retakan atau patahan (fault). Gelombang-gelombang seismik tersebut dapat dideteksi pada jarak yang jauh dari pusat gempa (fokus).



Gambar 3.1 Hubungan antara lokasi gempa dan geometri plat tektonik

### 3.1.1 Pusat Gempa (Fokus), Jarak Episenter dan Kedalaman Fokus

Tempat dimana gelombang energi gempa berasal secara umum dinamakan fokus. Fokus gempa umumnya berada di bawah tanah dengan kedalaman tertentu. Sedangkan tempat di permukaan tanah tepat di atas fokus disebut episenter. Kedalaman fokus dapat diperoleh dengan mengestimasi atau mengukur kedalaman dari episenter sampai dengan fokus. Jarak dari episenter sampai dengan stasiun pencatat gempa umumnya dinamakan jarak episenter.



Gambar 3.2. Sumber gempa, epicentre dan jarak epicentre

### 3.1.2 Jenis Gempa Ditinjau dari Penyebabnya

Ada beberapa jenis gempa yang dikategorikan berdasarkan sebab-sebab kejadiannya, gempa-gempa tersebut mulai dari durasi gempa yang relatif kecil sampai pada gempa yang besar. Jenis-jenis gempa itu adalah sebagai berikut ini:

#### a. Gempa Runtuhan (collapse earthquake)

Pada umumnya gempa bumi difahami apabila terjadi getaran tanah secara tiba-tiba baik yang dirasakan oleh manusia maupun yang tidak. Runtuhan lapisan tanah, baik runtuh di dalam gua-gua, tambang-tambang dalam batas-batas tertentu dapat saja mengakibatkan getaran pada tanah. Ledakan pada pekerjaan bawah tanah yang mengakibatkan runtuhnya lapisan batu/tanah juga dapat mengakibatkan getaran di dalam tanah. Getaran tanah yang terjadi mirip seperti gempa bumi walaupun intensitasnya relatif kecil.

#### b. Gempa Vulkanik (vulkanik earthquake)

Gempa vulkanik terjadi karena adanya aktifitas vulkanik yaitu proses keluarnya magma panas ke atas permukaan tanah. Getaran tanah yang ditimbulkan oleh proses keluarnya magma panas menyerupai gempa bumi walaupun intensitasnya lebih kecil dari gempa tektonik.

#### c. Gempa Ledakan (explosion earthquake)

Gempa ledakan terjadi karena adanya ledakan yang sangat besar di dalam tanah, misalnya percobaan ledakan nuklir di bawah tanah. Ledakan di bawah tanah dapat menghancurkan batuan/tanah disekelilingnya sekaligus menimbulkan getaran yang merambat ke segala arah sebagaimana getaran tanah akibat gempa.

d. Gempa Tektonik (tectonic earthquake)

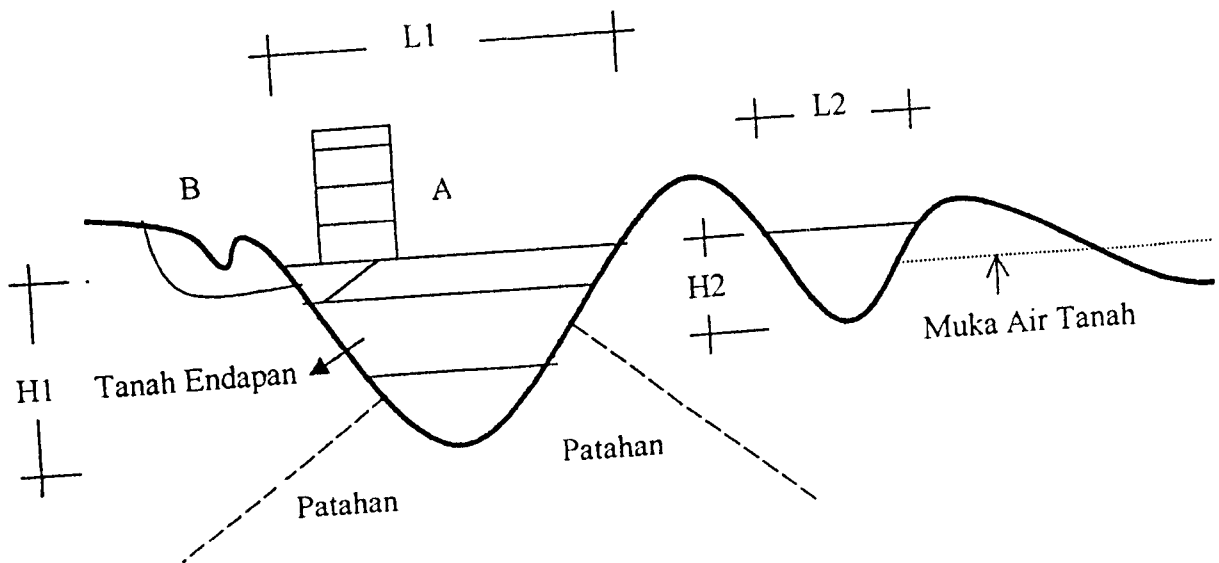
Gempa tektonik merupakan gempa yang umumnya paling besar dibanding dengan jenis gempa-gempa yang lain. Gempa bumi tektonik ini erat sekali hubungannya dengan gerakan dua plat tektonik yang saling beradu (convergent) maupun saling menggeser (shear). Dua plat tektonik yang saling beradu atau menggeser akan mengakibatkan tegangan, deformasi dan berarti akan terjadi akumulasi energi regangan (strain energy). Apabila tegangan batuan yang terjadi sudah sedemikian besar dan tidak lagi dapat ditahan oleh batuan maka kerusakan batuan akan terjadi, kerusakan batuan atau lapis kerak bumi yang terjadi secara tiba-tiba menimbulkan getaran yang disebarkan ke semua arah yang selanjutnya merambat sampai ke permukaan tanah. Getaran tanah tersebut dikenal sebagai gempa bumi tektonik.

### 3.1.3 Kondisi Geologi dan Tanah Setempat

Pengalaman menunjukkan bahwa kondisi geologi dan tanah setempat sangat mempengaruhi gerakan permukaan tanah saat terlanda gempa.

Pada umumnya permukaan tanah merupakan bahan endapan yang telah berlangsung lama, sehingga membentuk lapisan-lapisan tanah diatas suatu medium yang padat dan keras, lapisan-lapisan tanah tersebut dapat berupa satu macam atau dapat juga bermacam-macam dengan ketebalan tertentu.

Tanah endapan yang terletak di atas suatu lapisan tanah yang keras pada suatu daerah tertentu akan mempunyai perilaku tersendiri apabila gempa terjadi pada tanah tersebut. Untuk mengetahui perilaku respon tanah akibat gempa pada suatu daerah, maka diambil suatu potongan tanah seperti gambar dibawah ini,



Gambar 3.3. Potongan memanjang tanah

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap respon tanah akibat gempa adalah sebagai berikut ini:

- a. Panjang tanah endapan (L1 dan L2)

Semakin panjang /luas tanah endapan di atas lapisan tanah keras (L1) maka diantara respon tanah endapan dan respon tanah keras akan semakin berbeda. Besarnya respon tanah endapan mungkin lebih kecil atau bahkan lebih besar dibanding respon tanah keras, hal ini akan tergantung pada jenis, kondisi dan tebalnya lapisan tanah.

- b. Kedalaman tanah endapan (H1 dan H2)

Semakin dalam lapisan tanah endapan (H1 dan H2) maka semakin besar periode getar (T) lapisan tanah permukaan. Hal tersebut dikarenakan bahwa pada umumnya lapisan tanah semakin tidak padat mendekati permukaan tanah dan sebaliknya semakin padat pada lapisan yang semakin dalam. Tanah yang

tidak padat mempunyai kekakuan yang relatif tidak besar dan sebaliknya tanah yang padat mempunyai kekakuan yang besar. Dari kondisi tersebut maka untuk tanah yang semakin tidak padat dan H1 yang semakin besar maka menurut teori getaran:

$$\text{Frekuensi alam } \omega = \sqrt{\lambda \frac{k}{m}} \quad (3.1)$$

$$\text{Bila } k \text{ kecil, maka } \omega \text{ kecil, sedangkan } T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.2)$$

Bila  $k$  kecil, maka  $T$  (periode getar) menjadi besar.

Apabila periode getar ( $T$ ) besar dengan nilai frekuensi alam ( $\omega$ ) menjadi kecil, maka menurut teori getaran simpangan horizontal permukaan tanah akan menjadi besar, accelerasi (percepatan) tanah menjadi besar dan berarti pada endapan tanah yang semakin tebal, akan mempunyai kemungkinan perbesaran respon tanah atau terjadi amplifikasi respon tanah.

b. Perubahan jenis tanah secara horizontal

Apabila bangunan terletak pada dua atau lebih jenis tanah yang berbeda (misalnya bangunan A pada gambar di atas) maka respon yang timbul tidak akan sama sepanjang bangunan. Jenis tanah yang berbeda tersebut misalnya antara tanah urugan dengan tanah asli atau secara fisik memang jenis tanahnya berbeda. Apabila terjadi respon yang berbeda antara sisi yang satu terhadap sisi yang lain, maka akan terjadi kemungkinan saling desak dan tarik pada bangunan yang bersangkutan.

c. Keadaan tofograpi dan geologi lapisan tanah

Pada lapisan tanah keras/lapisan batu kadang-kadang juga tidak homogen dan ada kemungkinan adanya patahan pada lapisan keras tersebut, keadaan yang demikian akan berakibat adanya perbedaan respon tanah akibat gempa.

d. Deposit pada lereng

Defosit yang berbeda pada lereng, misalnya titik B pada gambar di atas mempunyai kemungkinan terjadi longsor pada saat terjadi gempa.

e. Kandungan air tanah

Kandungan air tanah mempunyai pangaruh positif terhadap runtuhnya tanah terutama tanah defosit pada lereng. Kandungan air tanah yang berlebihan akan mengurangi daya dukung tanah sehingga tanah menjadi tidak stabil apabila dibebani misalnya beban gempa.

f. Pengaruh jenis tanah

Gerakan permukaan tanah akan berbeda walaupun letaknya relatif berdekatan apabila jenis tanahnya berbeda. Pada tanah lempung yang lembek, percepatan tanah lebih besar pada tanah lempung yang lebih keras dan secara keseluruhan tanah yang lebih lembek memberikan efek respon yang lebih besar dari pada tanah yang keras.

Dengan demikian jelaslah bahwa getaran permukaan tanah saat terlanda gempa sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat maupun kondisi geologinya.



## 3.2 Tanah

### 3.2.1 Umum

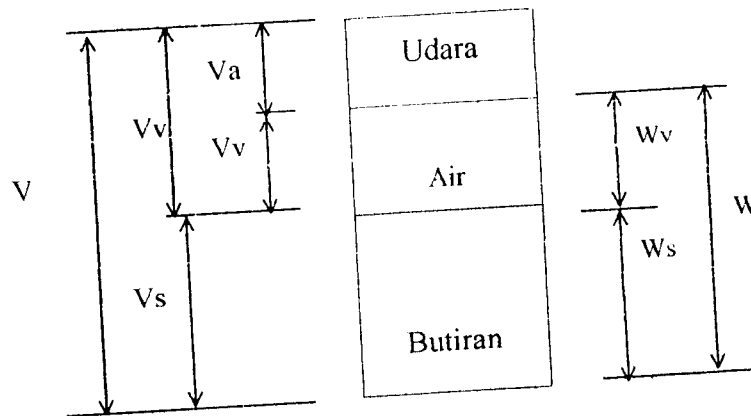
Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (loose), yang terletak di atas batuan dasar (bedrock).

Tanah selalu mempunyai peranan yang penting pada suatu lokasi pekerjaan konstruksi. Tanah adalah pondasi pendukung suatu bangunan, atau bahan konstruksi dari bangunan itu sendiri seperti tanggul atau bendungan, atau kadang-kadang sebagai sumber penyebab gaya luar pada bangunan, seperti tembok/dinding penahan tanah. Jadi tanah itu selalu berperan pada setiap pekerjaan teknik sipil.

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas yang telah ditentukan, akan tetapi istilah sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedangkan pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis.

### 3.2.2 Berat Volume Tanah dan Hubungan-hubungannya

Segumpal tanah dapat terdiri dari dua atau tiga bagian. Dalam tanah yang kering hanya terdiri dari dua bagian, yaitu butir-butir tanah dan pori-pori udara. Dalam tanah yang jenuh juga terdapat dua bagian, yaitu bagian padat atau butiran dan air pori. Dalam keadaan tidak jenuh, tanah terdiri dari tiga bagian, yaitu bagian padat atau butiran, pori-pori udara, dan air pori. Bagian-bagian tanah dapat digambarkan dalam bentuk diagram fase, seperti yang ditunjukkan Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram fase tanah

dengan :

- $V$  = Volume total
- $V_v$  = Volume pori
- $V_a$  = Volume udara
- $V_w$  = Volume air
- $W$  = Berat total
- $W_w$  = Berat air
- $W_s$  = Berat butiran

Definisi serta istilah-istilah yang dipakai untuk menyatakan berat isi, banyaknya pori, serta jumlah air dan udara dalam tanah, seperti ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Definisi dan istilah-istilah dalam tanah, (L.D Wesley, 1977)

Sifat	Simbol	Definisi
Berat isi tanah	$\gamma$	Perbandingan antara berat tanah seluruhnya dengan isi tanah seluruhnya.
Berat isi butir	$\gamma_s$	Perbandingan antara berat butir dengan isi butir
Berat isi air	$\gamma_w$	Perbandingan antara berat air dengan isi air
Berat isi kering	$\gamma_d$	Perbandingan antara berat butir dengan isi tanah seluruhnya.
Kadar air	$W$	Perbandingan antara berat air dengan berat butir tanah
Angka pori	$e$	Perbandingan antara isi pori dengan isi butir tanah
Porositas	$n$	Perbandingan antara isi pori dengan isi tanah seluruhnya
Berat jenis	$G$	Perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air
Derajat kejenuhan	$S_r$	Perbandingan antara isi air pori dengan isi pori

Hubungan-hubungan volume yang biasa digunakan dalam mekanika tanah adalah angka pori, porositas, dan derajat kejenuhan. Adapun hubungan-hubungannya adalah sebagai berikut ini.

a. Kadar air ( $W$ )

$$W = W_w / W_s \times 100\% \quad (3.3)$$

$$W = (e S_r \gamma_w) / (G \gamma_w) \quad (3.4)$$

$$W = (e S_r) / (G) \quad (3.5)$$

dimana:  $w G = e S_r$

b. Berat isi ( $\gamma$ )

$$\gamma = W / V \quad (3.6)$$

$$\gamma = (\gamma_w (G + e S_r)) / (1 + e) \quad (3.7)$$

$$\gamma = (\gamma_w (G + w G)) / (1 + e) \quad (3.8)$$

$$\gamma = (\gamma_w G(1 + w)) / (1 + e) \quad (3.9)$$

c. Angka pori ( $e$ )

$$e = V_v / V_s \quad (3.10)$$

$$e = ((\gamma_w G (1 + w)) / \gamma) - 1 \quad (3.11)$$

d. Berat isi kering ( $\gamma_d$ )

$$\gamma_d = W_s / V \quad (3.12)$$

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (3.13)$$

e. Porositas ( $n$ )

$$n = V_v / V \quad (3.14)$$

$$n = e / (1 + e) \quad (3.15)$$

f. Berat isi butir ( $\gamma_s$ )

$$\gamma_s = W_s / V_s \quad (3.16)$$

g. Derajat kejenuhan ( $S_r$ )

$$S_r = (V_w / V_v) \times 100\% \quad (3.17)$$

h. Berat volume basah ( $\gamma_b$ )

$$\gamma_b = \frac{G_s * \gamma_w * (1 + w)}{1 + e} \quad (3.18)$$

i. Berat volume tanah bila terendam air

$$\gamma_{eff} = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1 + e} \quad (3.19)$$

Nilai-nilai  $e_{maks}$ ,  $e_{min}$ , berat satuan dan sudut geser dalam untuk beberapa

jenis tanah,

Tabel 3.2. Nilai  $e_{maks}$ ,  $e_{min}$ ,  $\phi$  dan berat satuan kering, (J.E. Bowles, 1986)

Jenis tanah	Lepas			Padat		
	Berat satuan kering	$e_{maks}$	$\phi$	Berat satuan kering	$e_{min}$	$\phi$
Kerikil	16,0-18,0	0,62-0,44	32-36	18,0-20,0	0,44-0,30	35-50
Pasir kasar	15,0-17,5	0,73-0,50	32-38	17,5-19,6	0,50-0,33	35-48
Pasir berlempung	14,0-16,5	0,86-0,58	28-32	16,5-18,5	0,58-0,40	35-40
Pasir berlanau	12,6-15,5	1,05-0,68	28-32	15,5-17,5	0,68-0,49	32-38
Pasir halus	14,0-18,5	0,86-0,40	27-33	15,5-18,0	0,68-0,44	33-39
Kerikil berpasir	15,0-18,0	0,73-0,44	30-38	18,0-22,0	0,44-0,18	36-45
Pasir berkerikil	15,0-18,0	0,73-0,44	30-38	18,0-22,5	0,44-0,16	36-50
Lanau	14,0-15,5	0,86-0,68	20-30	15,5-17,5	0,68-0,49	25-32

### 3.2.3 Klasifikasi Tanah

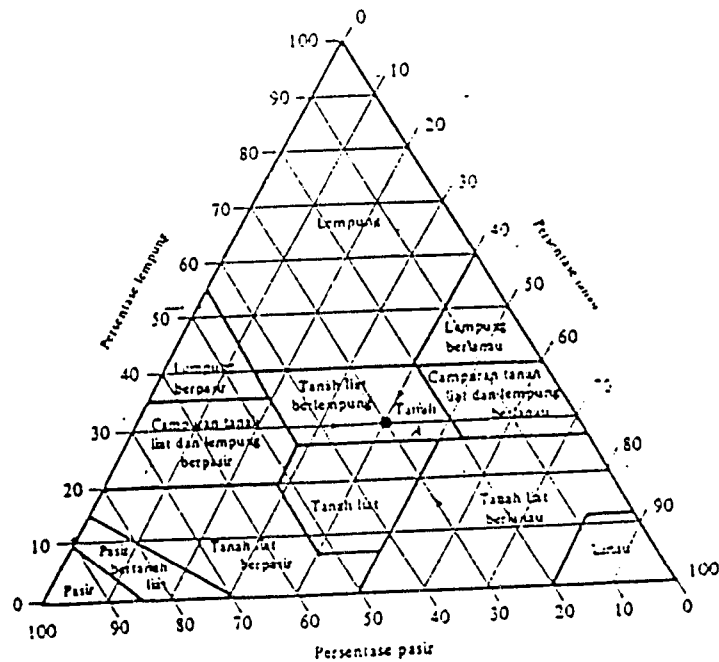
Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat yang serupa dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi untuk tujuan rekayasa didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitasnya.

### 1. Klasifikasi berdasarkan tekstur

Tekstur tanah merupakan keadaan permukaan tanah, dimana tekstur tanah ini dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir yang ada pada tanah. Dalam sistem klasifikasi ini tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya.

Klasifikasi menurut "U.S Bureau of Soils triangular classification chart" didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah seperti yang ditunjukkan gambar

3.5.



Gambar 3.5. "U.S Bureau of Soils triangular classification chart".(mengacu pada

D.S. Taylor, "Fundamentals of Soil Mechanics", Wiley, New York, 1948.)

Tabel 3.3. Klasifikasi tekstur tanah berdasarkan "U.S. Department of Agriculture Soil Classification."(R.M. Koerner,1985)

Diameter Butiran Tanah (mm)	
Pasir	2,00 – 0,05
Lanau	0,05 – 0,002
Lempung	< 0,002

## 2. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi tanah AASHTO ("American Assosiation of State Highway and Transportation Officials Classification") mengacu pada AASHTO "Standard Spesification for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing", Part II. 1982, berguna untuk menentukan kualitas tanah guna perencanaan timbunan jalan, "subbase" dan "subgrade". Sistem AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok, A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan hanya analisis saringan dan batas-batas Atterberg. Sistem Klasifikasi AASHTO, dapat dilihat dalam Tabel 3.4. Indeks kelompok ("group index") digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah-tanah dalam kelompoknya. Indeks kelompok dihitung dengan persamaan:

$$GI = (F - 35) [ 0,2 + 0,005 (LL - 40 ) ] + 0,01 (F - 15)( PI - 10) \quad ( 2.16 )$$

dengan:

GI = indeks kelompok ("group index")

F = persen material lolos saringan no. 200

LL = batas cair

PI = indeks plastis

Tabel 3.4. Klasifikasi tanah sistem AASHTO, (HC. Hardiyatmo, 1992)

Klasifikasi umum	Material granular ( <35% lolos saringan no.200 )						Tanah-tanah lanau - lempung ( >35% lolos saringan no.200 )				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Analisis saringan (% lolos)											
2.00 mm (no. 10)	50 maks	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 min	—	—	—	—	—	—	—	—
0.075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sisa traksi lolos saringan no. 40											
Batas cair (LL)	—	—	—	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	6 maks	—	np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (GI)	0	0	0	0	0	4 maks	4 maks	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang paling pada umumnya	pecahan batu, kerikil dan pasir		pasir halus	kerikil bertanau atau bertanpung dan pasir				tanah bertanau		tanah bertanpung	
Perkiraan umum sebagai dasar	sangat baik sampai baik						sedang sampai buruk				

Catatan: Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PI).  
 Untuk PI > 30, klasifikasinya A-7-5.  
 Untuk PI < 30, klasifikasinya A-7-6.  
 np = nonplastis.

### 3.2.4 Ukuran Partikel Tanah

Tanah secara umum dapat diklasifikasikan sebagai kerikil, pasir, lanau, dan lempung tergantung dari ukuran partikel yang dominan. Pada Tabel 3.5 diberikan batas rentang besar ukuran butiran tanah menurut beberapa spesifikasi.



Fraksi sangat halus tersusun dari butiran yang berukuran lebih kecil dari 1  $\mu\text{m}$ . Untuk dapat melihat ukuran butiran tanah yang sedemikian kecilnya harus menggunakan mikroskop elektron, sedang struktur molekul dapat dianalisis dengan menggunakan difraksi sinar-x.

Tabel 3.5. Batasan ukuran golongan tanah, (R.M. Koerner, 1985)

Klasifikasi	Ukuran Butiran Tanah (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
MIT	> 2	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002
USDA	> 2	2 - 0,05	0,05 - 0,002	< 0,002
AASHTO	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	< 0,002
USCS	7,62 - 4,75	4,75 - 0,075	< 0,0075	< 0,0075

### 3.2.5 Tanah Lempung

#### 3.2.5.1 Mineral Lempung

Lempung mempunyai diameter butir efektif lebih kecil dari 0,002 m, sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopik dan submikroskopik yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung dan mineral lainnya.

Fraksi tanah yang mempunyai diameter butir lebih kecil dari 0,002 mm ini dapat menimbulkan pengertian yang berbeda. Hal ini berkenaan dengan mineral lempung yang merupakan substansi kristal, terutama dihasilkan dari proses pelapukan kimia pada pembentukan mineral batuan, biasanya tidak terdapat

ukuran partikel besar (Yong dan Warkentin, 1975). Istilah lempung bila dihubungkan dengan komposisi ukuran fisik (clay size) adalah partikel yang ukurannya lebih kecil dari 0,002 mm, sedangkan mineral lempung hubungannya dengan komposisi dari ukuran mineral yang dikandungnya.

Ditinjau dari segi mineral, yang disebut dengan tanah lempung dan mineral lempung adalah tanah yang mempunyai ukuran partikel mineral tertentu dan mempunyai sifat plastis bila ada pengaruh air (Grim, 1953) mengacu pada "Clay Mineralogy". Mineral lempung menunjukkan karakteristik gaya tarik menarik dengan air dan menghasilkan plastisitas yang tidak ditunjukkan oleh material lainnya walaupun material tersebut berukuran lempung. Dengan demikian kwarsa, felspar, dan mika yang berukuran submikroskopik, meskipun mempunyai ukuran partikel yang sangat kecil tidak dapat disebut sebagai tanah lempung, karena umumnya tidak dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis pada tanah.

Secara kimiawi mineral lempung merupakan ikatan dari "hydros allumino-silicate" yaitu ikatan antara air, aluminium atau magnesium dan silika ditambah dengan ion-ion metal. Bentuk fisik mineral lempung jika dilihat dengan mikroskop elektron adalah kristal berbentuk "plates" atau lempengan dan "flakes" atau lembaran. Dilihat dari difraksi sinar-x, mineral-mineral lempung tersebut berupa lembaran kristal dan merupakan struktur atom yang berulang.

Sumber utama mineral lempung adalah pelapukan kimia dari batuan yang mengandung "felspar ortoklas", "felspar plagioklas", dan "mika" yang semuanya disebut dengan silikat aluminium kompleks. Pelapukan batuan ini menghasilkan

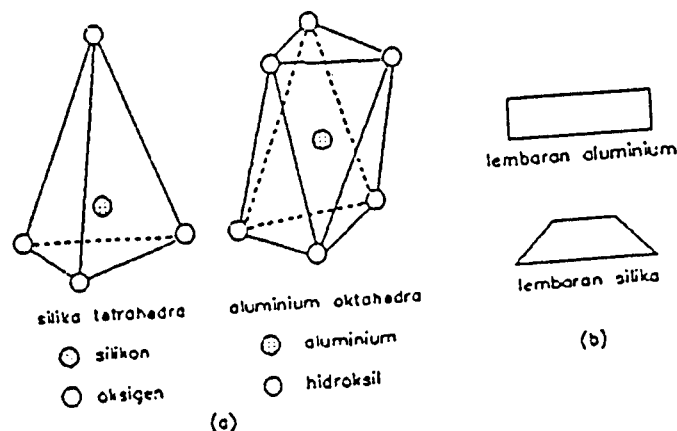
sejumlah besar mineral lempung dengan sifat daya gabung (affinity) yang sama terhadap air, tetapi dalam jumlah yang sangat berbeda.

### 3.2.5.2 Susunan Tanah Lempung

Pelapukan akibat reaksi kimia menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm, yang disebut mineral lempung. Partikel lempung dapat berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus. Oleh karena itu tanah lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Umumnya terdapat 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung (Kerr, 1959).

Susunan kebanyakan tanah lempung terdiri dari "silika tetrahedra" dan "alumina oktahedra", seperti tampak pada Gambar 3.6a. "Silika" dan "alumina" secara parsial dapat digantikan oleh elemen lain dalam kesatuannya, keadaan ini disebut dengan "isomorf substitution". Kombinasi dari susunan kesatuan dalam bentuk susunan lempeng disajikan dalam simbol pada Gambar 3.6b.

Unit "silika" terdiri dari satu atom silikon dikelilingi oleh empat atom oksigen. Unit "alumina" terdiri dari sebuah atom aluminium yang dikelilingi oleh enam atom oksigen.



Gambar 3.6 Mineral-mineral lempung

### 3.2.5.3 Sifat-sifat Umum Mineral Lempung

#### 1. Hidrasi

Partikel lempung selalu terhidrasi yaitu dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air yang disebut air terserap (absorbed water). Lapisan ini umumnya mempunyai tebal dua molekul dan disebut dengan difusi (diffusi layer) atau lapisan difusi ganda. Lapisan air ini dapat hilang pada temperatur yang lebih tinggi dari 60 °C. sampai dengan 100 °C dan akan mengurangi plastisitas tanah. Pada umumnya jika lapisan ganda mengalami dehidrasi pada temperatur rendah, sifat plastisitasnya dapat dikembalikan lagi dengan cara mencampurkan air yang cukup dan dicuring selama 24 jam hingga 48 jam.

#### 2. Aktivitas

Tepi mineral lempung mempunyai muatan negatif, ini menyebabkan terjadinya usaha untuk menyeimbangkan muatan dengan tarikan kation. Aktifitas digunakan pula sebagai indeks untuk mengidentifikasi kemampuan mengembang (swelling) tanah lempung (Tabel 3.6). Aktifitas berkaitan pula dengan perubahan volume yang mana dengan sifat aktifnya lempung akan menyerap air di sekelilingnya yang menyebabkan lempung bersifat plastis.

Tabel 3.6. Aktifitas mineral lempung mengacu pada "Fundamentals of Soil Behavior", (Mitchell,1976)

Mineral	Aktifitas (A)
Montmorillonite	1 – 7
Illite	0,5 – 1
Kaolinite	0,5
Halloysite (2H <sub>2</sub> O)	0,5
Halloysite (4H <sub>2</sub> O)	0,1
Attapulgitic	0,5 – 1,2
Allophane	0,5 – 1,2

Skempton (1953) mengacu pada "The Colloidal Activity of Clays, Proceedings 3 rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", London, Vol. 1, 57-61. mendefinisikan parameter A yang disebut aktifitas sebagai:

$$A = PI / C \quad (3.20)$$

dengan PI adalah "plasticity index" dan C adalah presentase berat dari fraksi ukuran lempung (yaitu persen dari berat yang lebih kecil dari ukuran 0,002 mm).

### 3. Flokulasi dan dispersi

Struktur lempung bersifat terdispersi yaitu terbentuk oleh partikel-partikel lempung yang mengendap secara individu. Lempung yang terdispersi ini partikelnya akan saling berjauhan. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya jarak antara partikel-partikel, gaya tolak menolak antara partikel akan lebih besar daripada gaya tarik menariknya (ikatan Van Der Waals).

#### **4. Pengaruh Air**

Air akan menentukan sifat plastisitas lempung. Fenomena utama dari lempung adalah bahwa massanya yang telah mengering dari suatu kadar air awal mempunyai kekuatan yang cukup besar. Apabila bongkahan ini pecah menjadi partikel-partikel kecil, bahan tersebut akan berperilaku sebagai bahan yang tidak kohesif. Apabila air ditambahkan kembali, bahan tersebut akan menjadi plastis dengan kekuatan yang lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan bongkahan yang kering. Apabila lempung basah ini dikeringkan lagi, akan terbentuk bongkahan yang kuat dan keras dan kuat. Terlihat bahwa kerapatan yang lebih tinggi akibat pemampatan, akan memberikan kekuatan yang sangat tinggi. Dengan demikian air akan mempunyai pengaruh yang penting terhadap mineral lempung.

##### **3.2.5.4 Sifat Rekayasa Mineral Lempung**

Mineral lempung sangat dipengaruhi oleh faktor komposisi dan pengaruh lingkungan. Untuk itu perlu diketahui variasi sifat rekayasannya. Sifat-sifat rekayasa mineral lempung dapat diketahui dari tes batas-batas Atterberg, permeabilitas, kompresibilitas, dan pengaruh perubahan volumenya.

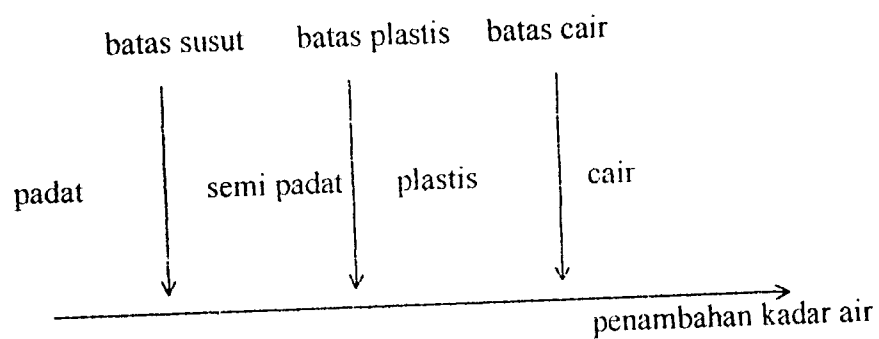
#### **1. Batas-batas Atterberg**

Suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel lempung dalam tanah. Istilah plastisitas digambarkan sebagai kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak.

Tergantung pada kadar airnya, tanah mungkin berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat. Kedudukan kadar air transisi bervariasi pada berbagai jenis

tanah. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Konsistensi tergantung pada gaya tarik antara partikel mineral lempungnya. Sembarang pengurangan kadar air menghasilkan berkurangnya tebal lapisan lapisan kation dan terjadi penambahan gaya tarik antar partikelnya. Bila tanah dalam kedudukan plastis, besarnya jaringan gaya antar partikelnya bebas untuk relatif menggelincir antara satu dengan lainnya, dengan kohesi antaranya tetap terpelihar. Pengurangan kadar air juga menghasilkan pengurangan volume tanah. Sangat banyak tanah berbutir halus yang ada di alam dalam kedudukan plastis.

Atterberg (1911), memberikan cara untuk menggambarkan batas-batas konsistensi dari tanah berbutir halus dengan cara mempertimbangkan kandungan kadar airnya. Batas-batas tersebut adalah batas batas cair, batas plastis dan batas susut. Kedudukan batas konsistensi dari tanah kohesif disajikan dalam Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Batas-batas Atterberg

### a. Batas Cair (“Liquid Limit”)

Batas cair (LL), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.

Batas cair biasanya ditentukan dari pengujian Cassagrande (1948) mengacu pada “Classification and identification of soils”. Presentase kadar air yang dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan, sesudah 25 pukulan, didefinisikan sebagai batas cair tanah tersebut. Batas cair juga dapat dicari dengan melakukan pengujian metoda “cone penetrometer”. Metoda ini berdasarkan pada pengukuran penetrasi konus dengan massa tertentu ke dalam contoh tanah. Kadar air pada penetrasi 20 mm adalah batas cairnya (British Standard).

### b. Batas Plastis (“Plastic Limit”)

Batas plastis (PL), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu presentase kadar air tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

### c. Batas Susut (“Shrinkage Limit”)

Batas susut (SL), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu presentase kadar air di mana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanahnya. Batas susut dinyatakan dalam persamaan:

$$SL = \left[ \left\{ \frac{m_1 - m_2}{m_2} \right\} - \left\{ \frac{(v_1 - v_2)\gamma_w}{m_2} \right\} \right] \quad (3.21)$$

dengan:

$m_1$  = berat tanah basah dalam cawan percobaan (gr)



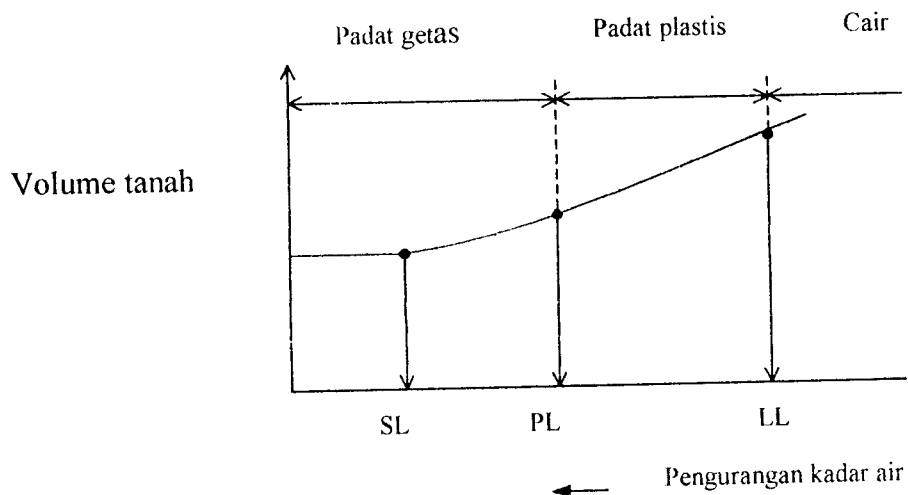
$m_2$  = berat tanah kering oven (gr)

$v_1$  = volume tanah basah dalam cawan ( $m^3$ )

$v_2$  = volume tanah kering oven ( $m^3$ )

$\gamma_w$  = berat jenis air

Gambar 3.8 menyajikan hubungan variasi kadar air dan volume total dari tanah pada kedudukan batas cair, batas plastis, dan batas susutnya. Batas-batas Atterberg sangat berguna untuk identifikasi dan klasifikasi tanah. Batas-batas ini sering digunakan secara langsung dalam spesifikasi, guna mengontrol tanah yang digunakan untuk struktur urugan tanah.



Gambar 3.8 Variasi volume dan kadar air pada kedudukan batas cair, batas plastis, dan batas susutnya

#### d. Indeks Plastisitas (“Plasticity Index”)

Indeks plastis (PI) adalah selisih batas cair dan batas plastis,

$$PI = LL - PL$$

(3.22)

Indeks plastis akan merupakan interval kadar air di mana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, indeks plastis menunjukkan sifat keplastisan tanahnya. Jika tanah mempunyai interval kadar air daerah plastis yang kecil, maka keadaan ini disebut dengan tanah kurus. Kebalikannya, jika tanah mempunyai interval kadar air daerah plastis yang besar disebut tanah gemuk. Batasan mengenai indeks plastis, sifat macam tanah, dan kohesinya diberikan oleh Atterberg terdapat dalam tabel 3.7.

Tabel 3.7 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah, (HC. Hardyatmo,1992)

PI	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Nonplastis	Pasir	Nonkohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 – 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

#### e. Indeks Cair (“Liquidity Index”)

Kadar air tanah asli relatif pada kedudukan plastis dan cair dapat didefinisikan oleh indeks cair, LI, menurut persamaan:

$$LI = (W_N - PL) / (LL - PL) = (w - PL) / PI \quad (3.23)$$

Dengan  $W_N$  adalah kadar air aslinya. Untuk lapisan tanah asli dalam kedudukan plastis, nilai  $LL > W_N > PL$ .

Untuk setiap mineral lempung akan memberikan harga batas cair lebih besar dari batas plastisnya. Variasi dari harga batas cair untuk setiap kelompok mineral lempung yang berbeda lebih besar dari variasi harga batas plastis.

## **2. Permeabilitas**

Permeabilitas adalah kemampuan air untuk mengalir melalui suatu massa tanah. Permeabilitas dari lempung ditentukan oleh komposisi mineral, ukuran partikel dan distribusi angka pori tanah serta karakteristik angka pori. Lempung mempunyai porositas besar, tetapi hampir tidak permeabel (tidak tembus air), karena rongga lempung sangat kecil. Dengan memperhatikan mineral lempung yang dominan, maka harga mineral lempung "montmorillonite" lebih kecil dari "illite" dan "illite" lebih kecil dari "kaolinite". Hal ini didasarkan dari permeabilitas mineral "montmorillonite" yang akan menjadi lebih kecil dari  $1 \times 10^{-5}$  cm/det atau dapat menjadi lebih kecil dari  $1 \times 10^{-10}$  cm/det.

### **3.2.5.5 Pengaruh Perubahan Volume pada Tanah Lempung**

Setiap tanah kohesif akan mudah mengalami penyusutan sehingga menyebabkan terjadinya perubahan volume, terutama pada tanah yang mengandung mineral lempung "montmorillonite". Lempung sebagai tanah ekspansif yaitu tanah yang mudah mengembang, mempunyai sifat sangat keras pada keadaan kering akibat tegangan penyusutan, bahkan pada kadar air yang kecil, tanah tersebut akan padat dan keras. Hal ini akan menyebabkan retakan-retakan akibat penyusutan, yang akan mempengaruhi tingkat kejenuhan tanah akibat infiltrasi dari permukaan.

Sifat pengembangan dan penyusutan tanah lempung yang menyebabkan perubahan volume pada umumnya tergantung pada sifat plastisitasnya. Semakin plastis mineral lempung akan semakin potensial untuk mengembang dan menyusut. Pada Tabel 3.8 dapat dilihat hubungan antara potensi perubahan volume terhadap indeks plastisnya. Jika tanah mempunyai indeks plastis lebih besar dari 20 maka perlu adanya perbaikan-perbaikan tanah dimana salah satunya dengan stabilisasi tanah. Bertambahnya kemampuan menyusut dan mengembang ini tergantung pada beberapa faktor yaitu: pengaturan partikel, kadar air awal dan tekanan yang ada.

Tabel 3.8 Hubungan antara batas Atterberg dan potensi perubahan volume, (J.E. Bowles, 1984)

Potensi Perubahan Volume	Indeks plastis		Batas susut (SL)
	Daerah kering	Daerah lembab	
Kecil	0 – 15	0 – 30	> 12
Sedang	15 – 30	30 – 50	10 – 12
Tinggi	> 30	> 50	< 10

### 3.2.6 Konsolidasi Tanah

Konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh yang berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanahnya.

### 3.2.6.1 Lempung “Normally Consolidated” dan “Overconsolidated”

Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses pengendapan. Pada proses pengendapannya, lempung akan mengalami konsolidasi ataupun penurunan akibat tekanan tanah yang mengendap di atasnya. Lapisan-lapisan tanah yang berada di atas ini suatu ketika mungkin akan hilang akibat proses alam. Hal semacam ini berarti tanah lapisan bawah pada suatu saat pada waktu tertentu dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat dari tekanan yang lebih besar dari tekanan yang bekerja sekarang. Lapisan semacam ini disebut lapisan “overconsolidated” (OC) atau konsolidasi berlebihan. Bila tegangan efektif yang bekerja sekarang adalah tegangan maksimumnya, maka endapan lempung ini disebut lempung pada kondisi “normally consolidated” (NC) atau terkonsolidasi normal.

Jadi lempung pada kondisi “normally consolidated”, bila tekanan prakonsolidasi ( $p_c'$ ) sama dengan tekanan overburden efektif ( $p_o'$ ). Sedang pada lempung “overconsolidated”, jika tekanan prakonsolidasi lebih besar dari tekanan overburden efektif yang ada pada waktu sekarang ( $p_c' > p_o'$ ). Nilai banding “overconsolidation” (“overconsolidation ratio”, OCR) didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan efektif yang ada, dinyatakan dalam persamaan :

$$\text{OCR} = \frac{p_c'}{p_o'} \quad (3.24)$$

Tanah “normally consolidated” mempunyai nilai OCR = 1, dan tanah dengan OCR > 1 adalah “overconsolidated”. Dan OCR < 1 adalah tanah yang dalam proses konsolidasi.

### 3.2.7 Dinamika Tanah

Banyak problem lapangan yang membutuhkan pengetahuan tentang sifat-sifat tanah yang menerima beban dinamik. Problem tersebut meliputi kapasitas dukung dinamik dari pondasi, interaksi tanah-struktur selama perambatan gelombang getaran yang dihasilkan gempa dan ketahanan gempa pada dam dan tanggul (Braja M. Dasa, 1993).

#### 3.2.7.1 Lapis-Lapisan Tanah

Jika suatu profile tanah terdiri dari beberapa lapis, dapat diberikan rumus pendekatan dengan type massa tergumpal ( $m_1, m_2, \dots, m_n$ ) seperti di tunjukkan pada gambar berikut ini (Idriss & Seed, 1968 dalam Braja M. Dasa, 1993).

$$m_1 = \frac{\gamma_1 h_1}{g} \quad (3.25)$$

Dimana:

$m_1$  = massa tergumpal yang diletakkan di atas pada lapisan 1 tanah

$\gamma_1$  = berat satuan pada lapisan 1 tanah

$h_1$  = setengah kedalaman pada lapisan 1 tanah

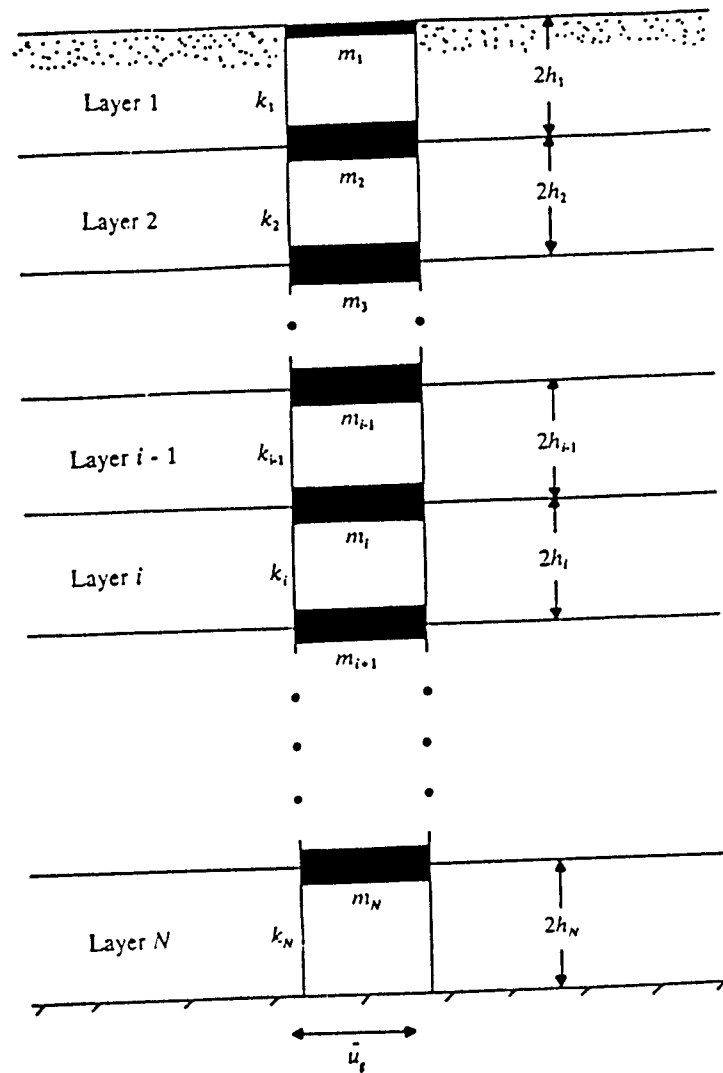
$$m_i = \frac{\gamma_{i-1} h_{i-1} + \gamma_i h_i}{g}, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (3.26)$$

$$k_i = \frac{G_i}{2h_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.27)$$

Dimana:

$k_i$  = Kekakuan yang menghubungkan massa  $m_i$  dan  $m_{i+1}$

$G_i$  = modulus geser pada lapisan  $i$



Gambar 3.9 Massa tergrupal pada lapisan horizontal tanah

### 3.2.7.2 Parameter Gerakan Tanah (Strong Motion Parameters)

Secara umum gerakan tanah akibat gempa lebih banyak ditunjukkan pada percepatan tanah walaupun akibat gempa juga terdapat kecepatan dan perpindahan/simpangan permukaan tanah. Gerakan tanah dengan makna seperti itu dimaksudkan sebagai terjemahan atas istilah "ground motions" yang populer dalam teknik gempa. Istilah tersebut kadang-kadang juga disebut "strong motion" untuk lebih menekankan pada percepatan tanah akibat gempa.

Percepatan tanah akibat gempa umumnya sangat acak/random yang berarti bahwa percepatan tanah tersebut tidak beraturan seperti fungsi sinusoidal. Berdasarkan rekaman percepatan gempa maka dapat diketahui bahwa umumnya getaran tanah tersebut terdiri atas banyak kandungan frekuensi/gabungan atas beberapa frekuensi. Percepatan tanah umumnya bersifat impulsif terutama gempa bumi yang kandungan frekuensinya cukup tinggi.

Salah satu parameter untuk menyatakan kekuatan "strength" suatu gempa bumi adalah nilai percepatan tanah maksimum. Parameter ini cukup sederhana karena semakin besar nilai percepatan tanah maksimum, maka gempa bumi yang bersangkutan dianggap semakin kuat sehingga dianggap semakin membuat banyak kerusakan.

### 3.2.7.3 Karakteristik Statik dan Dinamik Tanah

Untuk mempelajari pengaruh kondisi tanah lokal terhadap gerakan tanah (ground motion), maka perlu diketahui tentang karakteristik statik dan dinamik lapisan tanah tempat gelombang gempa merambat. Semua karakter tersebut akan



berpengaruh pada gerakan tanah dan respon struktur /bangunan di atas permukaan tanah.

## 1. Karakteristik Statik

Karakteristik statik terdiri dari:

### a. Tanah Pasir (Cohesionless Soils)

Secara umum tanah dibedakan menjadi tanah berpasir (kohesi  $c = 0$ ) dan tanah lempung murni ( $\phi = 0$ ). Karena pasir tidak mempunyai kohesi, maka pada saat terjadi gempa, butir-butir pasir dapat memadat ataupun bahkan mengembang dengan mudah seperti pada likuifaksi. Likuifaksi adalah peristiwa hilangnya gaya gesek antar butir sebagai akibat meningkatnya tekanan air pori sebagai akibat guncangan gempa.

Karena tanah pasir bersifat kasar maka tahanan geser tanah pasir bertambah sehingga akan menambah pula sudut gesek dalamnya. Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat geser tanah pasir adalah:

- a) Ukuran butiran
- b) Air yang terdapat didalam butirannya
- c) Kekasaran butirannya
- d) Angka pori atau kekakuan relatifnya
- e) Distribusi ukuran butirannya
- f) Bentuk butirannya

Dari faktor-faktor yang mempengaruhi kuat geser tanah pasir di atas, yang paling besar pengaruhnya adalah nilai angka pori. Karena angka pori akan berpengaruh terhadap kerapatannya. Pada pengujian geser langsung maupun

triaksial, bila angka pori rendah atau kerapatan relatif tinggi, maka nilai kuat geser akan tinggi pula. Jika dua macam tanah pasir mempunyai kerapatan relatif yang sama, tetapi gradasinya berlainan, maka pasir yang mempunyai gradasi lebih baik akan mempunyai sudut gesek dalam yang lebih besar. Ukuran butiran untuk pasir dengan angka pori yang sama, tidak banyak berpengaruh pada sudut gesek dalamnya. Jadi pasir halus dan pasir kasar pada angka pori yang sama akan mempunyai sudut gesek dalam yang sama.

Tabel 3.9 Sudut gesek tanah nonkohesif hasil penyelidikan dilapangan  
(Meyerhoff, 1956)

Kondisi	Sudut gesek dalam( $\phi$ )
Sangat tidak padat	<30
Tidak padat	30-35
Agak padat	35-40
Padat	40-45
Sangat padat	>45

#### b. Tanah kohesi

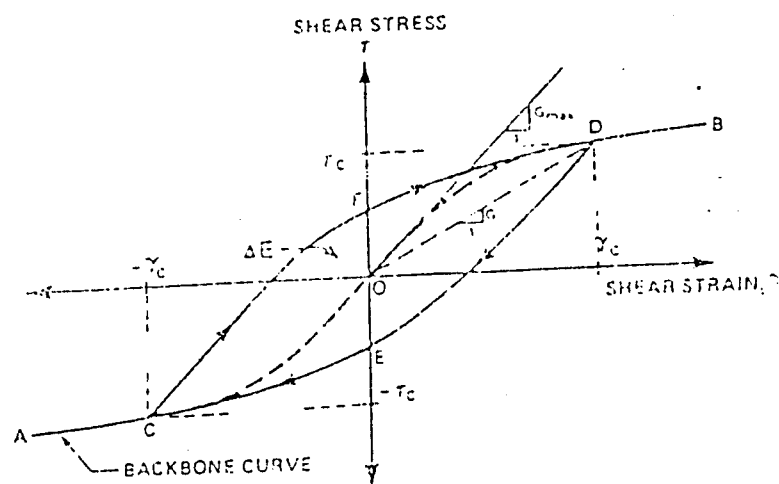
Tanah lempung umumnya terdiri atas butir-butir yang sangat halus dari beberapa jenis mineral yang mempunyai nilai kohesi. Sifat kohesi ini adalah suatu nilai interaksi antara mineral-mineral penyusun lempung dengan air. Dengan adanya interaksi tersebut maka akan terjadi lekatan/rekatan antara butir yang satu dengan butir yang lain. Peristiwa inilah yang menyebabkan lempung mempunyai nilai kohesi tertentu.

## 2. Karakteristik Dinamik

Respon tanah akibat beban dinamik yang dilakukan pada percobaan di laboratorium adalah untuk mensimulasi perilaku elemen tanah pada kedalaman tertentu akibat getaran gelombang gempa. Simulasi yang dilakukan umumnya menganggap bahwa gelombang geser merambat lurus secara vertikal sehingga gelombang geser tersebut akan mengakibatkan suatu elemen tanah berubah-ubah bentuk akibat adanya gaya geser bolak-balik.

### a. Modulus geser tanah (G)

Nilai modulus geser merupakan perbandingan antara tegangan geser dengan regangan geser, yang ditunjukkan pada gambar 3.10. Modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) adalah nilai modulus geser untuk regangan geser yang sangat kecil. Beberapa parameter yang mempengaruhi modulus geser maksimum adalah "effective confining pressure", "void ratio"  $e$ , dan derajat konsolidasi.



Gambar 3.10 Tegangan geser lawan regangan geser pada elemen/sampel tanah (Braja M.Das, 1993)

Nilai G untuk setiap jenis tanah sangat bermacam-macam. Dalam analisa tugas akhir ini hanya dibahas untuk tanah lempung dan tanah pasir saja.

Nilai modulus geser untuk tanah lempung ( $\text{kg/cm}^2$ ) (Braja M.Das, 1993),

$$G_{\max} = 3310C'R^k \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_0^{0.5} \quad (3.28)$$

Tabel 3.9 Nilai PI dan nilai k (Braja M. Dasa, 1993)

Indeks Plastisitas	K
0	0
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
$\geq 100$	0.50

Untuk nilai  $\bar{\sigma}_0$  dapat diperoleh dengan rumus:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}{3} \quad (3.29)$$

$\bar{\sigma}_1$  adalah tegangan effective vertical stress, sedangkan,

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = k_0 \bar{\sigma}_1 \quad (3.30)$$

Dengan  $k_0$  adalah koefisien tekanan horizontal tanah saat diam dan dapat diperoleh dengan:

a)  $k_0$  untuk tanah pasir

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (3.31)$$

b)  $k_0$  untuk tanah lempung

$$k_0 = 0.4 + 0.007(PI), \text{ untuk } (0 \leq PI \leq 40) \quad (3.32)$$

$$k_0 = 0.68 + 0.001(PI - 40), \text{ untuk } (40 \leq PI \leq 80) \quad (3.33)$$

dengan  $\phi$  adalah sudut gesek alam ( $\text{kg/cm}^2$ )

Nilai modulus geser untuk tanah pasir (Braja M. Das, 1993),

a. Pasir bersih berbutir halus,

$$G_{\max} = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_0^{0.5} \quad (3.34)$$

b. Pasir bersih berbutir tajam,

$$G_{\max} = 326 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_0^{0.5} \quad (3.35)$$

Rumus Modulus geser pasir ini digunakan untuk  $G_{\max}$  dalam  $\text{kg/cm}^2$  dan

$e < 0,80$ .

Dari seluruh persamaan di atas,

$e$  = angka pori

$\bar{\sigma}_0$  = tegangan kekang efektif

OCR = "Overconsolidation Ratio"

**b. "Dumping ratio"**

"Dumping ratio" akan meningkat pada regangan geser yang semakin besar dan pada tanah yang indeks plastisitas yang semakin kecil. Hal ini berarti bahwa tanah pasir mempunyai kemampuan meredam energi gelombang gempa yang lebih besar daripada pada tanah lempung.

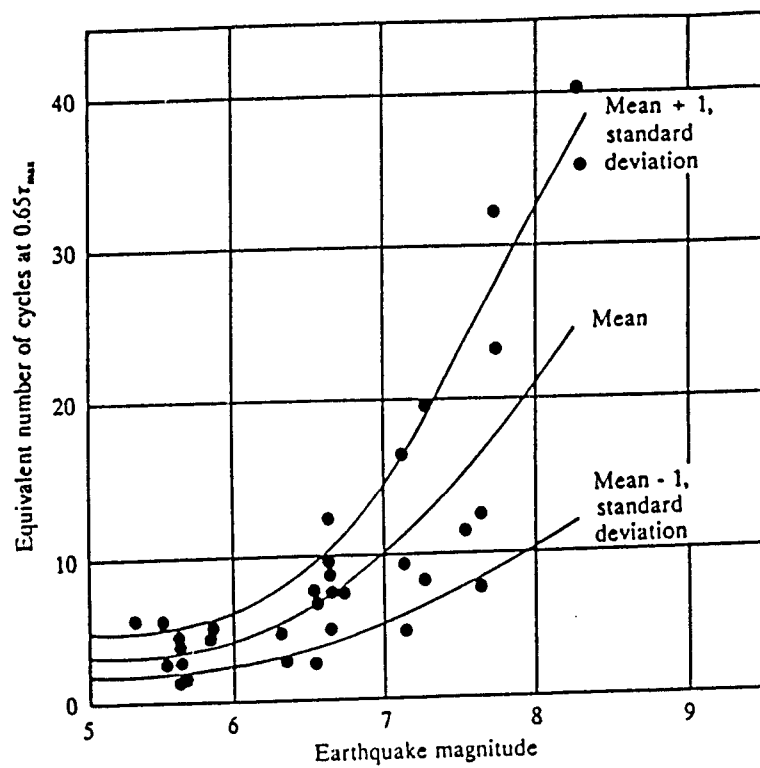
Tabel 3.10 Nilai "dumping ratio" untuk beberapa jenis tanah (Bobby O. Hardin & Vincent P. Drnevich, 1972)

Jenis Tanah	"Dumping ratio" ( % )
Pasir kering bersih	$D = 33 - 1,5 (\log N)$
Pasir Basah bersih	$D = 28 - 1,5 (\log N)$
Lanau	$D = 26 - 4 \bar{\sigma}_0^{1/2} + 0,7 f^{1/2} - 1,5 (\log N)$
Lempung / Kohesif	$D = 31 - (3 + 0,03 f) \bar{\sigma}_0^{1/2} + 1,5 f^{1/2} - 1,5 (\log N)$

Dimana:  $f = \frac{1}{T}$  = frekuensi alam (Putaran per detik)

$N$  = Number equivalent of cycles at  $0,65 \tau_{max}$

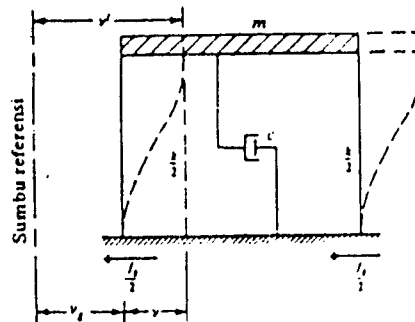
Nilai  $N$  tersebut berdasarkan grafik di bawah ini:



Gambar 3.11 Nilai  $N$  Equivalent (Braja M. Das, 1993)

### 3.3 Analisa Dinamik Struktur Tanah

Jika gerak gempa bumi pada batuan dasar yang dasarnya lapisan tanah diketahui, percepatan tanah atau gerak tanah-bebas dapat diperoleh dengan memperlakukan lapisan tanah persis seperti suatu sistem struktur di mana gerak tumpuannya diketahui, dengan menggunakan model yang didiskritisasi dan disesuaikan dengan bentuk geometri tumpukan tanah dan mengasumsikan bahwa masukan gempa-bumi adalah translasi dasar-tegar (Ray W. Clough & Penzien, 1982).



Gambar 3.12 Sistem SDOF tergumpal yang mengalami translasi dasar tegar (Ray W. Clough & Joseph Penzien, 1982)

#### 3.3.1 Umum

##### 3.3.1.1 Tinjauan Fundamental Analisa Dinamik

Istilah dinamik secara sederhana dapat didefinisikan sebagai perubahan-waktu, dalam hal ini berarti analisa dinamik adalah analisis yang melibatkan gaya, jarak atau perpindahan dan waktu.

Pada analisa dinamik, ada dua pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi struktur terhadap beban dinamik. Pertama pendekatan deterministik,

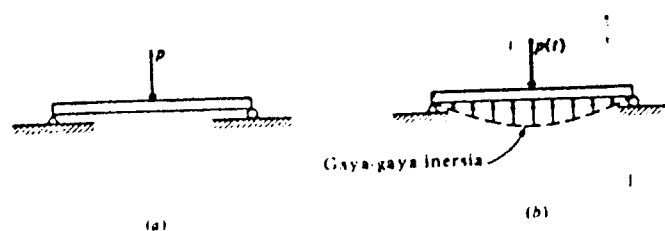
pada analisis deterministik, beban yang bekerja pada struktur adalah “prescribed dynamic loading”, yaitu jika variasi waktu pembebanan diketahui secara lengkap walaupun mungkin sangat berosilasi atau sifatnya tidak beraturan. Pendekatan kedua adalah pendekatan non-deterministik, yaitu pembebanannya berupa “random dynamic loading” atau pembebanan dinamik acak, pendekatan ini digunakan jika variasi waktu tidak diketahui secara lengkap (Ray W. Clough & J. Penzien, 1982).

### 3.3.1.2 Pembebanan Dinamik

Pembebanan dinamik secara mendasar berbeda dengan pembebanan statik, pada beban statik tidak akan mengalami perubahan intensitas sedangkan beban dinamik merupakan suatu fungsi yang mengalami perubahan menurut waktu.

Pada analisis dinamik yang menggunakan pendekatan deterministik, jenis pembebanan yang digunakan adalah beban periodik dan beban non-periodik.

Beban periodik merupakan beban berulang yang memperlihatkan variasi waktu yang sama berturut-turut untuk jumlah siklus yang besar, sedangkan pembebanan non-periodik mungkin berbentuk pembebanan impulsif yang berlangsung singkat atau bentuk umum beban-beban yang berlangsung lama.

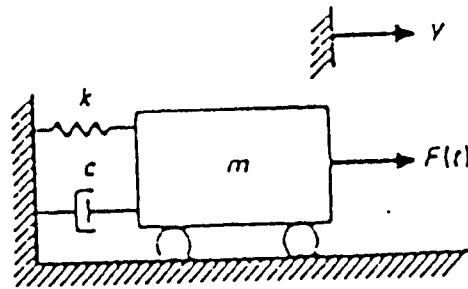


Gambar 3.13 Perbedaan dasar antara beban statik dan dinamik: (a) pembebanan statik; (b) pembebanan dinamik (Ray W. Clough & Joseph Penzien, 1982)



### 3.3.2 Sistem Derajat Kebebasan Tunggal

Sifat-sifat fisik dari setiap sistem struktur yang elastik secara linear yang dikenakan pada beban dinamik meliputi massa, sifat elastik (kelenturan atau kekakuan), mekanisme kehilangan energi atau peredaman dan sumber-luar eksitasi atau pembebanannya. Dalam model yang paling sederhana dari suatu sistem derajat kebebasan tunggal (Single Degree Of Freedom "SDOF"), masing-masing sifat tersebut dianggap terpusat pada elemen fisik tunggal.



Gambar 3.14 Model matematis untuk sistem berderajat kebebasan tunggal  
(Mario Paz, 1985)

Berdasarkan model struktur dengan derajat kebebasan tunggal seperti gambar di atas, maka persamaan differensial gerakan "Differential equation of motion" pada struktur dengan dengan derajat kebebasan tunggal beban dinamik  $F(t)$  adalah:

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = F(t) \quad (3.36)$$

Sedangkan persamaan differensial gerakan suatu massa dengan derajat kebebasan tunggal akibat gerakan tanah "base motion" adalah,

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = -m \ddot{y}_b \quad (3.37)$$



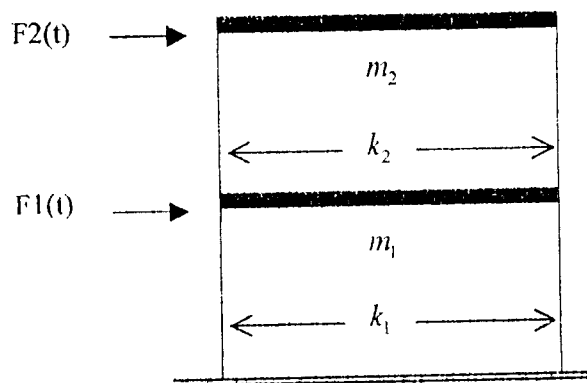
### 3.3.3 Sistem Derajat Kebebasan Banyak

Sebagaimana yang dituliskan di atas bahwa lapisan-lapisan tanah analog seperti sistem struktur, maka respon lapis-lapis tanah akibat gempa dianalisis melalui pendekatan sistem berderajat kebebasan banyak (Multy Degree Of Freedom "MDOF").

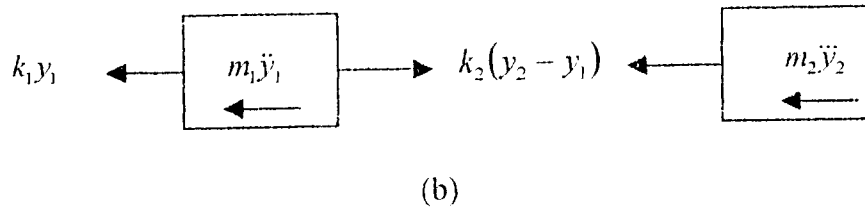
Struktur dengan derajat kebebasan tunggal berarti hanya ada satu koordinat yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu masa pada saat tertentu. Jumlah derajat kebebasan biasanya dikaitkan dengan jumlah massa, struktur dengan derajat kebebasan tunggal berarti hanya mempunyai satu massa, sedangkan struktur dengan derajat kebebasan banyak berarti dikaitkan dengan jumlah massa yang banyak. Misalnya suatu properti tanah yang memiliki 4 lapis, berarti mempunyai 4 massa dan 4 derajat kebebasan.

#### 3.3.3.1 Persamaan Differensial Gerakan MDOF

Untuk memperoleh persamaan diferensial gerakan dipakai prinsip keseimbangan dinamik pada suatu massa yang ditinjau. Untuk memperoleh persamaan tersebut maka diambil model struktur MDOF seperti gambar berikut:



(a)



Gambar 3.15 Sistem dinamis struktur tanah MDOF 2 Lapis; (a) model struktur tanah, (b) diagram keseimbangan

Persamaan differensial gerakan akan diperoleh dengan memperhatikan free body diagram sebagai berikut,

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Persamaan (3.38) dapat ditulis dengan bentuk yang lebih sederhana,

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 &= 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 - k_2 y_1 + k_2 y_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Persamaan (3.39) dapat ditulis dalam bentuk matrik,

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

Selanjutnya persamaan Eigenproblem atas persamaan (3.40) adalah,

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2) - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

### 3.3.3.2 Matriks Massa, Kekakuan dan Damping ratio

Pada struktur tanah dengan lapisan 2 seperti pada gambar diatas, maka struktur tersebut mempunyai 2 derajat kebebasan. Persamaan gerakan tersebut umumnya disusun berdasarkan atas goyangan struktur menurut mode pertama. Persamaan keseimbangan dinamik dapat ditulis,

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{F(t)\} \quad (3.42)$$

Yang mana  $[M]$ ,  $[C]$ , dan  $[K]$  berturut-turut adalah matriks massa, matriks damping ratio dan matriks kekakuan yang dapat ditulis menjadi,

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Sedangkan  $\{y\}$ ,  $\{\dot{y}\}$ ,  $\{\ddot{y}\}$  dan  $F(t)$  masing-masing adalah vektor simpangan, vektor kecepatan, vektor percepatan dan vektor beban, atau

$$\{\ddot{y}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix}, \{\dot{y}\} = \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix}, \{y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \text{ dan } \{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \quad (3.44)$$

### 3.4 Integrasi Numerik Dengan Metode "Central Difference"

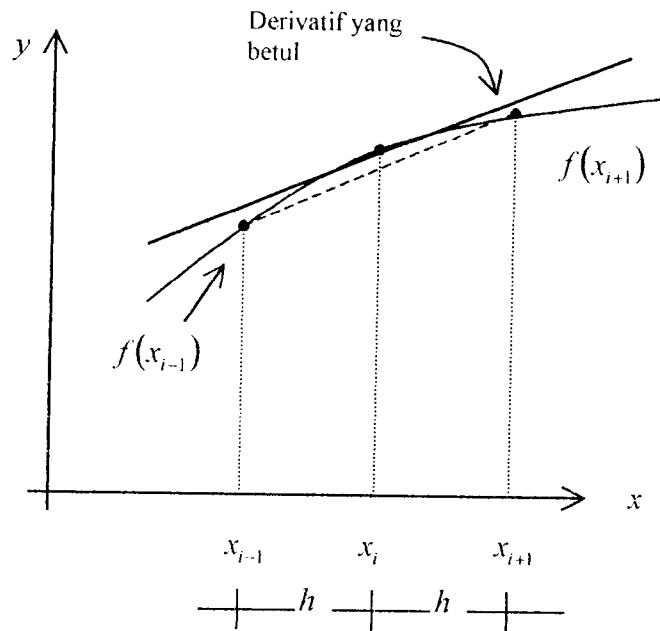
Metode numerik adalah teknik untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang diformulasikan secara matematis dengan cara operasi hitungan (arithmetic). Dalam metode numerik ini dilakukan operasi hitungan dalam jumlah yang sangat banyak dan berulang-ulang, oleh karena itu diperlukan bantuan komputer untuk melaksanakan operasi tersebut (B. Triatmodjo, 1992).

Pada kondisi beban non-periodik yang sudah kompleks misalnya beban gempa, maka respon struktur tanah tidak mungkin lagi dihitung secara analitik, apalagi pada struktur tersebut memiliki derajat kebebasan banyak.

Salah satu metode integrasi numerik pada persamaan differensial gerakan adalah metode "central difference" yang berdasar pada perkiraan nilai "derivatif" waktu.

Perkiraan nilai "derivatif" pada metode "central difference" diperoleh dengan memperhatikan nilai-nilai fungsi di titik  $x_{i-1}$  dan  $x_{i+1}$  yang masing-masing

adalah  $f(x_{i+1})$  dan  $f(x_{i-1})$ . Untuk itu dipakai model fungsi dengan grafik misalnya seperti pada gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 Derivatif pertama dengan metode “central difference”

Dengan memperhatikan gambar 3.16 di atas, maka suatu “slope” atau “derivatif” pertama pada titik  $x_i$  dapat diperoleh dengan perantaraan nilai-nilai fungsi pada titik  $x_{i-1}$  dan  $x_{i+1}$ . Nilai “derivatif” tersebut adalah,

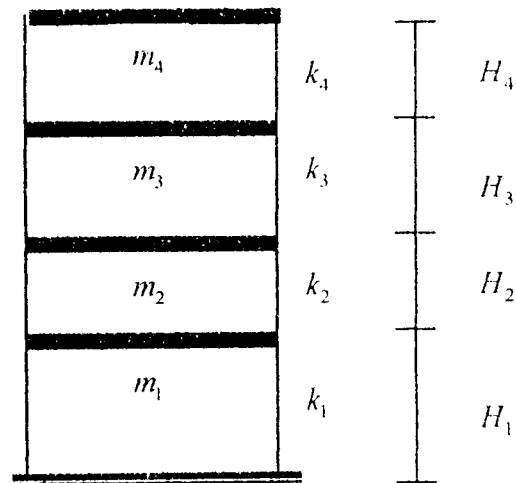
$$f'(x_i) \approx \tan \alpha \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (3.45)$$

Dapat diperhatikan dari gambar 3.16 bahwa  $x_{i+1} - x_{i-1}$  sama dengan  $2h$  maka persamaan (3.45) tersebut dapat ditulis dalam bentuk,

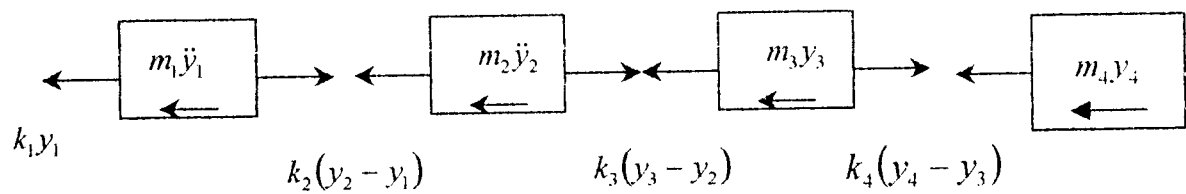
$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} + \phi h \quad (3.46)$$

Dimana Notasi  $\phi/h$  dalam persamaan (3.46) adalah sisa atau kesalahan yang mungkin terjadi.

### 3.5 Model Persamaan Keseimbangan Dinamik Untuk 4 Lapisan Tanah



(a)



(b)

Gambar 3.16 Sistem dinamis struktur tanah MDOF 4 Lapis; (a) model struktur tanah, (b) diagram keseimbangan

Berdasarkan keseimbangan gaya-gaya pada gambar di atas, dapat disusun persamaan differensial simultan gerakan massa,

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \\
 m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) - k_3 (y_3 - y_2) &= 0 \\
 m_3 \ddot{y}_3 + k_3 (y_3 - y_2) - k_4 (y_4 - y_3) &= 0 \\
 m_4 \ddot{y}_4 + k_4 (y_4 - y_3) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Persamaan diatas dapat disusun secara sistimatis yaitu:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 &= 0 \\
 m_2 \ddot{y}_2 - k_2 y_1 + (k_2 + k_3) y_2 - k_3 y_3 &= 0 \\
 m_3 \ddot{y}_3 - k_3 y_2 + (k_3 + k_4) y_3 - k_4 y_4 &= 0 \\
 m_4 \ddot{y}_4 - k_4 y_3 + k_4 y_4 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Persamaan diatas disusun menjadi sebuah matrik yaitu:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{y}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{Bmatrix} = 0 \tag{3.49}$$

Keterangan:

$m$  = massa tiap lapisan tanah (kg dt<sup>2</sup>/cm)

$k$  = kekakuan tiap lapisan tanah (kg /cm)

$y$  = simpangan (cm)

$\ddot{y}$  = percepatan tanah (cm/dt<sup>2</sup>)

Persamaan “eigenproblem” dari persamaan diatas adalah:

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2) - \omega^2 m_1 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) - \omega^2 m_2 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) - \omega^2 m_3 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 - \omega^2 m_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.50}$$

Dimana:

$\omega$  = frekuensi sudut (rad/det)

$\phi$  = Mode shape lapisan tanah

Misalkan :

$$k_4 = k_3 = k_2 = k_1 = k$$

$$m_4 = m_3 = m_2 = m_1 = m$$

maka:

$$\begin{bmatrix} 2k - \omega^2 m & -k & 0 & 0 \\ -k & 2k - \omega^2 m & -k & 0 \\ 0 & -k & 2k - \omega^2 m & -k \\ 0 & 0 & -k & k - \omega^2 m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.51)$$

Persamaan (3.51) dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} 2 - \frac{\omega^2 m}{k} & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 - \frac{\omega^2 m}{k} & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 - \frac{\omega^2 m}{k} & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 - \frac{\omega^2 m}{k} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

Jika  $\frac{\omega^2 m}{k} = \lambda$ , maka:

$$\begin{bmatrix} (2 - \lambda) & -1 & 0 & 0 \\ -1 & (2 - \lambda) & -1 & 0 \\ 0 & -1 & (2 - \lambda) & -1 \\ 0 & 0 & -1 & (1 - \lambda) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.53)$$

Selanjutnya persamaan (3.53) dapat ditulis menjadi:



$$\begin{aligned} \dot{p}_j &= \{\phi\}_j^T [M] \\ \Lambda_j &= \{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j \quad \text{dan} \\ \sum \Gamma_j &= 1 \end{aligned} \quad (3.58)$$

Setelah nilai partisipasi setiap mode dihitung, maka diperhatikan persamaan differensial dalam bentuk,

$$\ddot{g}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{g}_j + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (3.59)$$

Untuk menghitung nilai  $\ddot{g}_j$ , dengan memakai metode “central difference”, diperoleh hubungan sebagai berikut,

$$\dot{g}_j = \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} \quad \text{dan} \quad \ddot{g}_j = \frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} \quad (3.60)$$

Untuk mencari nilai  $g_{j+1}$  substitusi persamaan (3.60) kedalam persamaan (3.59), sehingga diperoleh persamaan,

$$\frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} + 2\xi_j \omega_j \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (3.61)$$

Persamaan (3.61) dapat ditulis menjadi,

$$\left[ \frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j+1} = -\ddot{y}_t - \left[ \omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] g_j - \left[ \frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j-1} \quad (3.62)$$

Persamaan (3.62) dapat ditulis menjadi,

$$g_{j+1} = \frac{-\ddot{y}_t - ag_j - bg_{j-1}}{\hat{k}} \quad (3.63)$$

dengan,

$$\begin{aligned}
 a &= \left[ \omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] \\
 b &= \left[ \frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi\omega_j}{2\Delta t} \right] \\
 \hat{k} &= \left[ \frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi\omega_j}{2\Delta t} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.64}$$

Pada umumnya nilai  $g_0 = 0$  dan  $\ddot{g}_0 = 0$ .

Dari seluruh persamaan di atas dimana,

$\omega$  = Frekuensi sudut (Rad/det)

$\Delta t$  = Step integrasi = 0,01 det

$\ddot{y}_t$  = Data rekaman gempa (percepatan tanah)

## **BAB IV**

### **METODE PENELITIAN**

Metode penelitian merupakan suatu urutan atau tata cara pelaksanaan penelitian dalam rangka mencari jawaban atas permasalahan penelitian yang diajukan. Dalam penulisan tugas akhir ini metode yang dipakai adalah seperti yang disebutkan berikut ini.

#### **4.1 Lokasi Penelitian**

Lokasi penelitian di Yogyakarta. Lokasi penelitian tidak berpengaruh terhadap hasil analisis karena data-data untuk analisis diperoleh dari literatur-literatur.

#### **4.2 Data-Data Yang Diperlukan**

Pada penelitian tugas akhir ini ditinjau 4 lapis ketebalan tanah endapan, pada setiap ketebalan tanah endapan ditinjau untuk beberapa kondisi:

1. Tanah lempung
  - a. Tanah lempung terendam air
  - b. Tanah lempung tidak terendam air
2. Tanah pasir
  - a. Tanah pasir terendam air
  - b. Tanah pasir tidak terendam air

### 3. Tanah pasir dan lempung

- a. Tanah pasir dan lempung terendam air
- b. Tanah pasir dan lempung tidak terendam air.

Untuk data input percepatan tanah pada “base rock” dipakai input respon riwayat waktu (time history) gempa Montana yang terdiri dari:

1. Gempa Montana 1 dengan durasi (t) =7 detik
2. Gempa Montana 2 dengan durasi (t) =10,5 detik
3. Gempa Montana 3 dengan durasi (t) =12,25 detik.

Percepatan tanah gempa Montana tersebut dianggap terjadi pada lapis “base rock” atau lapis batuan dasar.

#### 4.3 Cara Memperoleh Data

Data-data dalam penulisan tugas akhir ini diperoleh atau mengacu pada buku-buku, pendapat dan teori-teori yang berhubungan, sedangkan data input riwayat waktu gempa yang dipakai adalah respon riwayat waktu gempa Montana.

#### 4.4 Pengolahan dan Analisis Data

Setelah data terkumpul maka dilakukan pengolahan dan analisis data dengan langkah-langkah sebagai berikut:

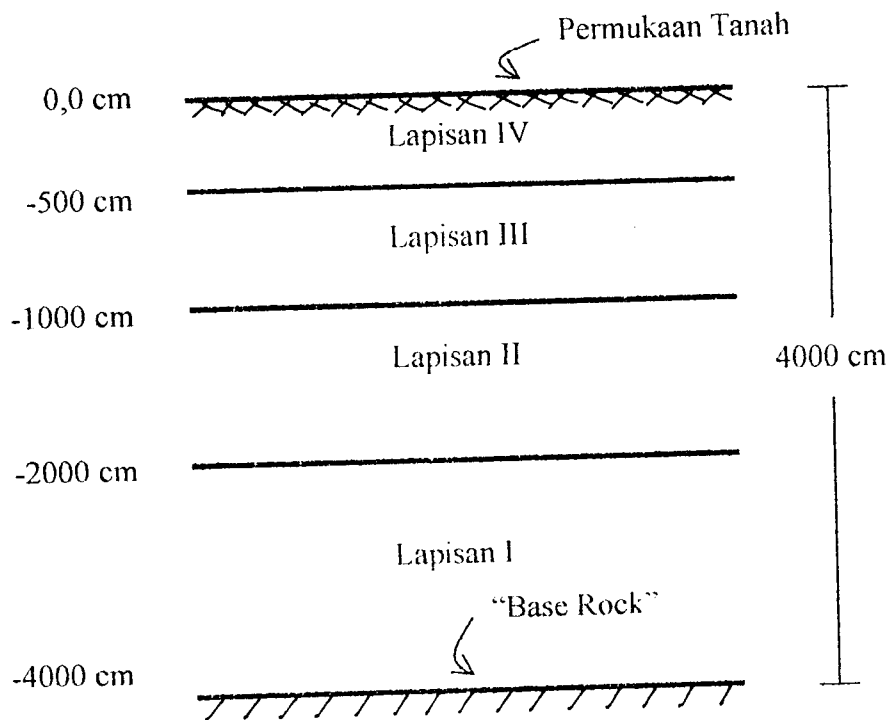
1. Menentukan data-data properti tanah, meliputi:
  - a. Tebal tiap lapisan tanah
  - b. Angka pori  $e$  (menurut persamaan 3.11)
  - c. Berat jenis tanah  $\gamma_b$  (menurut persamaan 3.18)
  - d. Sudut geser dalam  $\phi$  (sesuai tabel 3.9)
  - e. Indeks plastisitas PI (sesuai tabel 3.7)

2. Menghitung  $\gamma_{efektif}$  ( menurut persamaan 3.19)
3. Menghitung  $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3$  dan  $\bar{\sigma}_0$  ( menurut persamaan 3.29 dan 3.30)
4. Menghitung modulus geser  $G$  ( menurut persamaan 3.28, 3.34 dan 3.35)
5. Menghitung massa tiap lapisan tanah  $m$  ( menurut persamaan 3.26)
6. Menghitung kekakuan tanah  $k$  ( menurut persamaan 3.27)
7. Menghitung “dumping ratio” tanah  $D$  ( sesuai tabel 3.10)
8. Membuat model persamaan keseimbangan dinamik
9. Menghitung mode shape tiap lapisan tanah  $\phi$
10. Menghitung partisipasi setiap mode  $\Gamma$  ( menurut persamaan 3.57)
11. Menghitung modal amplitudo  $\ddot{Z}$  ( menurut persamaan 3.56)
12. Menghitung percepatan tanah ( menurut persamaan 3.55)
13. Menganalisis perhitungan percepatan tanah
14. Pembahasan.

**BAB V**  
**ANALISIS PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN**

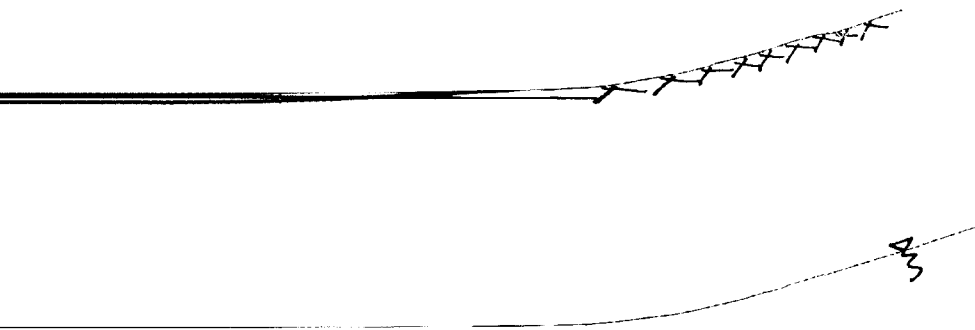
**5.1 Data Lapisan Tanah**

Data tanah yang digunakan dalam tugas akhir ini diperoleh dari beberapa literatur dengan mengambil nilai-nilai pendekatan suatu jenis tanah. Jenis tanah yang dianalisis adalah seperti yang ditunjukkan pada sub bab 4.2 dengan ketebalan tanah endapan setiap kondisi jenis tanah yaitu 4000 cm, sedangkan profil lapisan tanah seperti gambar di bawah ini:



Gambar 5.1 Profil lapisan tanah

Lempung Terendam Air



g:  
/cm<sup>3</sup>

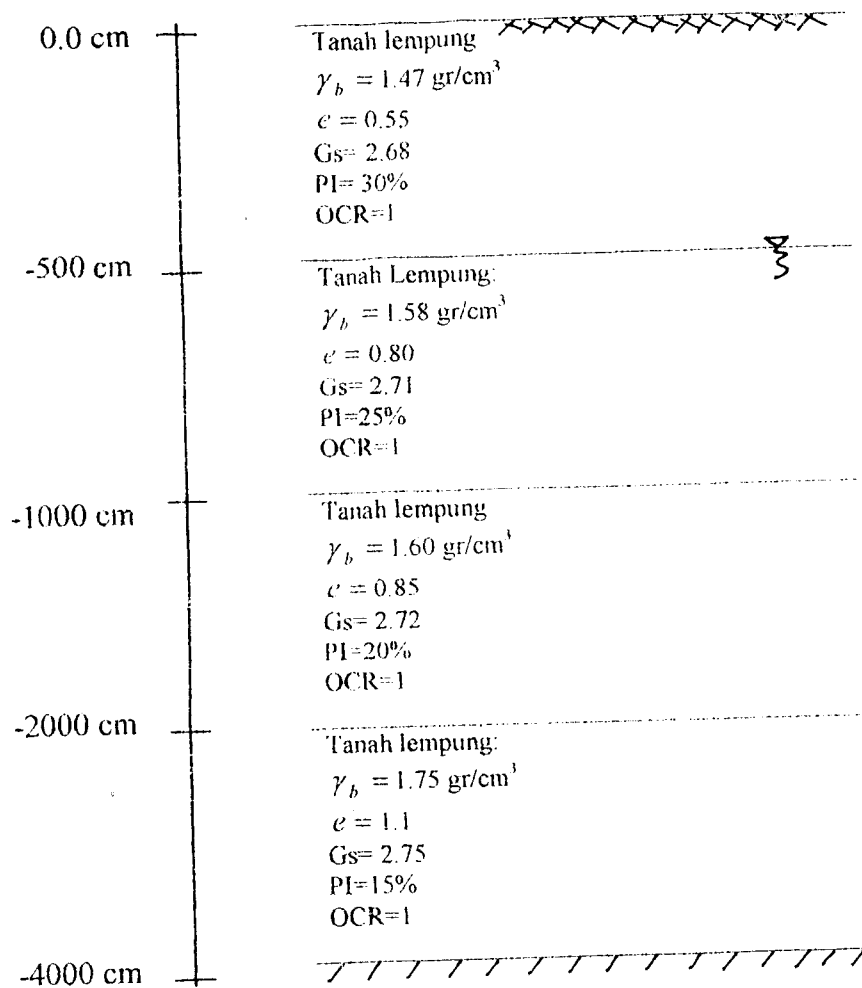
Propil tanah lempung terendam air

kekakuan Lapisan Tanah

an tiap lapisan tanah dengan ketebalan tertentu dan telah ditetapkan.

## 5.2 Lapisan Tanah Lempung

### 5.2.1 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Lempung Terendam Air



Gambar 5.2 Profil tanah lempung terendam air

#### a) Perhitungan Massa dan Kekakuan Lapisan Tanah

Perhitungan dilakukan tiap lapisan tanah dengan ketebalan tertentu dan data-data lapisan tanah yang telah ditetapkan.



- Menghitung  $\gamma_{\text{efektif}}$

$$\text{Diatas muka tanah air, } \gamma_{\text{efektif}} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e} \quad (5.1)$$

$$\text{Dibawah muka air tanah, } \gamma_{\text{efektif}} = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1 + e} \quad (5.2)$$

- Menghitung  $K_o$

Nilai  $K_o$  untuk tanah lempung dengan  $0 \leq PI \leq 40$ ,

$$K_o = 0,4 + 0,007PI \quad (5.3)$$

- Menghitung  $\bar{\sigma}_0$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3) \quad (5.4)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_o * \bar{\sigma}_1$$

Untuk menghitung  $\bar{\sigma}_1$  seperti persamaan di bawah ini:

$$Z=0-500 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{11} = \gamma_{\text{eff}} * 500$$

$$Z=500-1000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{12} = \bar{\sigma}_{11} + \gamma_{\text{eff}} * 500$$

$$Z=1000-2000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{13} = \bar{\sigma}_{12} + \gamma_{\text{eff}} * 1000$$

$$Z=2000-4000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{14} = \bar{\sigma}_{13} + \gamma_{\text{eff}} * 2000 \quad (5.5)$$

- Menghitung  $G=G_{\text{max}}$

Nilai  $G_{\text{max}}$  untuk tanah lempung adalah,

$$G_{\text{max}} = 331OCR^k \frac{(2,973 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_0^{0.5} \quad (5.6)$$

dengan  $OCR=1$  dan nilai  $k$  diambil dari tabel 3.9.

- Menghitung massa dan kekakuan

Nilai massa dan kekakuan tiap lapisan tanah adalah,

$$m_i = \frac{(\gamma_{i+1}h_{i+1} + \gamma_i h_i) * 100 * 100}{g}$$

$$k_i = \frac{(G_i * 100 * 100)}{2h_i} \quad (5.7)$$

dengan  $i = 1,2,3,\dots, N =$  lapisan tanah dan  $g = 980 \text{ cm/dt}^2$

Hasil perhitungan massa dan kekakuan berdasarkan persamaan-persamaan di atas dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5.1 Hasil perhitungan  $G_{\max}$  tanah lempung terendam air

Kedalaman (cm)	E	PI (%)	OCR	$k_o$	$k$	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{\max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.55	15	1	0.505	0.135	0	0	0	0
500	0.55	15	1	0.505	0.135	864.5	436.573	0.57922	954.1640
500	0.8	20	1	0.54	0.18	864.5	466.83	0.59939	672.2464
1000	0.8	20	1	0.54	0.18	1339.5	723.33	0.92872	836.7917
1000	0.85	25	1	0.575	0.21	1339.5	770.213	0.95998	790.1076
2000	0.85	25	1	0.575	0.21	2269.5	1304.96	1.62648	1028.4423
2000	1.1	30	1	0.61	0.24	2269.5	1384.4	1.67943	716.5809
4000	1.1	30	1	0.61	0.24	3929.5	2397	2.90783	942.9068

Tabel 5.2 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah lempung terendam air

Lapisan	Massa (kgdt <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	13.2	4714.53
2	7.17	10284.4
3	6.8	16735.8
4	4.4	19083.3

## b) Perhitungan Mode shape

Data massa dan kekakuan tanah berdasarkan hasil perhitungan di atas:

$$m_1 = 13,2 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_1 = 4714,53 \text{ kg/cm}$$

$$m_2 = 7,17 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_2 = 10284,4 \text{ kg/cm}$$

$$m_3 = 6,8 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_3 = 16735,8 \text{ kg/cm}$$

$$m_4 = 4,4 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_4 = 19083,3 \text{ kg/cm}$$

Data-data tersebut di atas dipakai untuk menyelesaikan persamaan keseimbangan dan analisis perhitungan seperti langkah-langkah pada sub bab 3.5. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5.3 Hasil perhitungan mode shape tanah lempung terendam air

	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-3
	1	1	1	1
	1.3017	-0.0617	-3.9307	-10.0978
	1.419	-0.6829	0.1101	22.0335
	1.4601	-0.9394	3.4891	-20.478
Periode getar (dt)	0.5865	0.1826	0.097	0.066
Frekuensi (cps)	1.759	5.470	10.309	15.150

## c) Perhitungan "dumping ratio"

Nilai "dumping ratio" untuk lapisan tanah lempung adalah,

$$D = 31 - (3 + 0,03f)\bar{\sigma}_0^{1/2} + 1,5f^{1/2} - 1,5(\log N) \quad (5.8)$$

dengan nilai  $\bar{\sigma}_0$  berdasarkan tabel 5.1, nilai  $f$  = frekuensi berdasarkan tabel 5.3 sedangkan nilai  $N$  berdasarkan gambar 3.11. Hasil perhitungan "dumping ratio" dapat dilihat pada tabel 5.4 berikut:

Tabel 5.4 Hasil perhitungan "dumping ratio" tanah lempung terendam air

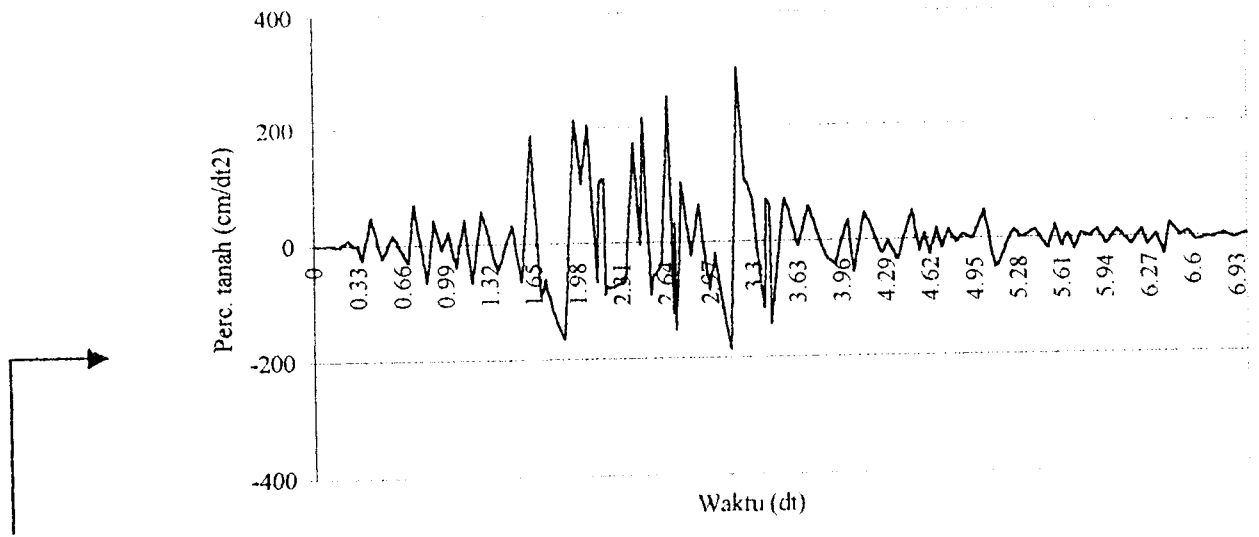
Lapisan	"Dumping ratio" (%)
1	26.880
2	28.190
3	29.140
4	29.763

Untuk proses hitungan, nilai yang dipakai adalah "dumping ratio" equivalent. Untuk menghitung "dumping ratio" equivalent dipakai rumus.

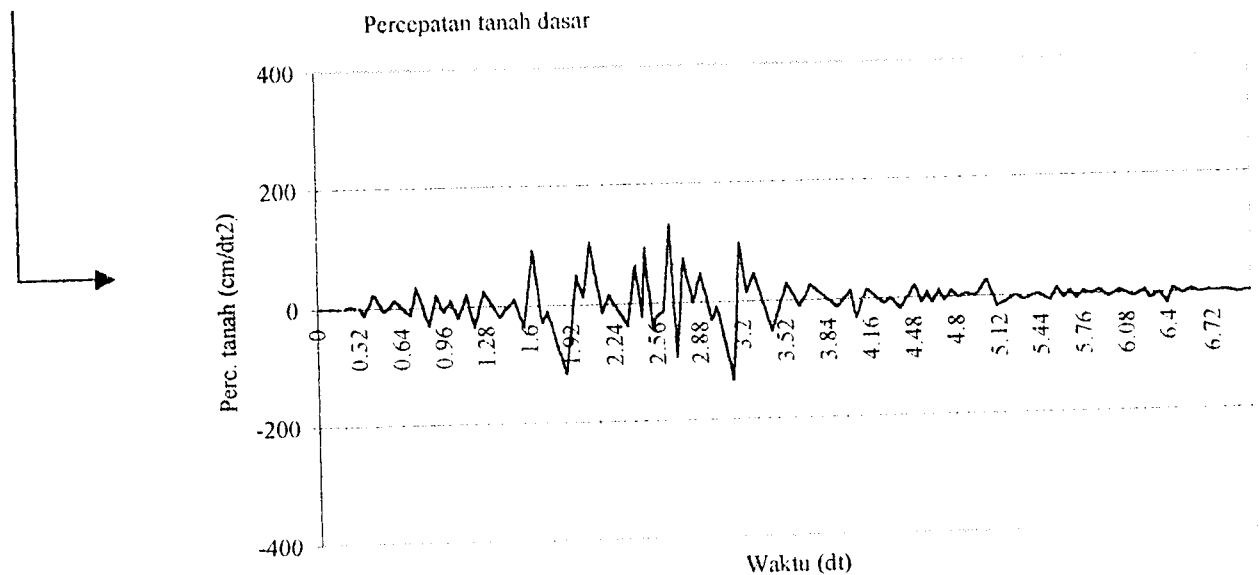
$$D_{eq} = \frac{\sum D_i * h_i}{\sum h_i} \quad (5.9)$$

d) Perhitungan percepatan maksimum lapisan tanah

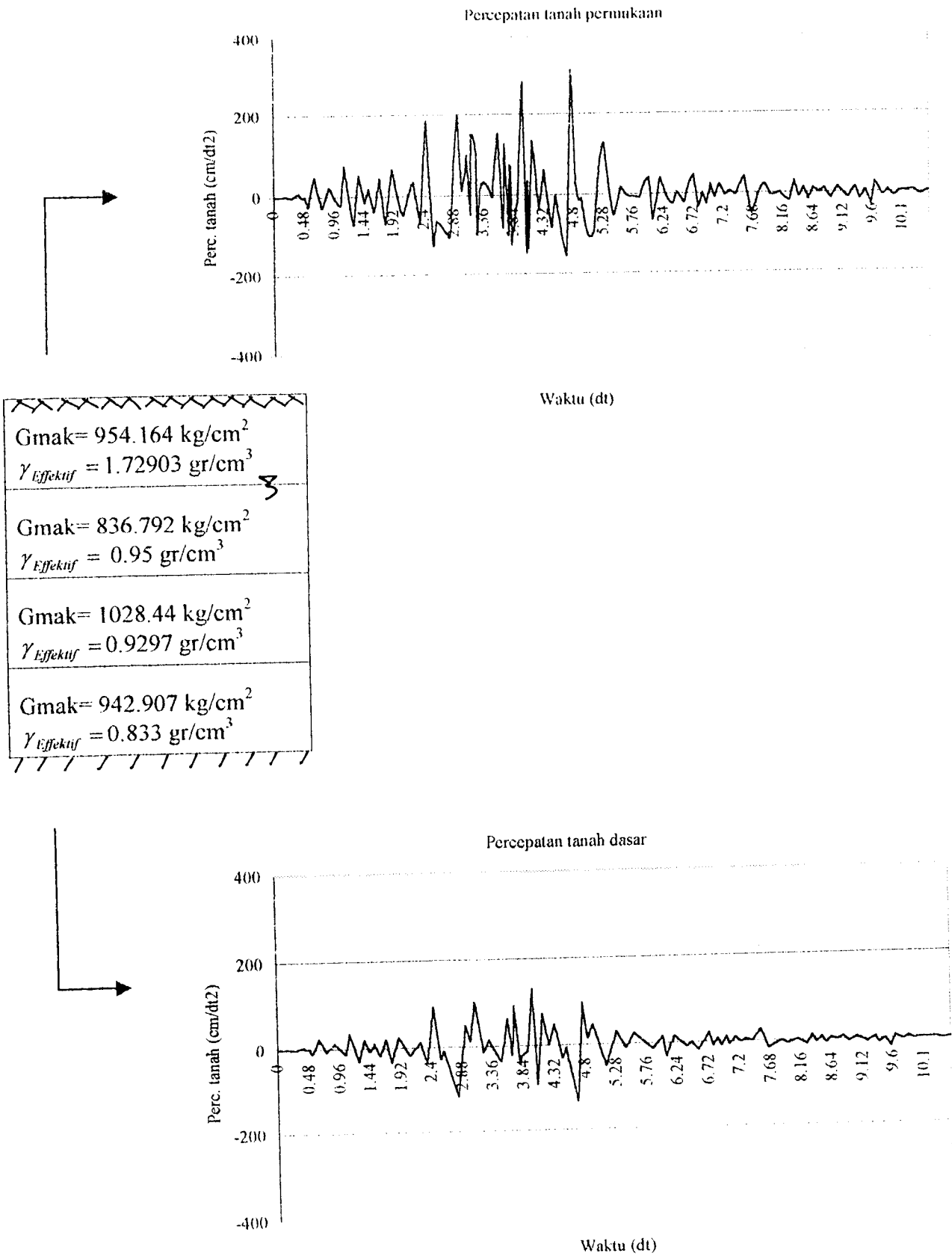
Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel-tabel tersebut di atas, analisis perhitungan percepatan maksimum lapisan tanah lempung terendam air dapat dilakukan sesuai dengan langkah-langkah pada sub bab 3.5. Hasil perhitungan ditunjukkan pada gambar dan grafik berikut:



$G_{mak} = 954.164 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.72903 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 836.792 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 0.95 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1028.44 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 0.9297 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 942.907 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 0.833 \text{ gr/cm}^3$

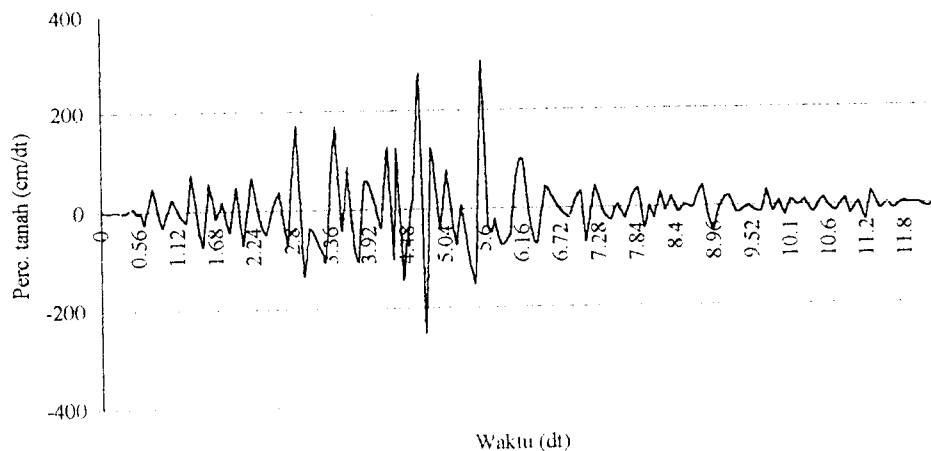


Gambar 5.3 Percepatan tanah akibat gempa Montana I



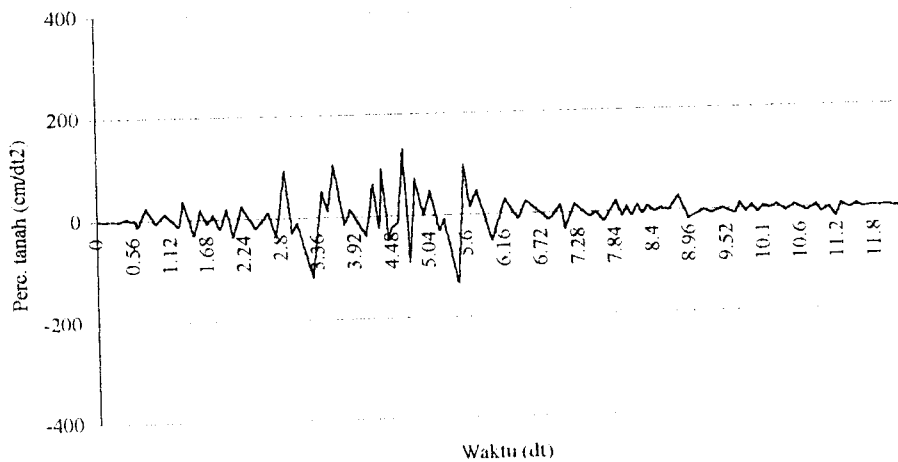
Gambar 5.4 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2

Percepatan tanah permukaan

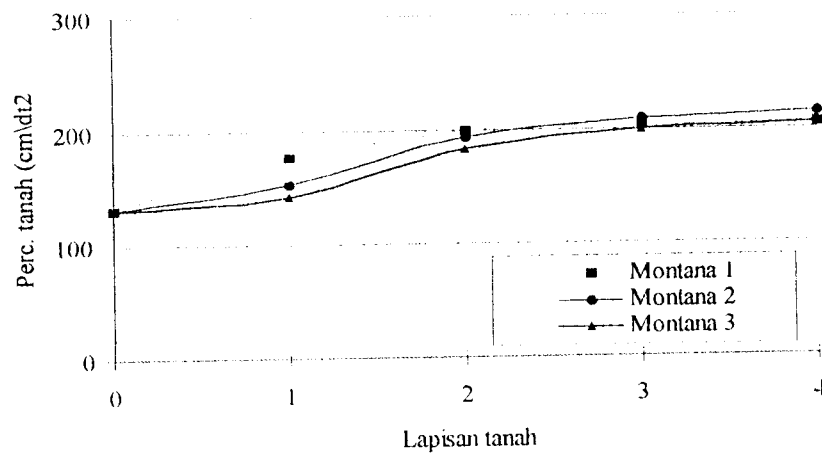


$G_{mak} = 954.164 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{t, \text{efektif}} = 1.72903 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 836.792 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{E, \text{efektif}} = 0.95 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1028.44 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{E, \text{efektif}} = 0.9297 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 942.907 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{E, \text{efektif}} = 0.833 \text{ gr/cm}^3$

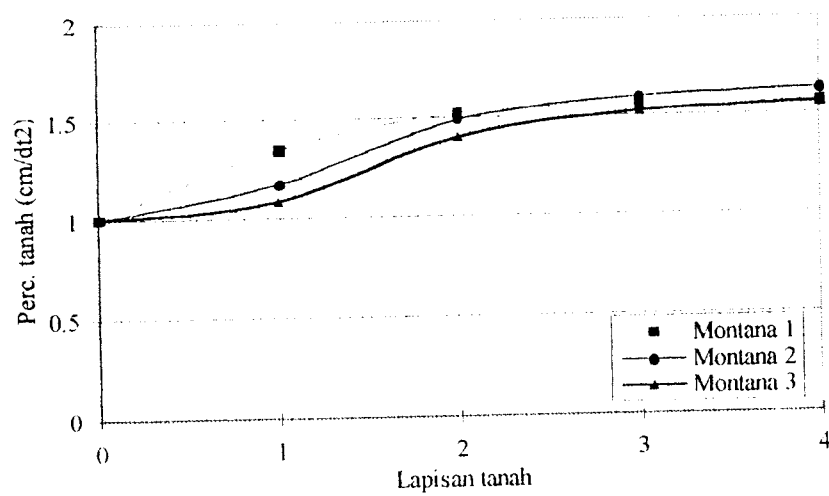
Percepatan tanah dasar



Gambar 5.5 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3



Gambar 5.6 Percepatan tanah maksimum lempung terendam air



Gambar 5.7 Normalisasi percepatan tanah maksimum lempung terendam air



### 5.2.1 Pembahasan Lapisan Tanah Lempung Terendam Air

Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 pada “base rock” dan percepatan tanah pada permukaan untuk lapisan tanah lempung terendam air disajikan pada gambar 5.3. Sedangkan percepatan tanah akibat gempa Montana 2 dan Montana 3 pada “base rock” dan permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.4 dan gambar 5.5.

Berdasarkan gambar 5.3, 5.4 dan 5.5 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut dapat mencapai 150%.

Peristiwa amplifikasi pada lapisan tanah lempung disebabkan oleh endapan tanah lempung tersebut, yang mana tanah endapan yang dalam akan menyebabkan waktu getar yang besar. Hal ini terjadi karena pada tanah endapan yang sangat dalam akan memiliki nilai kekakuan struktur tanah yang kecil, sehingga menyebabkan nilai frekuensi alam menjadi kecil dan waktu getar menjadi besar. Selanjutnya bergesernya waktu getar tanah endapan juga akan berkecenderungan terjadinya amplifikasi percepatan tanah.

Amplifikasi juga terjadi karena tanah lempung memiliki nilai Plastisitas Index (PI) yang relatif tinggi, dimana tanah lempung dengan nilai PI yang tinggi akan berkecenderungan memiliki perilaku elastik dan akan cenderung berespon linier pada saat terjadi gempa, sehingga percepatan tanah akan tetap bertambah sesuai dengan sifat linier tanah tersebut. Hal inilah yang mengakibatkan tanah yang mempunyai PI tinggi berkecenderungan menyebabkan amplifikasi terhadap percepatan tanah.

Redaman material tanah juga merupakan penyebab terjadinya amplifikasi percepatan tanah. Tanah yang mempunyai plastisitas indeks yang tinggi akan bersifat linier, maka luasan hysteresis loop pada sifat dinamik tanah akan semakin kecil. Hal ini berarti bahwa redaman material tanah menjadi semakin kecil. Apabila redaman material tanah kecil, maka respon tanah akibat gempa akan semakin besar. Semakin besar amplifikasi percepatan tanah adalah salah satu akibat dari kecilnya nilai redaman material tanah endapan tersebut.

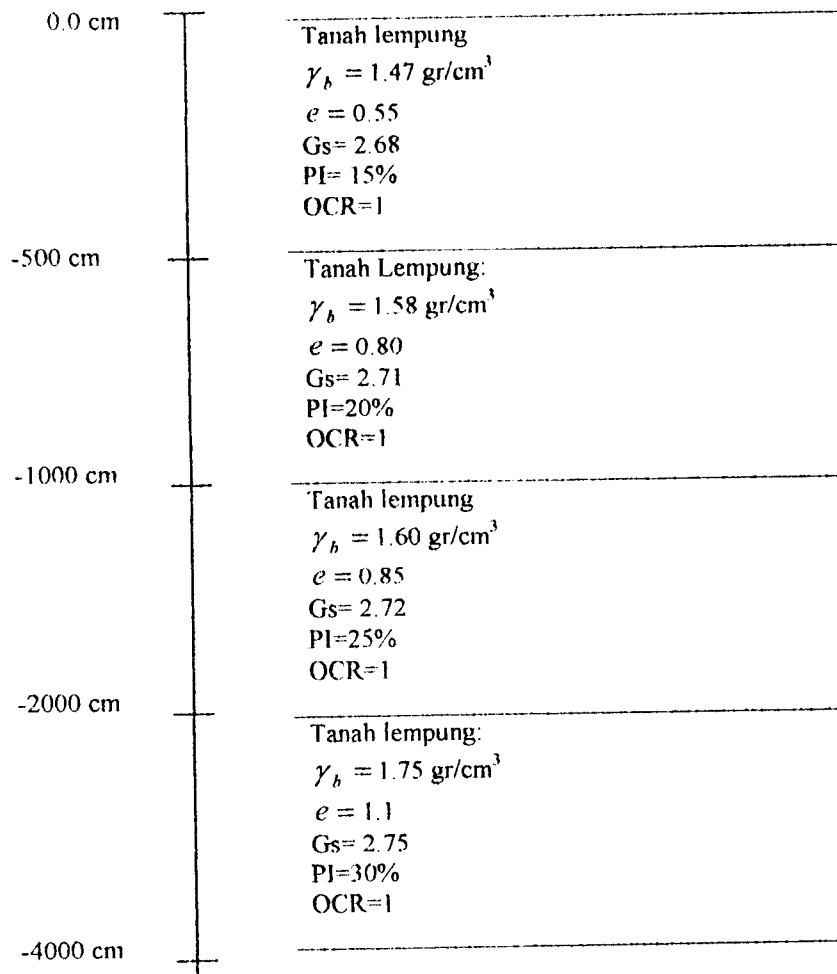
Gambar 5.6 menunjukkan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah lempung terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.7 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada “base rock”, artinya nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum pada “base rock” atau batuan dasar.

Hasil analisis berdasarkan gambar 5.6 dan 5.7 menunjukkan bahwa:

- a. Percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 pada gempa montana 1 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 2 dan Montana 3.
- b. Untuk kondisi lapis ke-2 dan ke-3 kondisinya sama dengan kondisi lapis ke-1.
- c. Untuk lapis ke-4 terjadi sebaliknya yaitu gempa montana 2 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 3 dan Montana 1.

Adanya perbedaan nilai maksimum percepatan tanah pada setiap lapis tersebut disebabkan karena properti tanah yang bervariasi setiap lapisan yang mengakibatkan perbedaan nilai mode shape dan perbedaan data input percepatan tanah gempa Montana 1,2 dan 3.

### 5.2.3 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Lempung Tidak Terendam Air



Gambar 5.8 Profil tanah lempung tidak terendam air

Analisis perhitungan analog dengan analisis perhitungan pada lapisan tanah lempung terendam air. Untuk menghitung  $\gamma_{\text{efektif}}$  pada lapisan tanah lempung tidak terendam air adalah,

$$\gamma_{\text{efektif}} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e} \quad (5.10)$$

Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel dan gambar berikut:

Tabel 5.5 Hasil perhitungan  $G_{max}$  tanah lempung tidak terendam air

Kedalaman (cm)	e	PI (%)	OCR	$ko$	$k$	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.55	15	1	0.505	0.135	0	0	0	0
500	0.55	15	1	0.505	0.135	864.5	436.5725	0.57922	954.164
500	0.8	20	1	0.54	0.18	864.5	466.83	0.59939	672.246
1000	0.8	20	1	0.54	0.18	1617	873.18	1.12112	919.393
1000	0.85	25	1	0.575	0.21	1617	929.775	1.15885	868.1
2000	0.85	25	1	0.575	0.21	3087	1775.025	2.21235	1199.45
2000	1.1	30	1	0.61	0.24	3087	1883.07	2.28438	835.735
4000	1.1	30	1	0.61	0.24	5706	3480.66	4.22244	1136.23

Tabel 5.6 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah lempung tidak terendam air

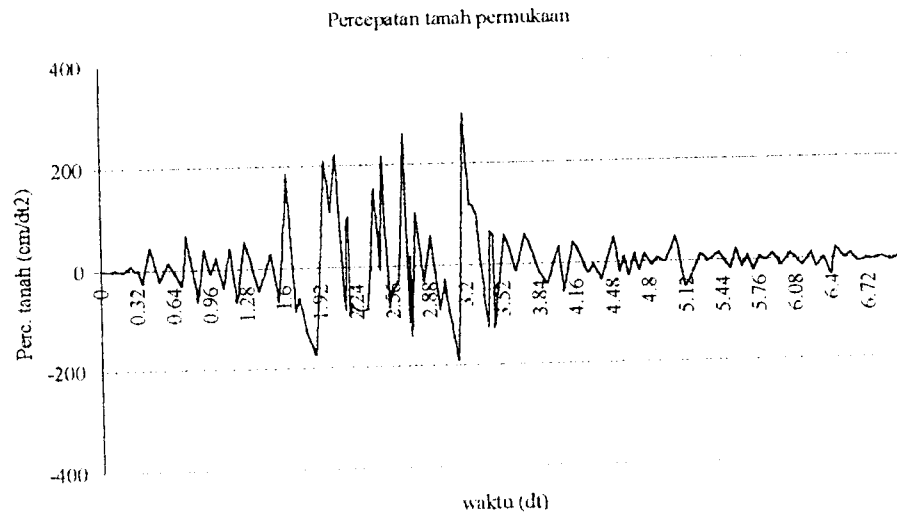
Lapisan	Massa (kgdt <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	20.86	5681.147
2	11.34	11994.53
3	8.25	18387.85
4	4.4	19083.28

Tabel 5.7 Hasil perhitungan Mode shape tanah lempung tidak terendam air

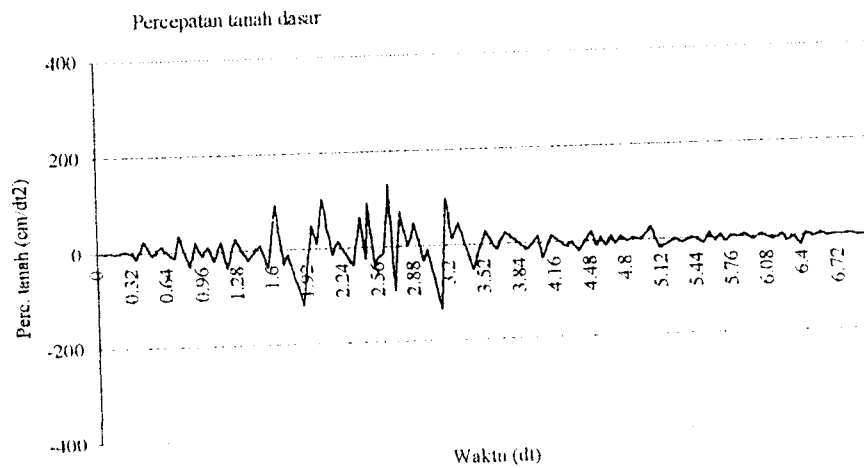
	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-4
	1	1	1	1
	1.288	-0.2302	-4.3248	-12.4127
	1.391	-0.8936	1.0944	39.9612
	1.4261	-1.1543	4.7387	-47.5154
Periode getar (dt)	0.608	0.20	0.108	0.07
Frekuensi (cps)	1.6447	5.00	14.2867	9.25952

Tabel 5.8 Hasil perhitungan "dumping ratio" tanah lempung tidak terendam air

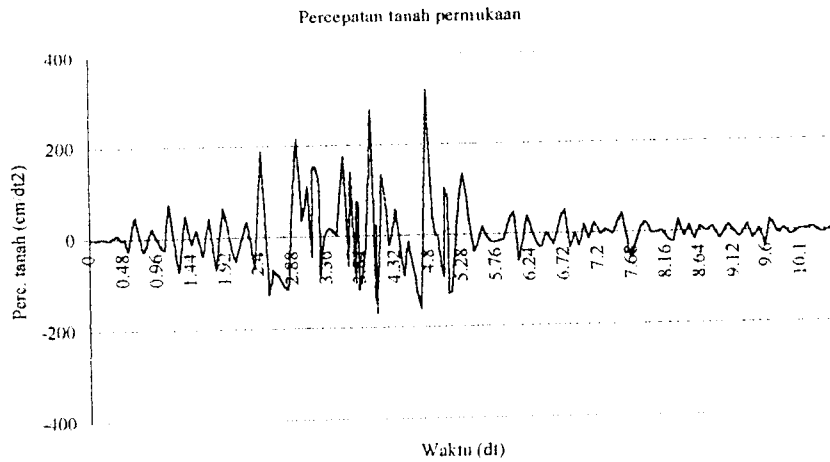
Lapisan	"Dumping ratio" (%)
1	25.750
2	27.480
3	28.790
4	29.699



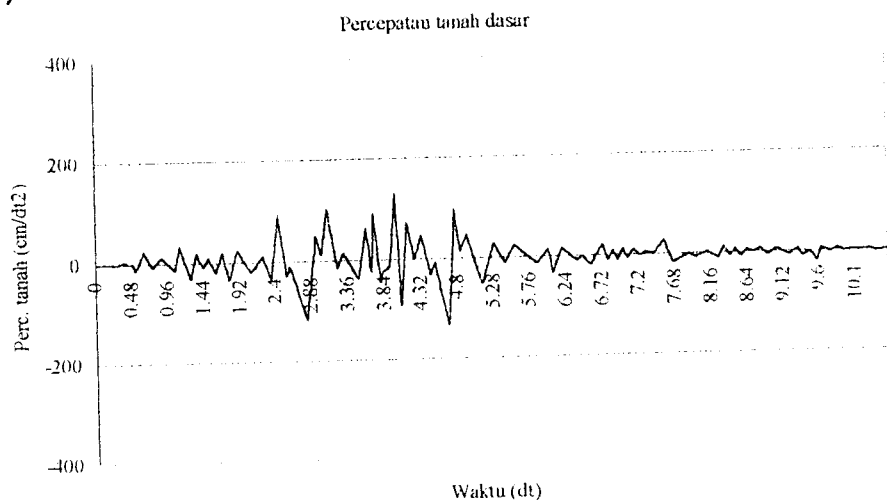
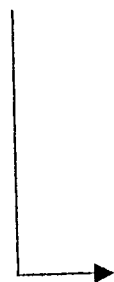
$G_{mak} = 954.164 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.72903 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 919.39 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.5055 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1199.45 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.47027 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1136.23 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.3095 \text{ gr/cm}^3$



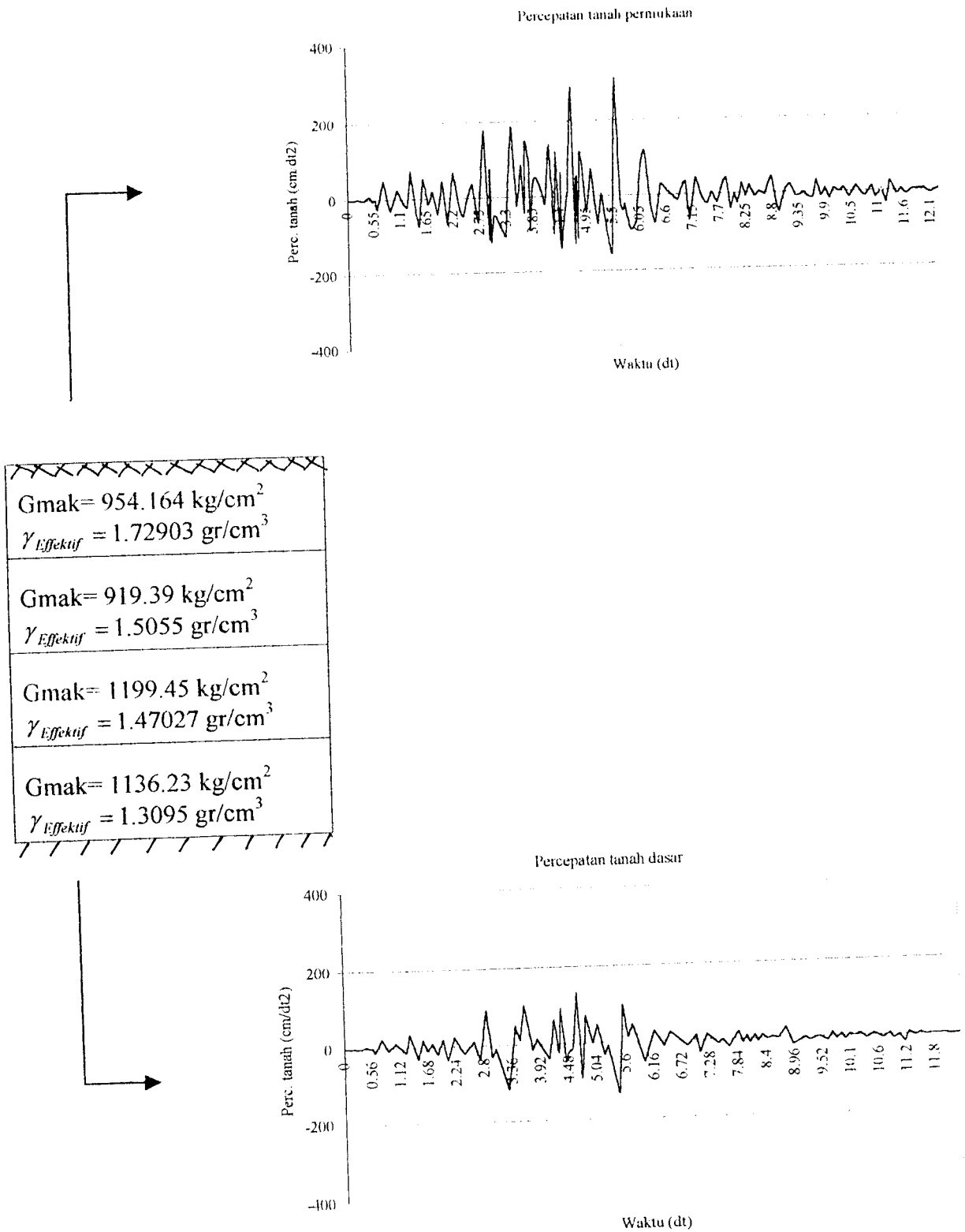
Gambar 5.9 Percepatan tanah akibat gempa Montana 1



$G_{mak} = 954.164 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.72903 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 919.39 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.5055 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1199.45 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.47027 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1136.23 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.3095 \text{ gr/cm}^3$

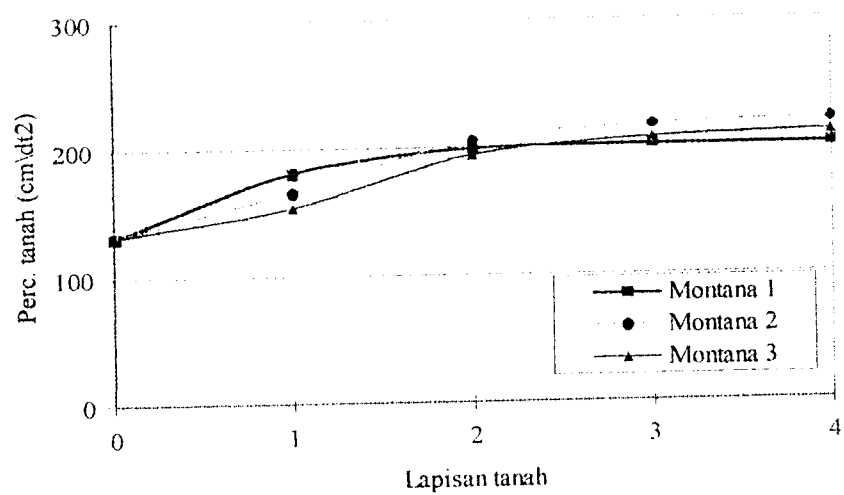


Gambar 5.10 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2

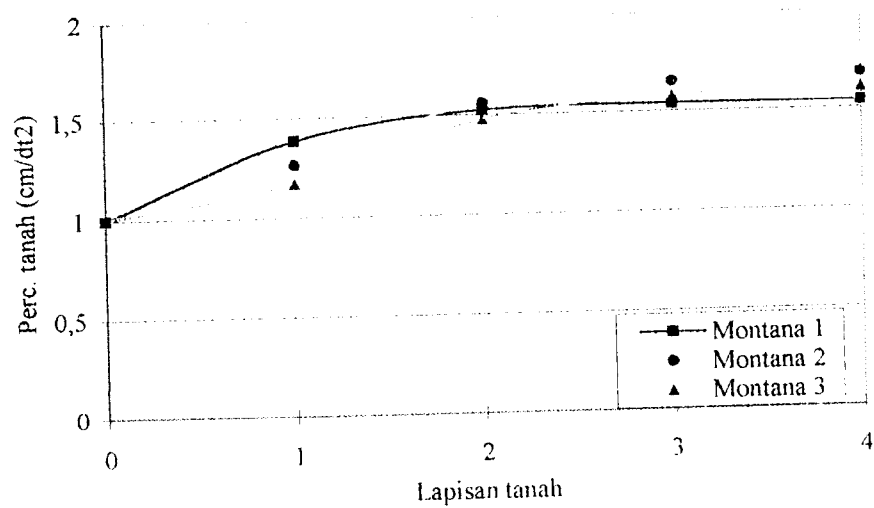


Gambar 5.11 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3





Gambar 5.12 Percepatan tanah maksimum lempung tidak terendam air



Gambar 5.13 Normalisasi percepatan tanah maksimum lempung tidak terendam air

#### 5.2.4 Pembahasan Lapisan Tanah Lempung Tidak Terendam Air

Untuk lapisan tanah lempung tidak terendam air, percepatan tanah akibat gempa Montana 1,2 dan 3 pada "base rock" dan pada permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.9, 5.10 dan gambar 5.11.

Berdasarkan gambar 5.9, 5.10 dan 5.11 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut dapat mencapai 150%.

Hal ini disebabkan oleh endapan tanah lempung, yang mana tanah endapan yang dalam akan menyebabkan waktu getar yang besar. Hal ini terjadi karena pada tanah endapan yang sangat dalam akan memiliki nilai kekakuan struktur tanah yang kecil, sehingga menyebabkan nilai frekuensi alam menjadi kecil dan waktu getar menjadi besar. Selanjutnya bergesernya waktu getar tanah endapan juga akan berkecenderungan terjadinya amplifikasi percepatan tanah.

Amplifikasi juga terjadi karena tanah lempung memiliki nilai Plastisitas Index (PI) yang relatif tinggi, dimana tanah lempung dengan nilai PI yang tinggi akan berkecenderungan memiliki perilaku elastik dan akan cenderung berespon linier pada saat terjadi gempa, sehingga percepatan tanah akan tetap bertambah sesuai dengan sifat linier tanah tersebut. Hal inilah yang mengakibatkan tanah yang mempunyai PI tinggi berkecenderungan menyebabkan amplifikasi terhadap percepatan tanah.

Redaman material tanah juga merupakan sebab terjadinya amplifikasi percepatan tanah. Tanah yang mempunyai plastisitas indeks yang tinggi akan

bersifat linier, maka luasan hysteresis loop pada sifat dinamik tanah akan semakin kecil. Hal ini berarti bahwa redaman material tanah menjadi semakin kecil. Apabila redaman material tanah kecil, maka respon tanah akibat gempa akan semakin besar. Semakin besar amplifikasi percepatan tanah adalah salah satu akibat dari kecilnya nilai redaman material tanah endapan tersebut.

Gambar 5.12 menunjukkan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah lempung tidak terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.13 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum, yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock".

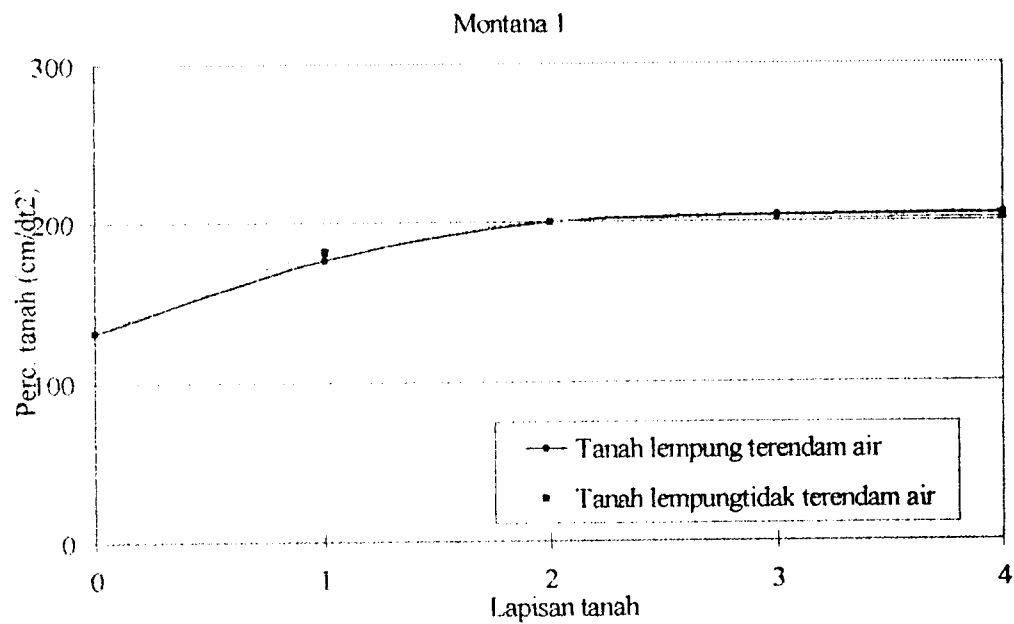
Berdasarkan gambar 5.12 dan 5.13 tersebut dapat dijelaskan bahwa:

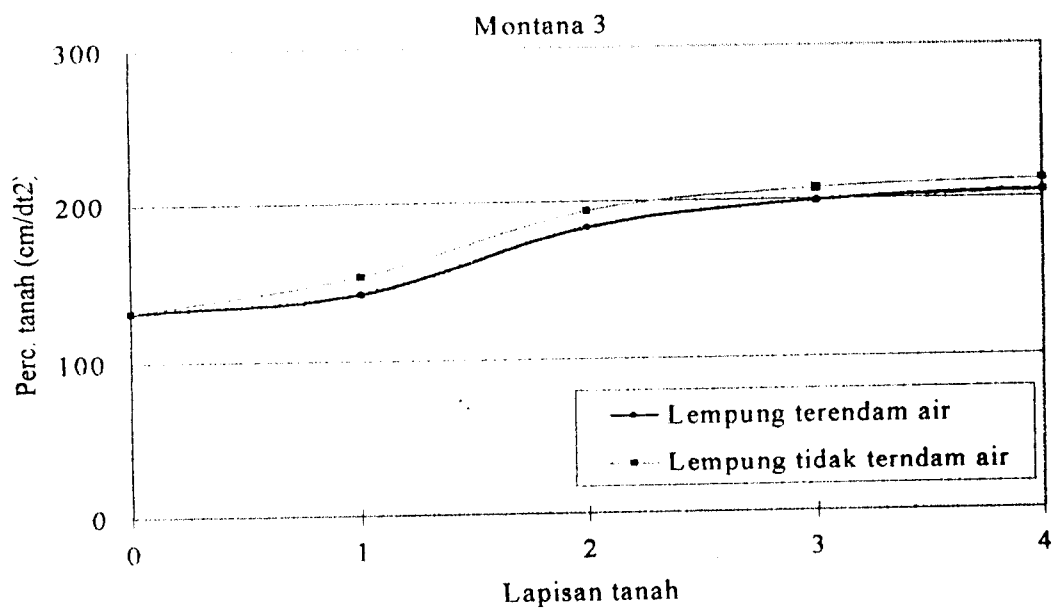
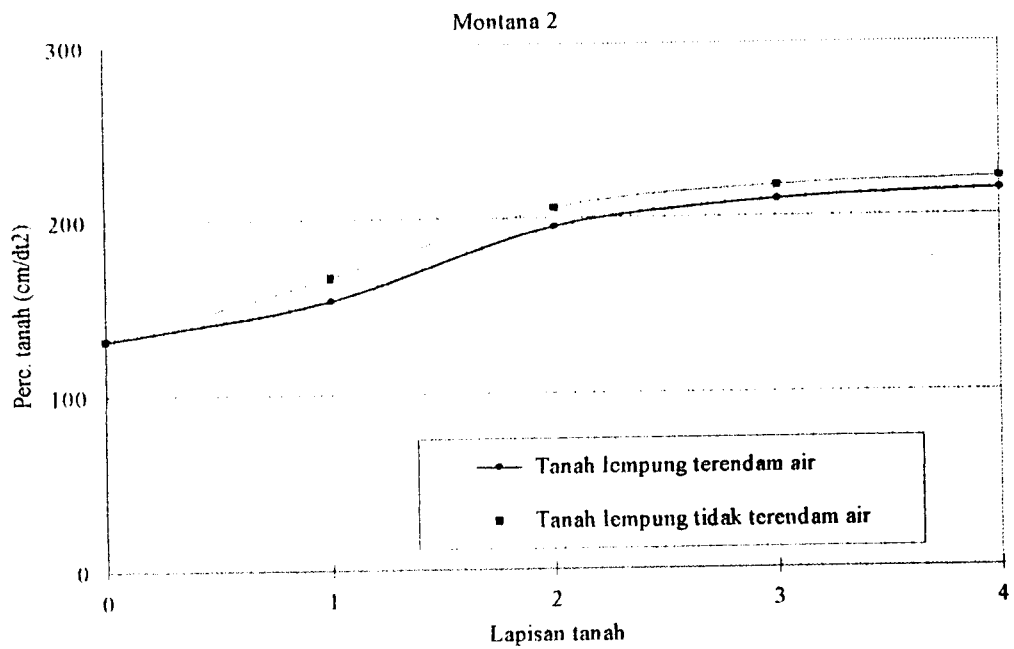
- a. Pada lapis ke-1 nilai gempa Montana 1 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 2 dan Montana 3.
- b. Pada lapis ke-2 nilai gempa Montana 2 nilainya paling tinggi kemudian diikuti oleh gempa Montana 1 dan Montana 3.
- c. Untuk kondisi lapisan ke-3 dan ke-4 pada gempa Montana 2 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 3 dan Montana 1.

Adanya perbedaan nilai maksimum percepatan tanah pada setiap lapis tersebut disebabkan karena properti tanah yang bervariasi setiap lapisan yang mengakibatkan perbedaan nilai mode shape dan perbedaan data input percepatan tanah gempa Montana 1,2 dan 3.

Apabila dibandingkan antara lapisan lempung dalam kondisi terendam dan tidak terendam air, maka berdasarkan analisis diperoleh hasil bahwa pada tanah

lempung tidak terendam air, nilai percepatan maksimum tanah akan lebih besar dibandingkan dengan tanah lempung terendam air pada kondisi gempa Montana 2 dan Montana 3, sedangkan nilai percepatan maksimum pada Montana 1 nilainya hampir sama. Hal di atas dapat dilihat pada gambar di bawah ini yang mengacu pada gambar 5.6 dan 5.12.



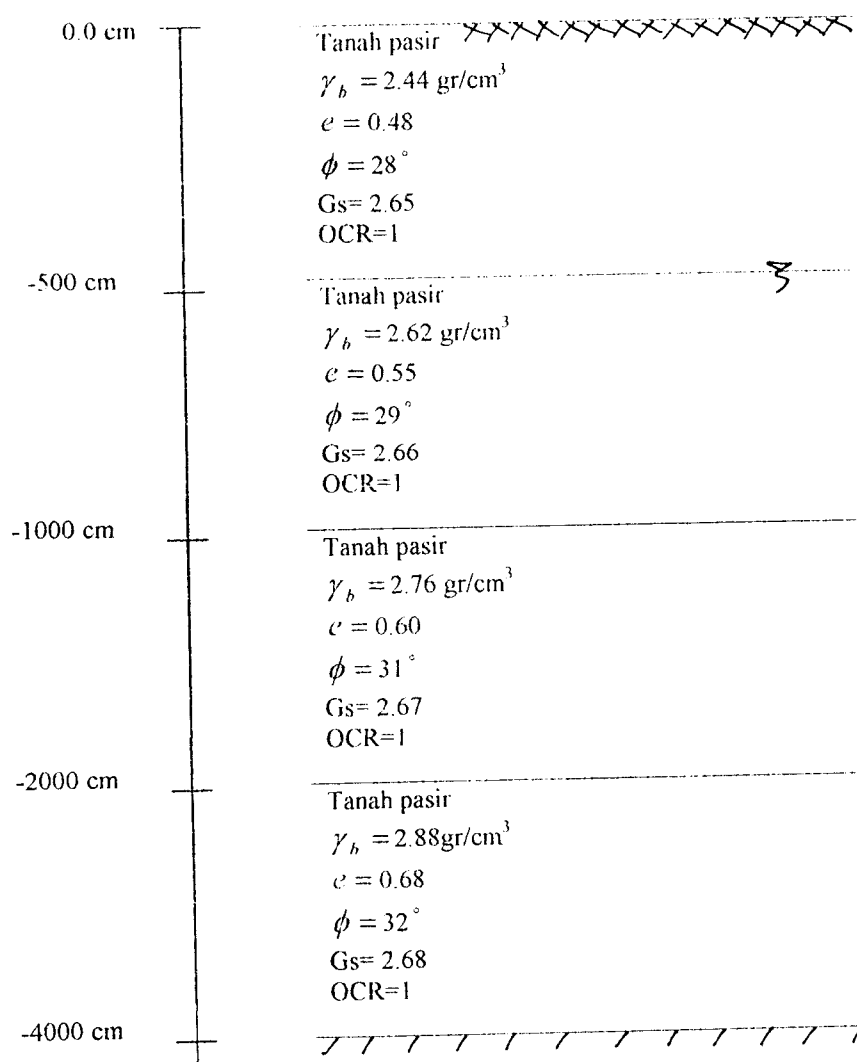


Gambar 5.14. Percepatan tanah maksimum tanah lempung terendam air dan tidak terendam air

Hal tersebut disebabkan karena adanya kesamaan atau kedekatan frekuensi antara frekuensi gempa Montana 2 = 0.09 cps dan gempa Montana 3 = 0.08 cps dengan frekuensi tanah lempung tidak terendam air = 1.6447 cps, sedangkan tanah lempung terendam air frekuensinya adalah 1.759 cps yang relatif jauh nilainya dengan frekuensi gempa Montana 2 dan Montana 3. Pada tanah lempung tidak terendam air akan menyebabkan terjadinya resonansi, sehingga akan mengakibatkan respon lapisan tanah menjadi lebih besar.

### 5.3 Lapisan Tanah Pasir

#### 5.3.1 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir Terendam Air



Gambar 5.15 Profil tanah pasir terendam air

#### a) Perhitungan Massa dan Kekakuan Lapisan Tanah

Perhitungan juga dilakukan tiap lapisan tanah dengan ketebalan tertentu dan data-data lapisan tanah yang telah ditetapkan.

- Menghitung  $\gamma_{\text{efektif}}$

$$\text{Diatas muka tanah air, } \gamma_{\text{efektif}} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e} \quad (5.11)$$

$$\text{Dibawah muka air tanah, } \gamma_{\text{efektif}} = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1 + e} \quad (5.12)$$

- Menghitung  $K_o$

Nilai  $K_o$  untuk tanah pasir,

$$K_o = 1 - \sin \phi \quad (5.13)$$

- Menghitung  $\bar{\sigma}_0$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_o * \bar{\sigma}_1 \quad (5.14)$$

Untuk menghitung  $\bar{\sigma}_1$  seperti persamaan dibawah ini:

$$Z=0-500 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{11} = \gamma_{\text{eff}} * 500$$

$$Z=500-1000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{12} = \bar{\sigma}_{11} + \gamma_{\text{eff}} * 500$$

$$Z=1000-2000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{13} = \bar{\sigma}_{12} + \gamma_{\text{eff}} * 1000$$

$$Z=2000-4000 \text{ cm, } \bar{\sigma}_{14} = \bar{\sigma}_{13} + \gamma_{\text{eff}} * 2000 \quad (5.15)$$

- Menghitung  $G=G_{\text{max}}$

Nilai  $G_{\text{max}}$  untuk tanah pasir adalah,

$$G_{\text{max}} = 326 \frac{(2,97 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_0^{0,5} \quad (5.16)$$



- Menghitung massa dan kekakuan

Nilai massa dan kekakuan tiap lapisan tanah adalah,

$$m_i = \frac{(\gamma_{i+1}h_{i+1} + \gamma_i h_i) * 100 * 100}{g}$$

$$k_i = \frac{(c_i * 100 * 100)}{2h_i} \quad (5.17)$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  = lapisan tanah dan  $g = 980 \text{ kg/cm}^2$ .

Hasil perhitungan massa dan kekakuan berdasarkan persamaan-persamaan di atas dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5.9 Hasil perhitungan  $G_{max}$  tanah pasir terendam air

Kedalaman (cm)	e	$\phi$ ( $^\circ$ )	Ko	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.48	28	0.530355	0	0	0	0
500	0.48	28	0.530355	895.25	474.8001	0.61495	1059.326
500	0.55	29	0.515012	895.25	461.0647	0.605793	922.4834
1000	0.55	29	0.515012	1430.7	736.828	0.968119	1166.167
1000	0.6	31	0.484775	1430.7	693.568	0.939279	1045.14
2000	0.6	31	0.484775	2474.45	1199.552	1.624518	1374.484
2000	0.68	32	0.46989	2474.45	1162.72	1.599963	1170.082
4000	0.68	32	0.46989	4474.45	2102.5	2.89315	1573.428

Tabel 5.10 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir terendam air

Lapisan	Massa (kgd <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	15.5	7867.138
2	8.05	13744.84
3	7.29	23323.34
4	4.57	21186.52

## b) Perhitungan Mode shape

Data massa dan kekakuan tanah berdasarkan hasil perhitungan di atas:

$$m_1 = 15,5 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_1 = 7867,138 \text{ kg/cm}$$

$$m_2 = 8,05 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_2 = 13744,84 \text{ kg/cm}$$

$$m_3 = 7,29 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_3 = 23323,34 \text{ kg/cm}$$

$$m_4 = 4,57 \text{ kgdt}^2/\text{cm} \quad k_4 = 21186,52 \text{ kg/cm}$$

Data-data tersebut di atas dipakai untuk menyelesaikan persamaan keseimbangan dan analisis perhitungan seperti langkah-langkah pada sub bab 3.5. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5.11 Hasil perhitungan mode shape tanah pasir terendam air

	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-4
	1	1	1	1
	1.3742	-0.082	-3.9266	-9.9535
	1.5113	-0.6781	-0.2213	18.7039
	1.5708	-0.9921	4.229	-15.5265
Periode getar (dt)	0.474	0.164	0.089	0.06
Frekuensi (cps)	2.1097	6.0975	11.23592	16.6667

## c) Perhitungan "damping ratio"

Nilai "damping ratio" untuk lapisan tanah pasir adalah,

$$\text{- Pasir kering } D = 33 - 1,5 (\log N)$$

$$\text{- Pasir basah } D = 28 - 1,5 (\log N) \quad (5.18)$$

dengan nilai  $\bar{\sigma}_0$  berdasarkan tabel 5.9, nilai  $f$  = frekuensi berdasarkan tabel 5.11 sedangkan nilai  $N$  berdasarkan gambar 3.11. Hasil perhitungan “dumping ratio” dapat dilihat pada tabel 5.12 berikut:

Tabel 5.12 Hasil perhitungan “dumping ratio” tanah pasir terendam air

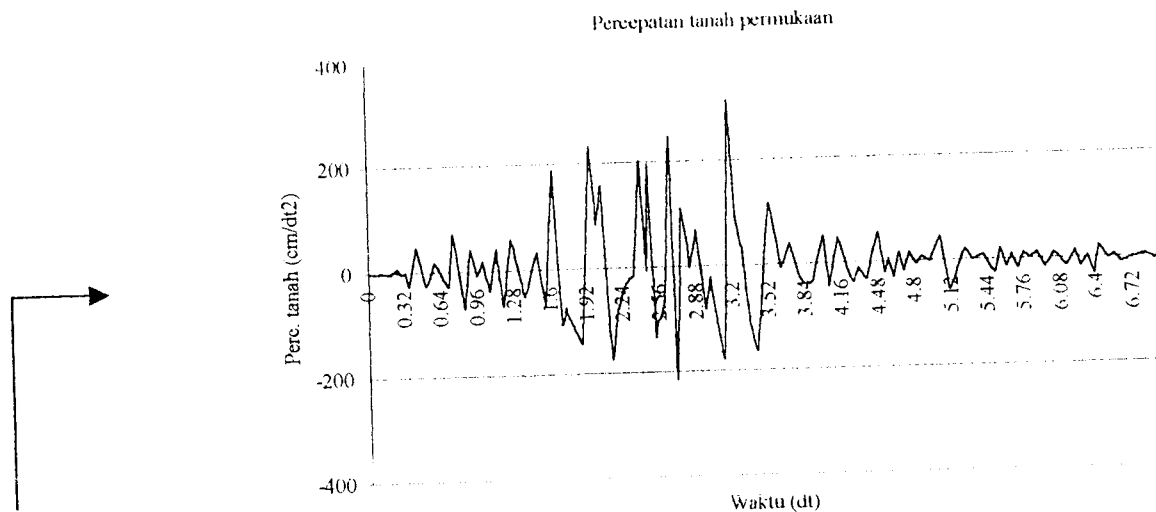
Lapisan	“Dumping ratio” (%)
1	27,3979
2	27,3979
3	27,3979
4	32,0969

Untuk proses hitungan, nilai yang dipakai adalah “dumping ratio” equivalent. Untuk menghitung “dumping ratio equivalent” dipakai rumus.

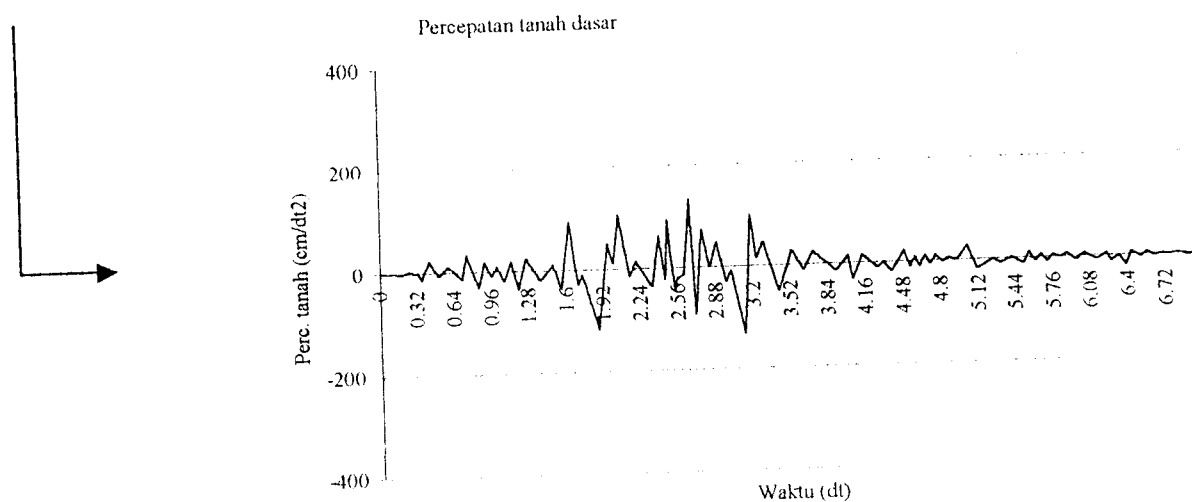
$$D_{eq} = \frac{\sum D_i * h_i}{\sum h_i} \quad (5.19)$$

d) Perhitungan percepatan maksimum lapisan tanah

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel-tabel tersebut di atas, analisis perhitungan percepatan maksimum lapisan tanah pasir terendam air dapat dilakukan sesuai dengan langkah-langkah pada sub bab 3.5. Hasil perhitungan ditunjukkan pada gambar dan grafik berikut:

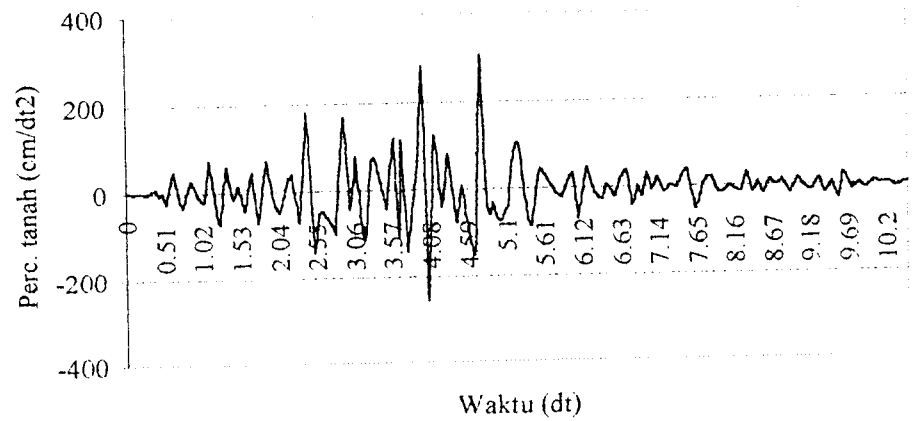


$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1374.48 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.04375 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1573.428 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1 \text{ gr/cm}^3$



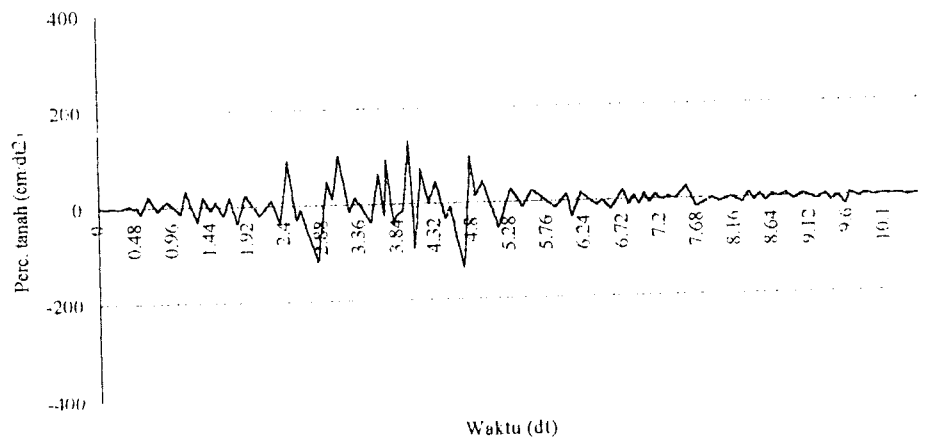
Gambar 5.16 Percepatan tanah akibat gempa Montana 1

Percepatan tanah permukaan



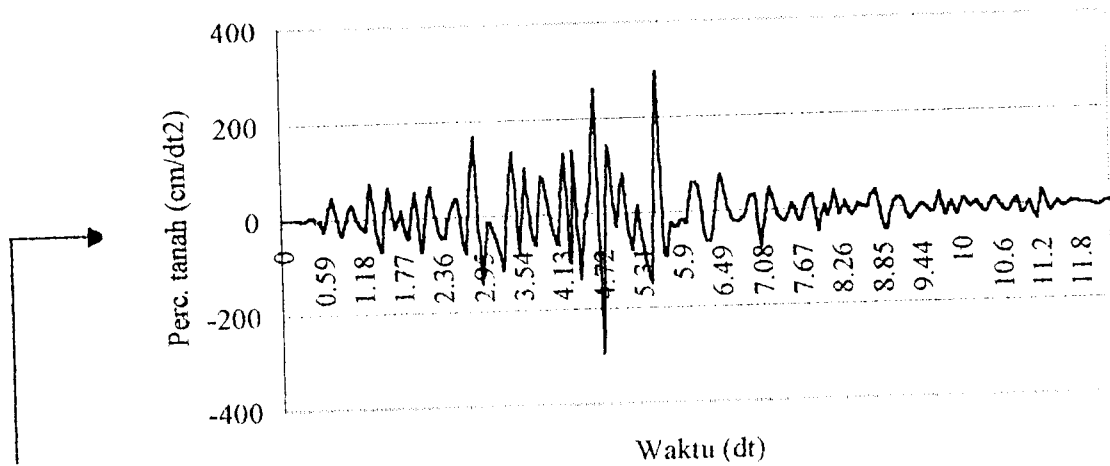
$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}$ $\gamma_{Efektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1374.48 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.04375 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1573.428 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1 \text{ gr/cm}^3$

Percepatan tanah dasar



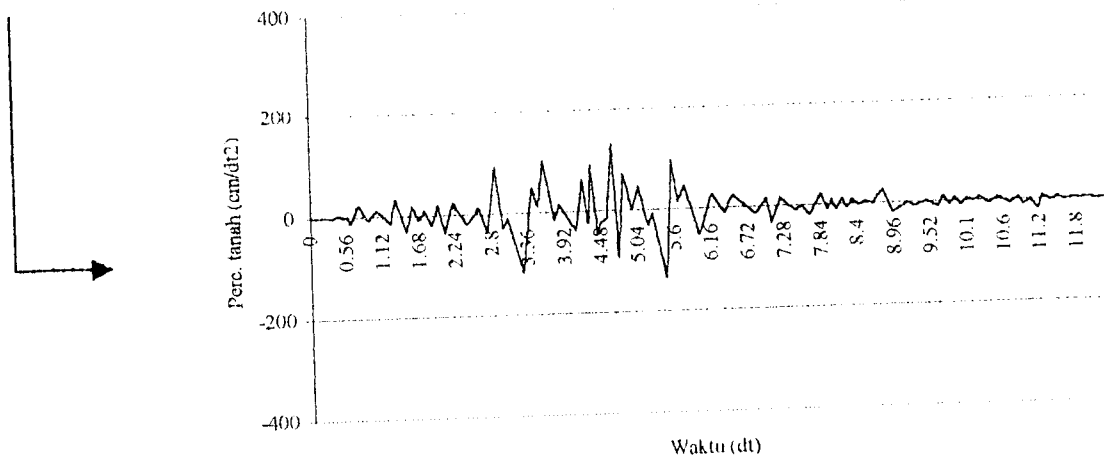
Gambar 5.17 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2

Percepatan tanah permukaan

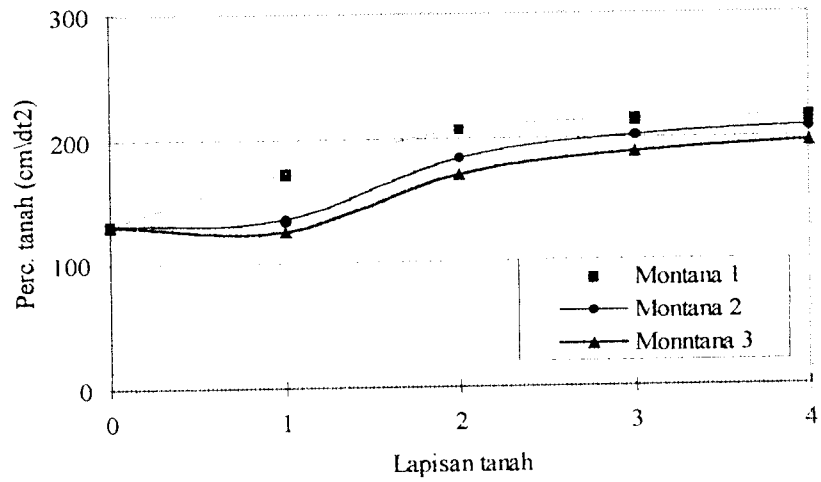


$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{t, efektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1374.48 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{t, efektif} = 1.04375 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1573.428 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1 \text{ gr/cm}^3$

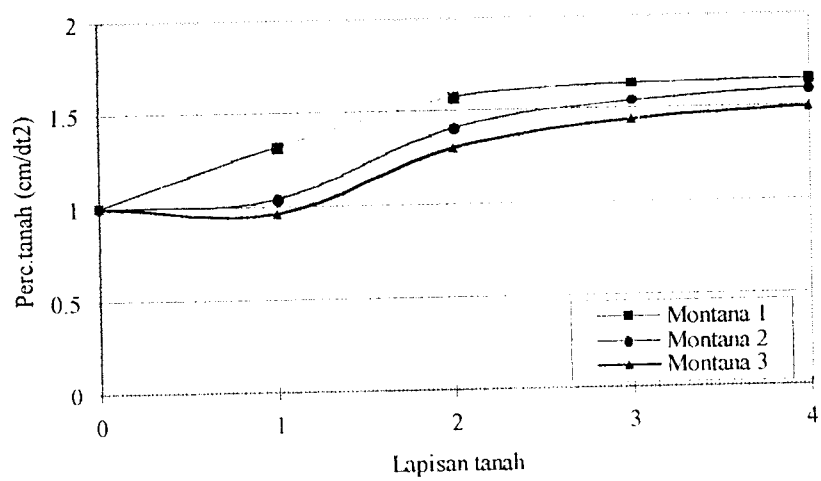
Percepatan tanah dasar



Gambar 5.18 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3



Gambar 5.19 Percepatan tanah maksimum pasir terendam air



Gambar 5.20 Normalisasi percepatan tanah maksimum pasir terendam air

### 5.3.2 Pembahasan Lapisan Tanah Pasir Terendam Air

Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 pada "base rock" dan percepatan tanah pada permukaan untuk lapisan tanah Pasir terendam air disajikan pada gambar 5.16. Sedangkan percepatan tanah akibat gempa Montana 2 dan Montana 3 pada "base rock" dan permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.17 dan gambar 5.18.

Berdasarkan gambar 5.16, 5.17 dan 5.18 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 juga terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut dapat mencapai 150%.

Terjadinya amplifikasi percepatan tanah pada lapisan tanah pasir disebabkan karena tanah pasir memiliki nilai plastisitas indeks yang relatif kecil, yang akan menyebabkan "degradasi" (kekuatan tanah pasir mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh menurunannya nilai modulus geser maksimum) yang lebih besar atau disebut juga sebagai tanah yang mempunyai derajat non linier yang tinggi. Kekuatan tanah pasir yang cepat terdegradasi ini akan berakibat pada bertambahnya periode getar tanah endapan pasir.

Gambar 5.19 merupakan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah pasir terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.20 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock", artinya nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock" atau batuan dasar.



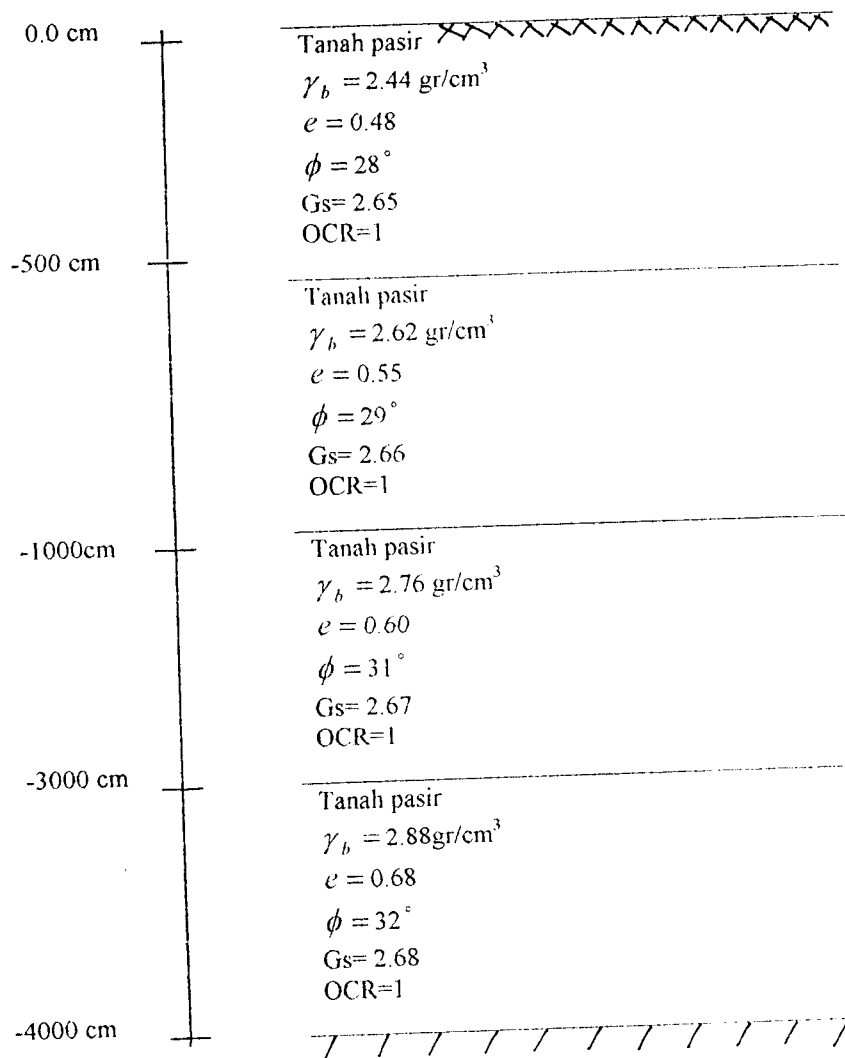
Berdasarkan gambar 5.19 dan 5.20 tersebut, dapat dijelaskan bahwa:

- a. Pada lapis ke-1 pada gempa Montana 1 mengalami kenaikan nilai percepatan tanah ( amplifikasi), sedangkan pada gempa Montana 2 dan 3 mengalami penurunan nilai percepatan tanah ( deamplifikasi)
- b. Pada lapis ke-2,3 dan ke-4 seluruh gempa Montana mengalami kenaikan nilai percepatan tanah (amplifikasi).
- c. Untuk kondisi lapis ke-2, ke-3 dan ke-4 nilai percepatan tanah tertinggi adalah pada gempa Montana 1 setelah itu diikuti gempa Montana 2 dan montana 3.

Kondisi yang menyebabkan penurunan nilai percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 lapisan tanah pasir, disebabkan karena kondisi tanah pasir terendam air tersebut memiliki nilai redaman material yang kecil, sehingga pada lapis ke-1 lapisan tanah pasir akan terjadi penurunan nilai percepatan tanah (deamplifikasi).

Selain itu penyebab penurunan nilai percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 lapisan tanah pasir disebabkan oleh karena properti lapisan tanah pasir itu sendiri.

### 5.3.3 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir Tidak Terendam Air



Gambar 5.21 Profil tanah pasir tidak terendam air

Analisis perhitungan analog dengan analisis perhitungan pada lapisan tanah pasir terendam air. Untuk menghitung  $\gamma_{\text{efektif}}$  pada lapisan tanah pasir tidak terendam air, rumus yang dipakai adalah,

$$\gamma_{\text{efektif}} = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e} \quad (5.20)$$

Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel dan gambar berikut ini:

Tabel 5.13 Hasil perhitungan  $G_{max}$  tanah pasir tidak terendam air

Kedalaman (cm)	$e$	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$K_0$	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.48	28	0.530355	0	0	0	0
500	0.48	28	0.530355	1220	647.0328	0.838022	1236.623
500	0.55	29	0.515012	1220	628.3149	0.825543	1076.877
1000	0.55	29	0.515012	2530	1302.981	1.711987	1550.767
1000	0.6	31	0.484775	2530	1226.481	1.660988	1389.826
2000	0.6	31	0.484775	5290	2564.461	3.472974	2009.686
2000	0.68	32	0.46989	5290	2485.719	3.420479	1710.822
4000	0.68	32	0.46989	11050	5192.286	7.144857	2472.624

Tabel 5.14 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir tidak terendam air

Lapisan	Massa (kgdt <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	24.8	12363.12
2	12.9	20096.86
3	8.94	31015.35
4	4.57	24732.47

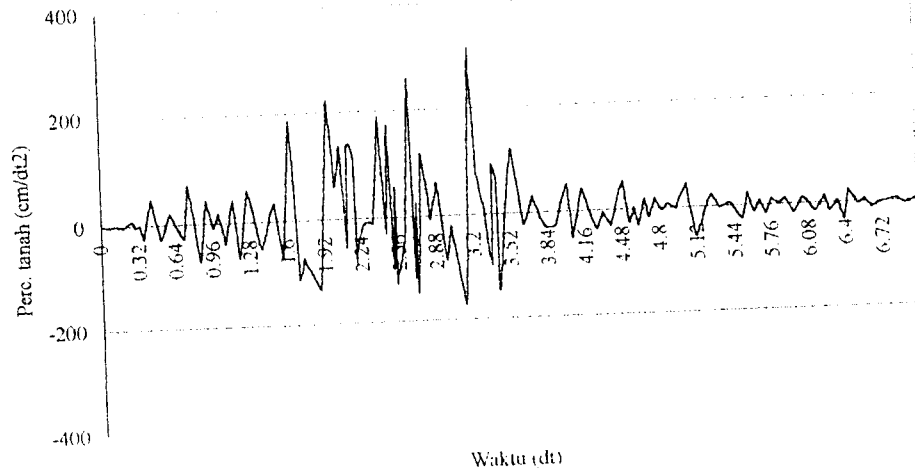
Tabel 5.15 Hasil perhitungan mode shape tanah pasir tidak terendam air

	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-4
	1	1	1	1
	1.3733	-0.2333	-4.2267	-11.3293
	1.5033	-0.8871	0.7089	30.1102
	1.5598	-1.2266	5.6853	-32.0913
Periode getar (dt)	0.448	0.162	0.091	0.06
Frekuensi (cps)	2.2321	6.1728	10.9890	16.6667

Tabel 5.16 Hasil perhitungan "dumping ratio" tanah pasir tidak terendam air

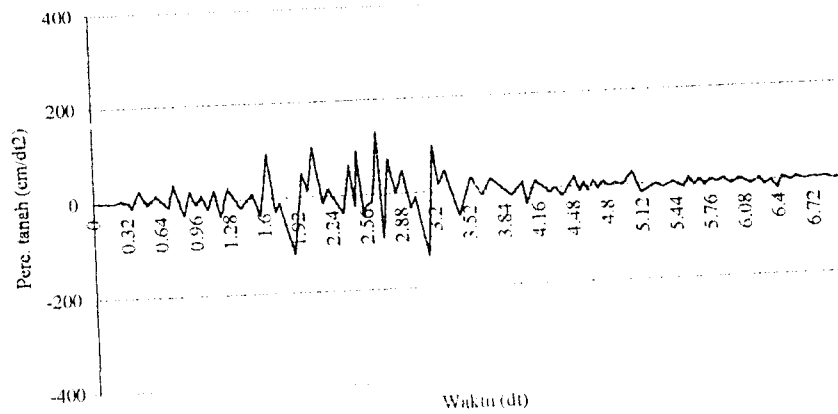
Lapisan	"Dumping ratio" (%)
1	32.0969
2	32.0969
3	32.0969
4	32.0969

Percepatan tanah permukaan

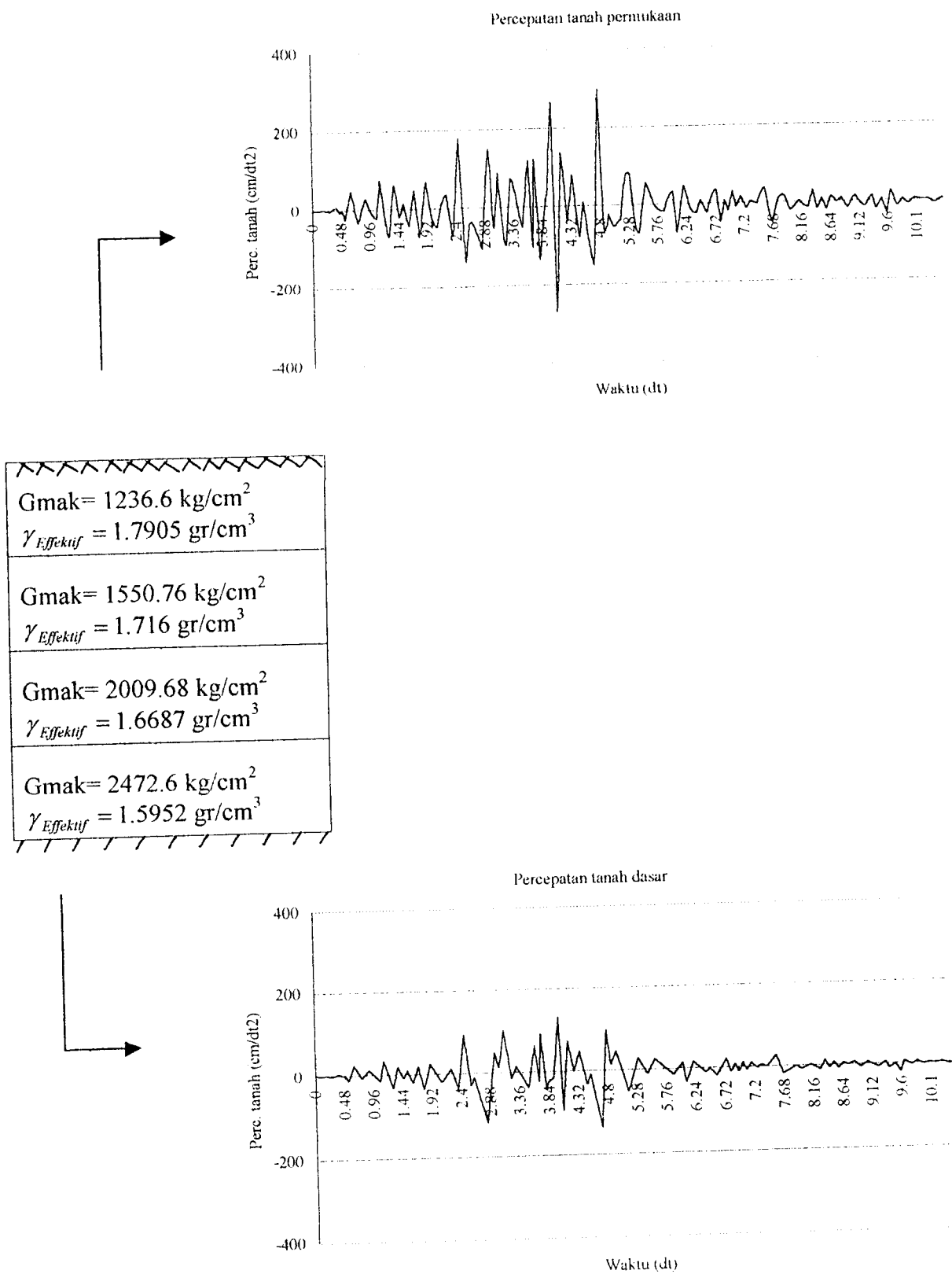


$G_{mak} = 1236.6 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.7905 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1550.76 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.716 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 2009.68 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.6687 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 2472.6 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Efektif} = 1.5952 \text{ gr/cm}^3$

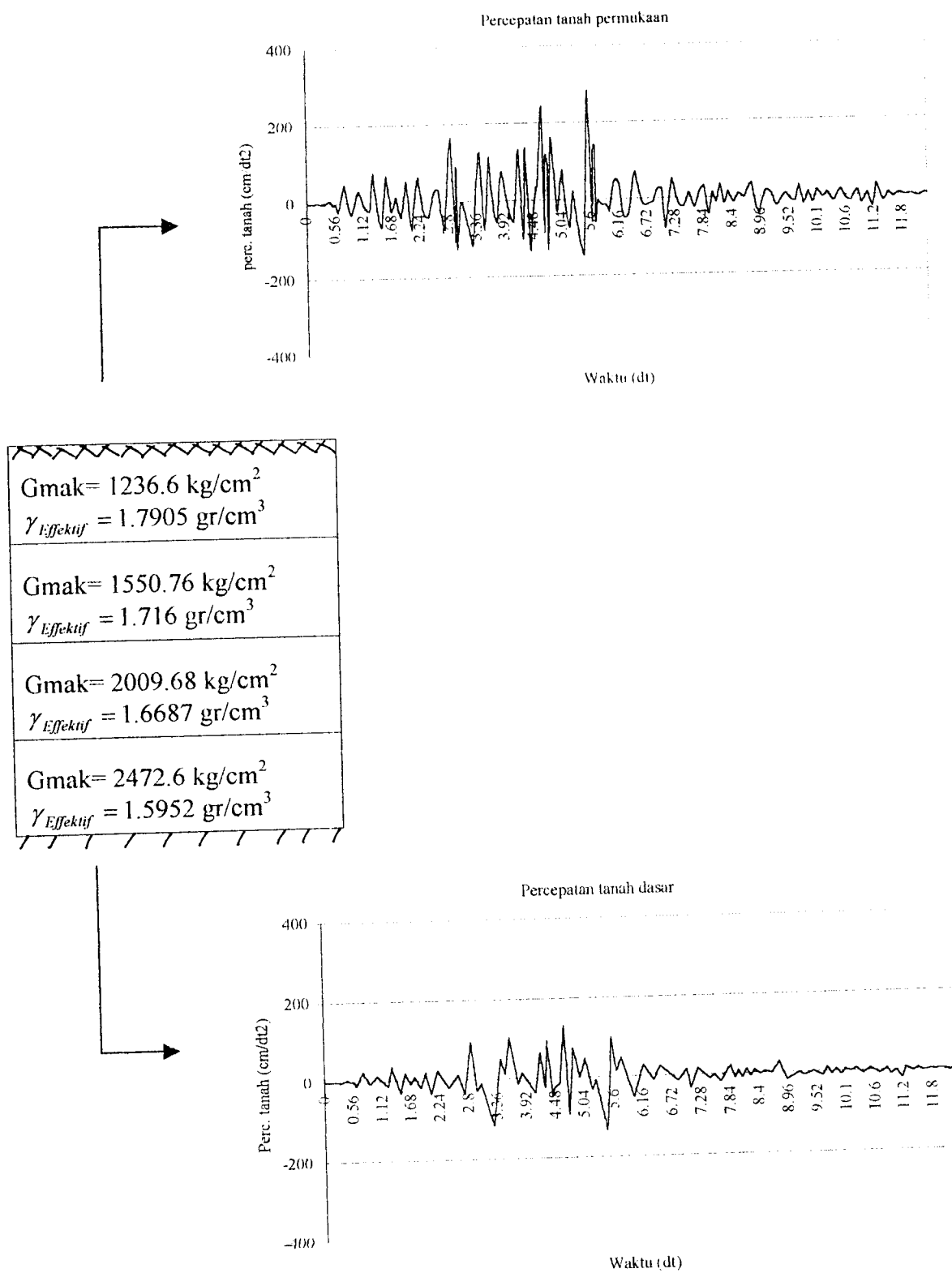
Percepatan tanah dasar



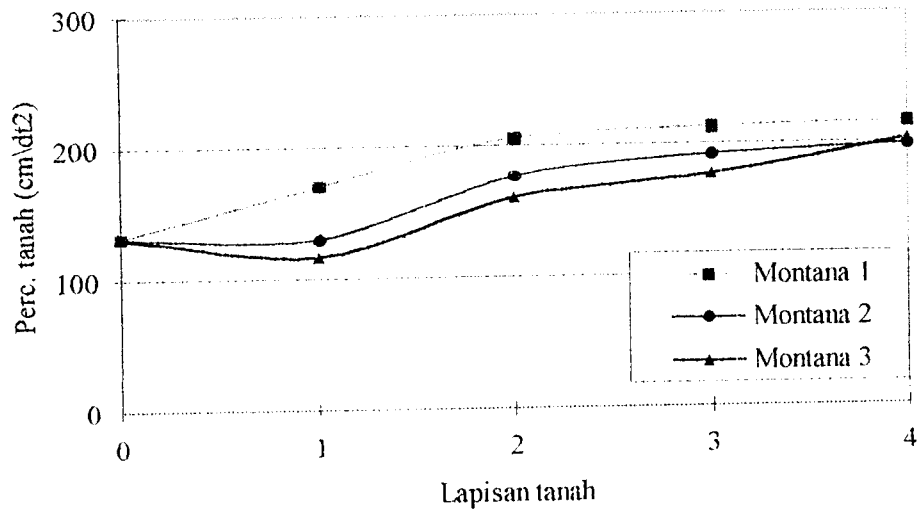
Gambar 5.22 Percepatan tanah akibat gempa Montana 1



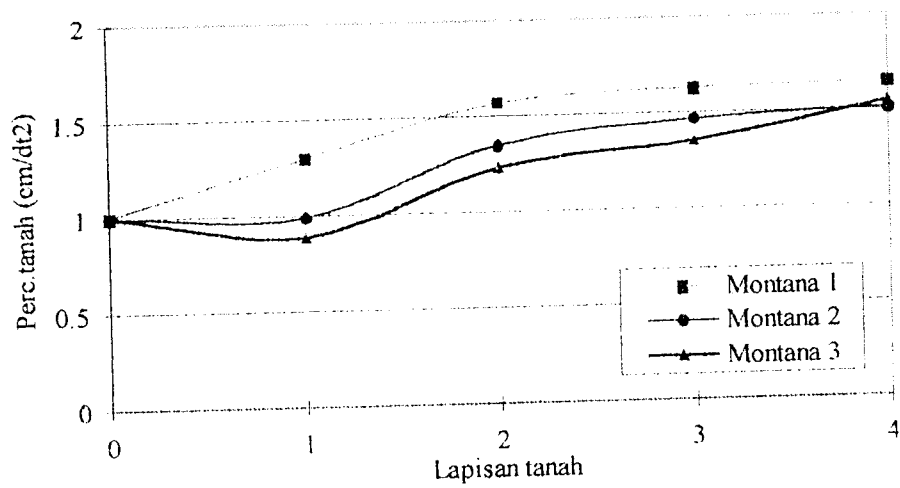
Gambar 5.23 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2



Gambar 5.24 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3



Gambar 5.25 Percepatan tanah maksimum pasir tidak terendam air



Gambar 5.26 Normalisasi percepatan tanah maksimum pasir tidak terendam air

#### 5.3.4 Pembahasan Lapisan Tanah Pasir Tidak Terendam Air

Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 pada “base rock” dan percepatan tanah pada permukaan untuk lapisan tanah pasir tidak terendam air disajikan pada gambar 5.22. Sedangkan percepatan tanah akibat gempa Montana 2 dan Montana 3 pada “base rock” dan permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.23 dan gambar 5.24.

Berdasarkan gambar 5.22, 5.23 dan 5.24 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut, juga dapat mencapai 150%.

Terjadinya amplifikasi percepatan tanah pada lapisan tanah pasir disebabkan karena tanah pasir memiliki nilai plastisitas indeks yang relatif kecil, yang akan menyebabkan “degradasi” (kekuatan tanah pasir mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh menurunannya nilai modulus geser maksimum) yang lebih besar atau disebut juga sebagai tanah yang mempunyai derajat non linier yang tinggi. Kekuatan tanah pasir yang cepat terdegradasi ini akan berakibat pada bertambahnya periode getar tanah endapan pasir.

Gambar 5.25 menunjukkan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah pasir tidak terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.26 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada “base rock”.



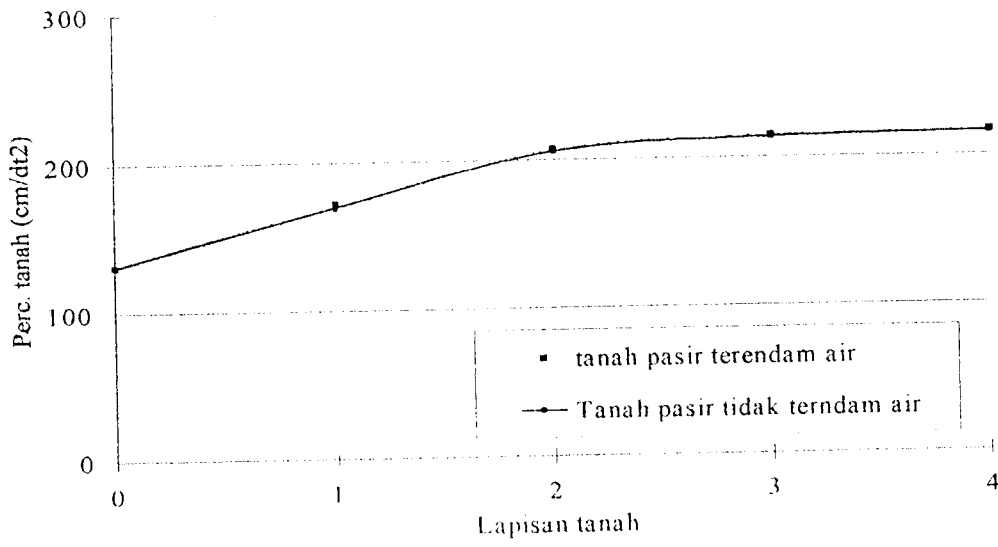
Hasil analisis berdasarkan gambar 5.25 dan 5.26 menunjukkan bahwa:

- a. Pada lapis ke-1 pada gempa Montana 1 mengalami kenaikan nilai percepatan tanah, sedangkan pada gempa Montana 2 dan Montana 3 mengalami penurunan nilai percepatan tanah.
- b. Pada lapis ke- 2,3 dan ke-4 seluruh gempa Montana mengalami kenaikan nilai percepatan tanah.
- c. Untuk kondisi lapisan ke-2 dan ke-3 nilai percepatan tanah tertinggi terjadi pada gempa Montana 1, setelah itu diikuti oleh gempa Montana 2 dan Montana 3.
- d. Untuk kondisi lapisan ke-4 nilai percepatan tanah tertinggi adalah pada gempa Montana 1 setelah itu diikuti gempa Montana 3 dan Montana 4.

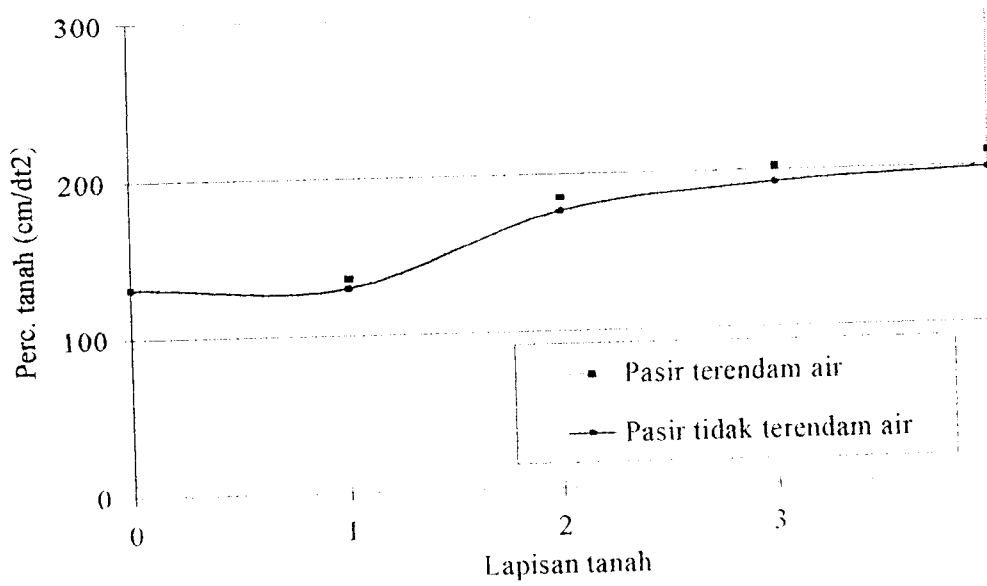
Kondisi yang menyebabkan penurunan nilai percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 lapisan tanah pasir tersebut adalah karena properti lapisan tanah pasir itu sendiri.

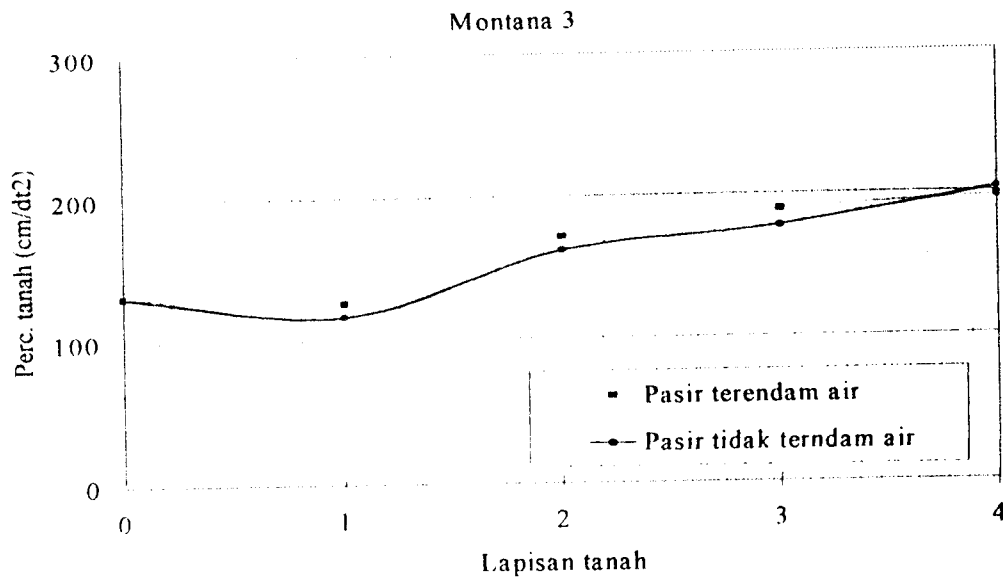
Apabila dibandingkan antara lapisan pasir dalam kondisi terendam air dan tidak terendam air, maka berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa nilai percepatan tanah maksimum untuk tanah pasir terendam air mengalami kenaikan pada kondisi gempa Montana 2 dan montana 3, sedangkan untuk gempa Montana 1 nilainya hampir sama. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 5.27 di bawah ini yang mengacu pada gambar 5.19 dan 5.25.

Montana 1



Montana 2





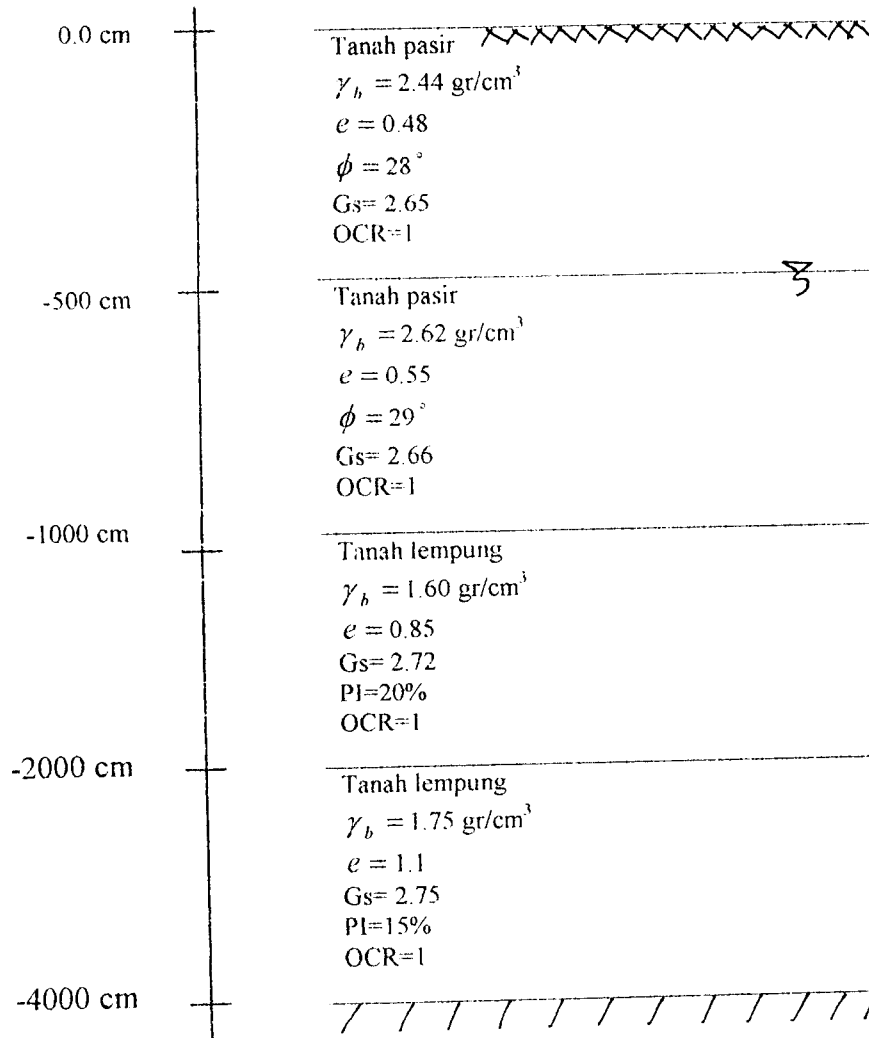
Gambar 5.27. Percepatan tanah maksimum tanah pasir terendam air dan tidak terendam air

Hal tersebut juga disebabkan karena adanya kesamaan atau kedekatan frekuensi antara frekuensi gempa Montana 2 = 0.09 cps dan Montana 3 = 0.08 cps dengan frekuensi tanah pasir terendam air = 2.1097 cps, sedangkan nilai frekuensi tanah pasir tidak terendam air yaitu 2.2321 cps. Pada tanah pasir terendam air akan menyebabkan terjadinya resonansi, sehingga akan mengakibatkan respon lapisan tanah menjadi lebih besar.

## 5.4 Lapisan Tanah Pasir dan Lempung

### 5.4.1 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Terendam Air

Air



Gambar 5.28 Profil tanah pasir dan lempung terendam air

Analisis perhitungan analog dengan analisis perhitungan pada sub bab 5.2.1 dan 5.3.1, hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut ini:

Tabel 5.17 Hasil perhitungan  $G_{max}$  tanah pasir dan lempung terendam air

Kedalaman (cm)	e	PI (%)	OCR	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$K_0$	K	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.48	0	1	28	0.5303548	0	0	0	0	0
500	0.48	0	1	28	0.5303548	0	895.25	474.80011	0.6149501	1059.3261
500	0.55	0	1	29	0.5150122	0	895.25	461.06468	0.6057931	922.48336
1000	0.55	0	1	29	0.5150122	0	1430.7	736.82797	0.9681186	1166.1668
1000	0.85	25	1	0	0.575	0.21	1430.7	822.6525	1.025335	816.56196
2000	0.85	25	1	0	0.575	0.21	2360.7	1357.4025	1.691835	1048.9028
2000	1.1	30	1	0	0.61	0.24	2360.7	1440.027	1.746918	730.83698
4000	1.1	30	1	0	0.61	0.24	4020.7	2452.627	2.975318	953.78601

Tabel 5.18 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir dan lempung terendam air

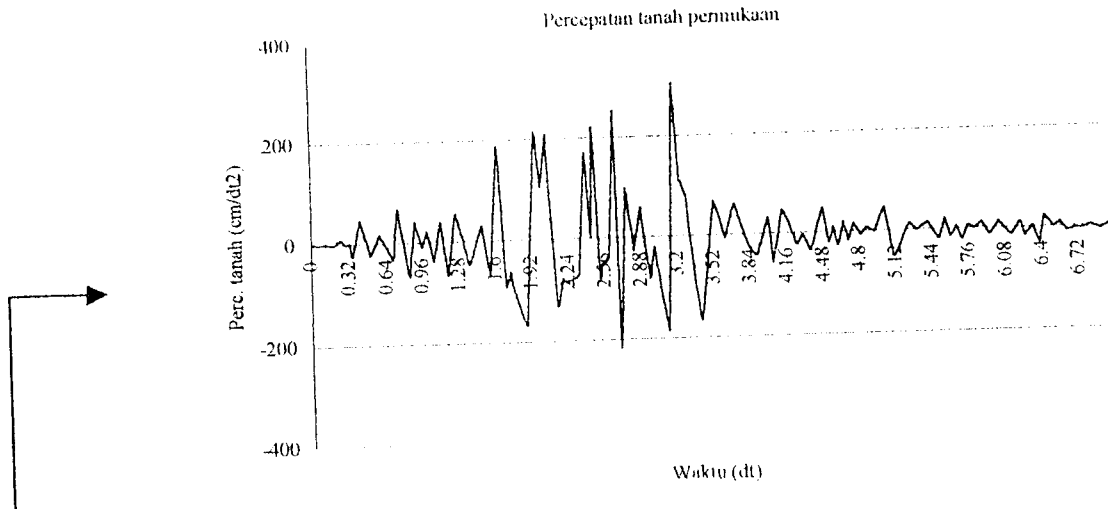
Lapisan	Massa (kgdt <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	13.214	4768.9
2	7.476	10489
3	7.299	23323
4	4.580	21187

Tabel 5.19 Hasil perhitungan mode shape tanah pasir dan lempung terendam air

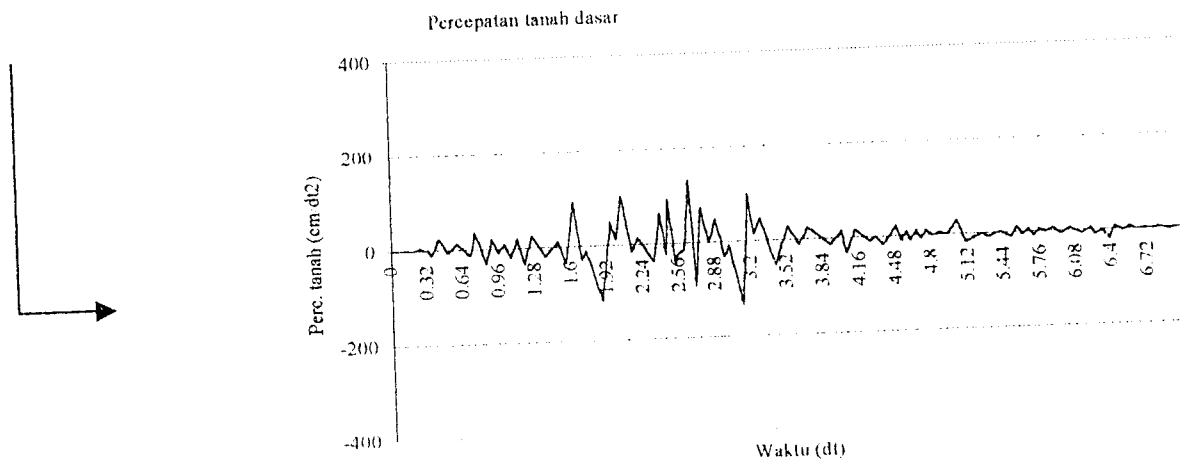
	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-4
	1	1	1	1
	1.303	-0.1549	-4.523	-11.4685
	1.3891	-0.6108	-0.1276	20.6338
	1.4262	-0.8439	4.9197	-16.947
Periode getar (dt)	0.5727	0.1757	0.0912	0.0620
Frekuensi (cps)	1.7461	5.6915	10.9649	16.1290

Tabel 5.20 Hasil perhitungan "dumping ratio" tanah pasir dan lempung terendam air

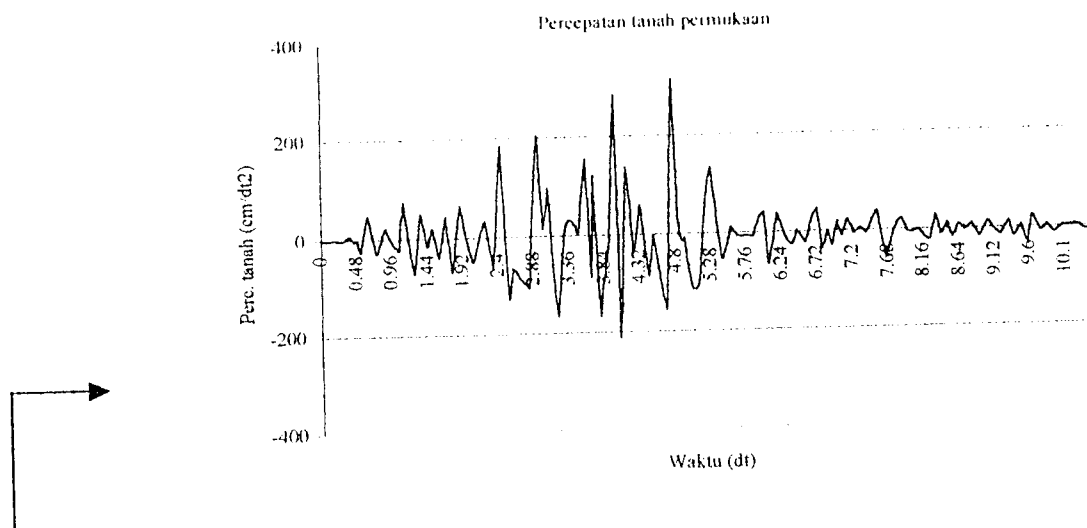
Lapisan	"Dumping ratio" (%)
1	26.8138
2	28.1086
3	27.3979
4	32.3979



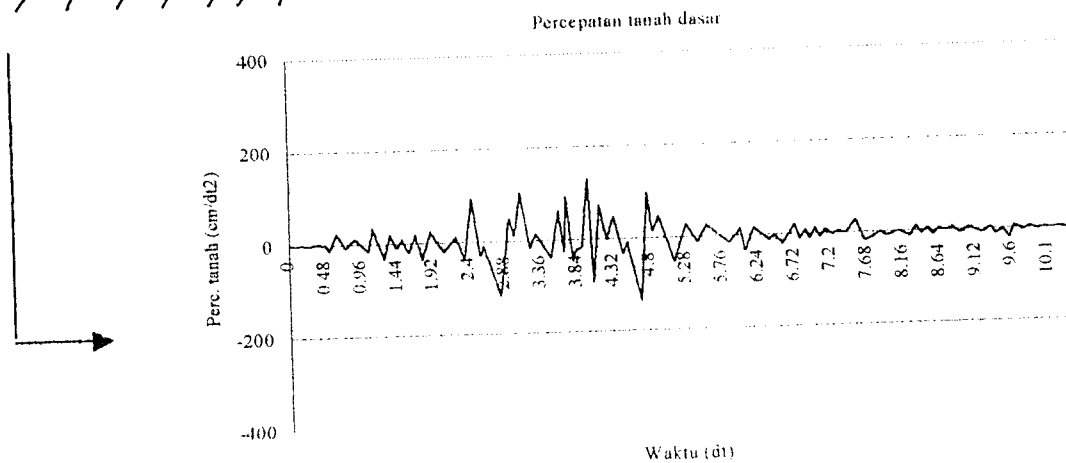
$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1048.9028 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.93 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 953.78601 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.83 \text{ gr/cm}^3$



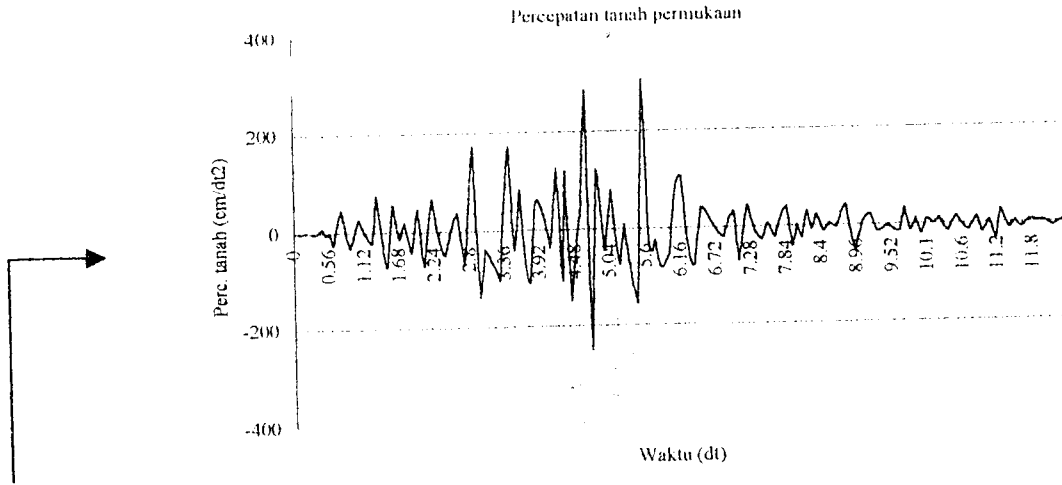
Gambar 5.29 Percepatan tanah akibat gempa Montana 1



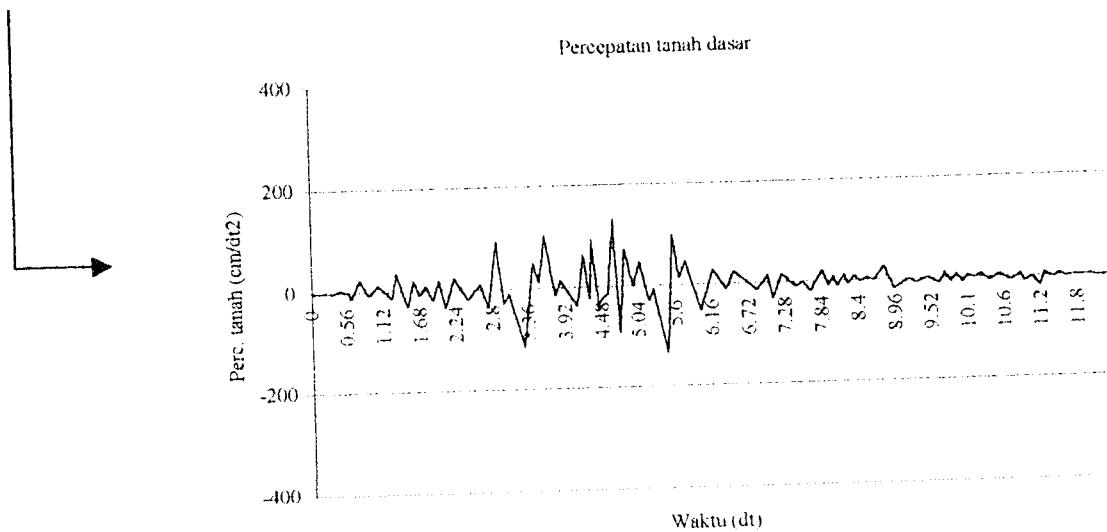
$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}$ $\gamma_{Effektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1048.9028 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.93 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 953.7860 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.83 \text{ gr/cm}^3$



Gambar 5.30 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2

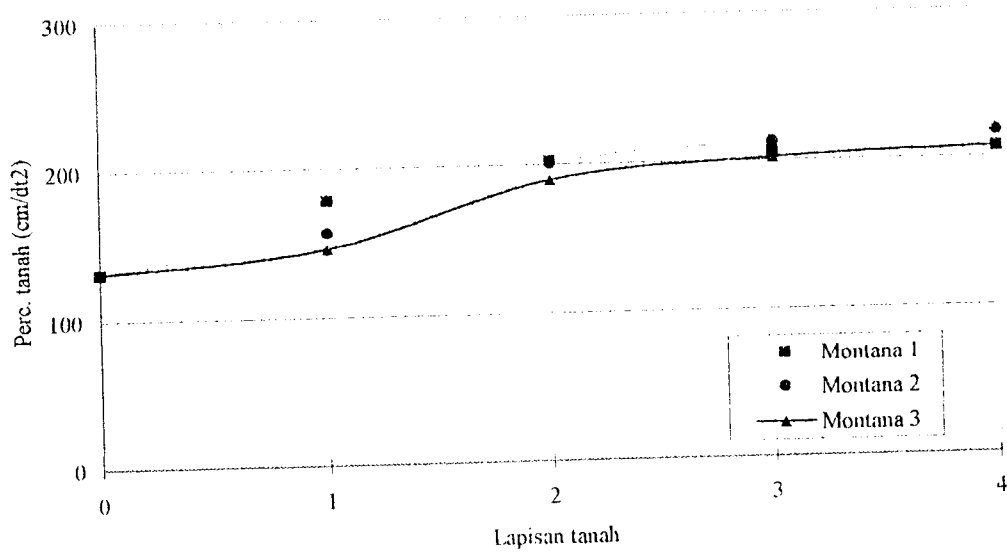


$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}$ $\gamma_{Effektif} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1166.167 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 1.0709 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1048.9028 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.93 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 953.7860 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{Effektif} = 0.83 \text{ gr/cm}^3$

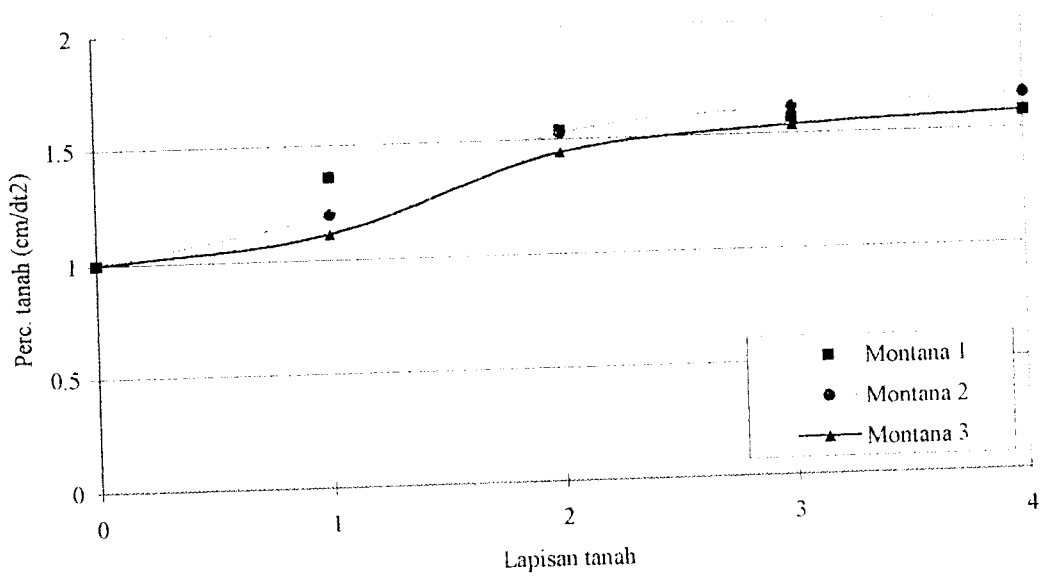


Gambar 5.31 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3





Gambar 5.32 Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung terendam air



Gambar 5.33 Normalisasi percepatan tanah maksimum pasir dan lempung terendam air

#### 5.4.2 Pembahasan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Terendam Air

Percepatan tanah akibat gempa gempa Montana 1 pada “base rock” dan percepatan tanah pada permukaan untuk lapisan tanah pasir dan lempung terendam air disajikan pada gambar 5.29. Sedangkan percepatan tanah akibat gempa Montana 2 dan Montana 3 pada “base rock” dan permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.30 dan gambar 5.31.

Berdasarkan gambar 5.29, 5.30 dan 5.31 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut dapat mencapai 150%.

Terjadinya amplifikasi percepatan tanah pada lapisan tanah pasir disebabkan karena tanah pasir memiliki nilai plastisitas indeks yang relatif kecil, yang akan menyebabkan “degradasi” (kekuatan tanah pasir mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh menurunannya nilai regangan geser maksimum ) yang lebih besar atau disebut juga sebagai tanah yang mempunyai derajat non linier yang tinggi. Kekuatan tanah pasir yang cepat terdegradasi ini akan berakibat pada bertambahnya periode getar tanah endapan pasir.

Peristiwa amplifikasi pada lapisan tanah lempung, disebabkan oleh endapan tanah lempung tersebut, yang mana tanah endapan yang dalam akan menyebabkan waktu getar yang besar. Hal ini terjadi karena pada tanah endapan yang sangat dalam akan memiliki nilai kekakuan struktur tanah yang kecil, sehingga menyebabkan nilai frekuensi alam menjadi kecil dan waktu getar menjadi besar.

Selanjutnya bergesernya waktu getar tanah endapan juga akan berkecenderungan terjadinya amplifikasi percepatan tanah.

Amplifikasi juga terjadi karena tanah lempung memiliki nilai Plastisitas Index (PI) yang relatif tinggi, dimana tanah lempung dengan nilai PI yang tinggi akan berkecenderungan memiliki perilaku elastik dan akan cenderung berespon linier pada saat terjadi gempa, sehingga percepatan tanah akan tetap bertambah sesuai dengan sifat linier tanah tersebut. Hal inilah yang mengakibatkan tanah yang mempunyai PI tinggi berkecenderungan menyebabkan amplifikasi terhadap percepatan tanah.

Redaman material tanah juga merupakan penyebab terjadinya amplifikasi percepatan tanah. Tanah yang mempunyai plastisitas indeks yang tinggi akan bersifat linier, maka luasan hysteresis loop pada sifat dinamik tanah akan semakin kecil. Hal ini berarti bahwa redaman material tanah menjadi semakin kecil. Apabila redaman material tanah kecil, maka respon tanah akibat gempa akan semakin besar. Semakin besar amplifikasi percepatan tanah adalah salah satu akibat dari kecilnya nilai redaman material tanah endapan tersebut.

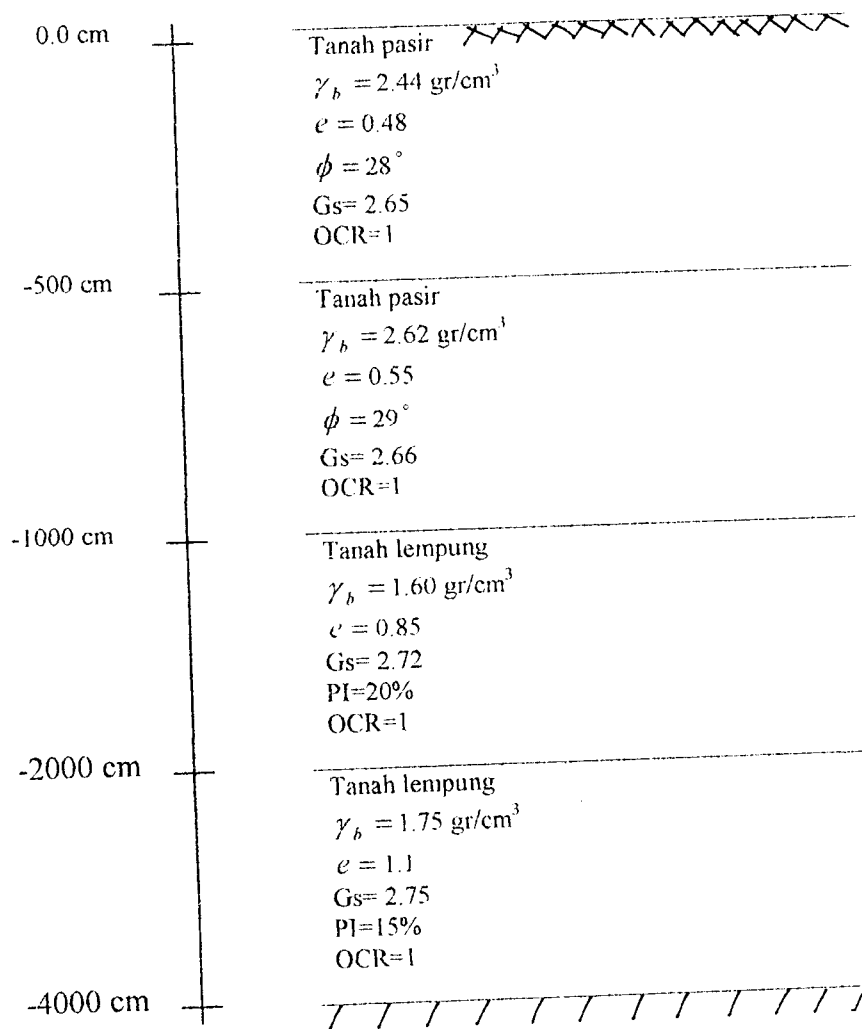
Gambar 5.32 menunjukkan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah lempung terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.33 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock", artinya nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock" atau batuan dasar.

Hasil analisis berdasarkan gambar 5.32 dan 5.33, menunjukkan bahwa:

- a. Percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 dan 2 pada gempa Montana 1 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 2 dan Montana 3.
- b. Untuk kondisi lapis ke-3 dan ke-4 nilai percepatan tanah tertinggi terjadi pada gempa Montana 2 setelah itu diikuti oleh gempa Montana 1 dan Montana 3.

Adanya perbedaan nilai maksimum percepatan tanah pada setiap lapis tersebut disebabkan karena properti tanah yang bervariasi setiap lapisan yang mengakibatkan perbedaan nilai mode shape dan perbedaan data input percepatan tanah gempa Montana 1,2 dan 3.

### 5.4.3 Analisis Perhitungan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Tidak Terendam Air



Gambar 5.34 Profil tanah pasir dan lempung tidak terendam air

Analisis perhitungan juga analog dengan analisis perhitungan pada sub bab 5.2.3 dan 5.3.3 dan hasil perhitungan dapat disajikan pada tabel dan gambar berikut ini:

Tabel 5.21 Hasil perhitungan  $G_{max}$  tanah pasir dan lempung tidak terendam air

Kedalaman (cm)	E	PI (%)	OCR	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$K_0$	K	$\bar{\sigma}_1$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$ (gr/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.48	0	1	28	0.53035	0	0	0	0	0
500	0.48	0	1	28	0.53035	0	895.25	474.8001096	0.6149501	1059.3261
500	0.55	0	1	29	0.51501	0	895.25	461.0646805	0.6057931	922.48336
1000	0.55	0	1	29	0.51501	0	1753.315	902.978632	1.1864241	1290.9706
1000	0.85	25	1	0	0.575	0.21	1753.315	1008.156125	1.2565424	903.95088
2000	0.85	25	1	0	0.575	0.21	3223.315	1853.406125	2.3100424	1225.6493
2000	1.1	30	1	0	0.61	0.24	3223.315	1966.22215	2.3852531	853.98745
4000	1.1	30	1	0	0.61	0.24	5842.315	3563.81215	4.3233131	1149.7214

Tabel 5.22 Hasil perhitungan massa dan kekakuan tanah pasir dan lempung tidak terendam air

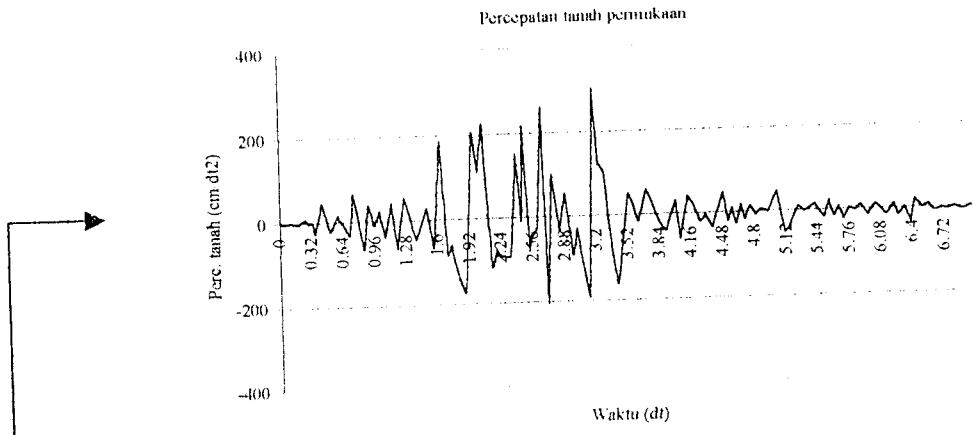
Lapisan	Massa (kgdt <sup>2</sup> /cm)	Kekakuan (kg/cm)
1	20.86	5748.6
2	11.8778	12256
3	8.95	25819
4	4.58	21187

Tabel 5.23 Hasil perhitungan mode shape tanah pasir dan lempung tidak terendam air

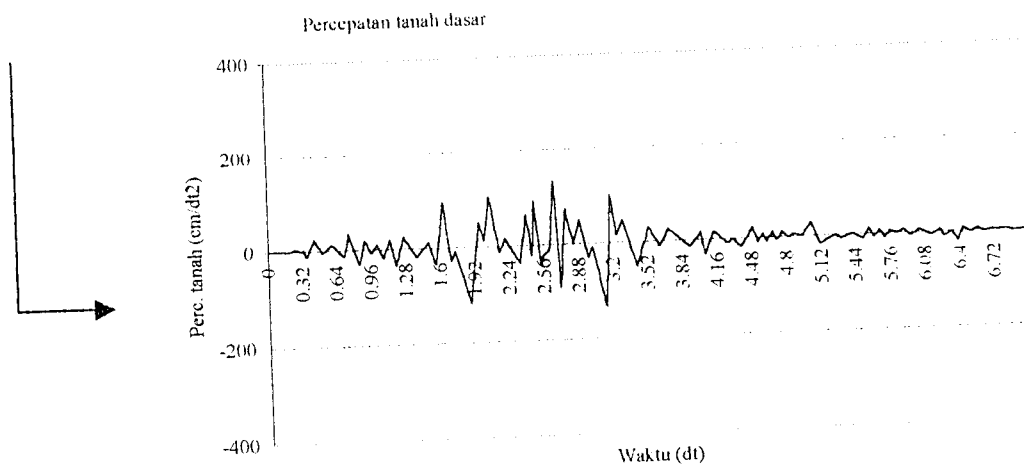
	Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3	Mode ke-4
	1	1	1	1
	1.2905	-0.312	-5.132	-13.7069
	1.3662	-0.784	1.1139	35.5376
	1.3979	-1.014	6.9006	-38.3121
Periode getar (dt)	0.6135	0.1942	0.1008	0.0650
Frekuensi (cps)	1.6299	5.1493	9.9206	15.3846

Tabel 5.24 Hasil perhitungan "dumping ratio" tanah pasir dan lempung tidak terendam air

Lapisan	"Dumping ratio" (%)
1	25.6724
2	27.3779
3	32.3979
4	32.3979

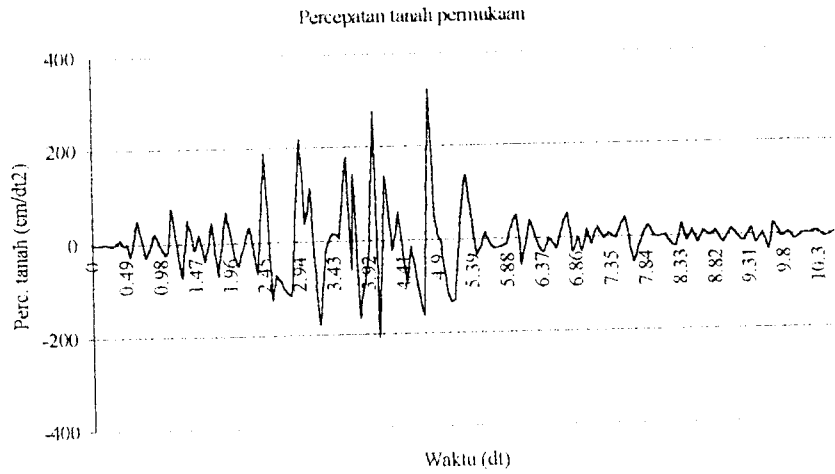


$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1290.9706 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.7161 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1225.6493 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.47 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1149.7214 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.3095 \text{ gr/cm}^3$

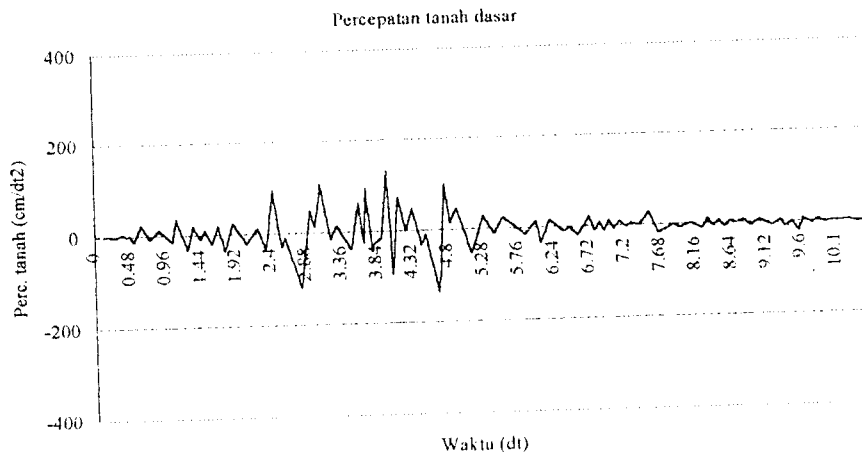


Gambar 5.35 Percepatan tanah akibat gempa Montana I

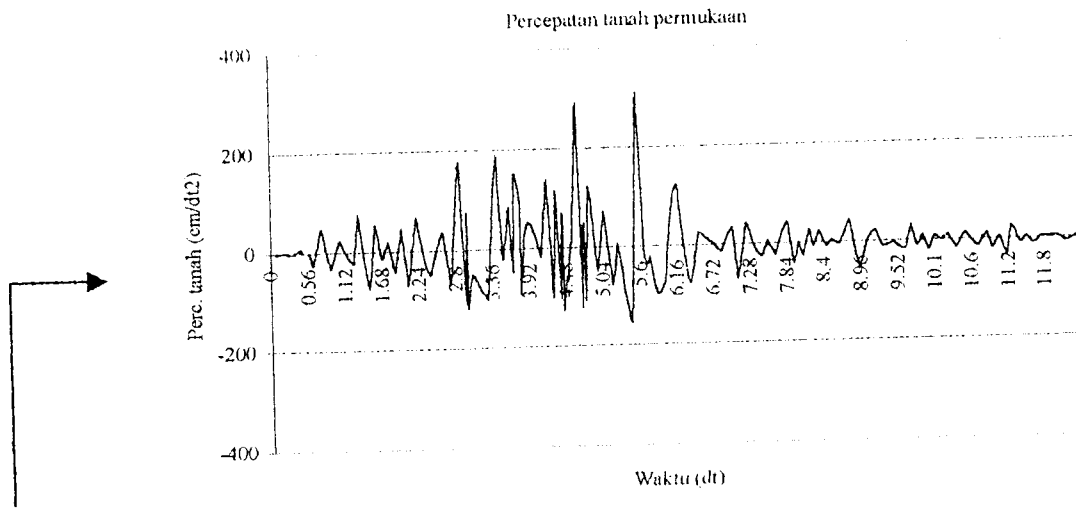




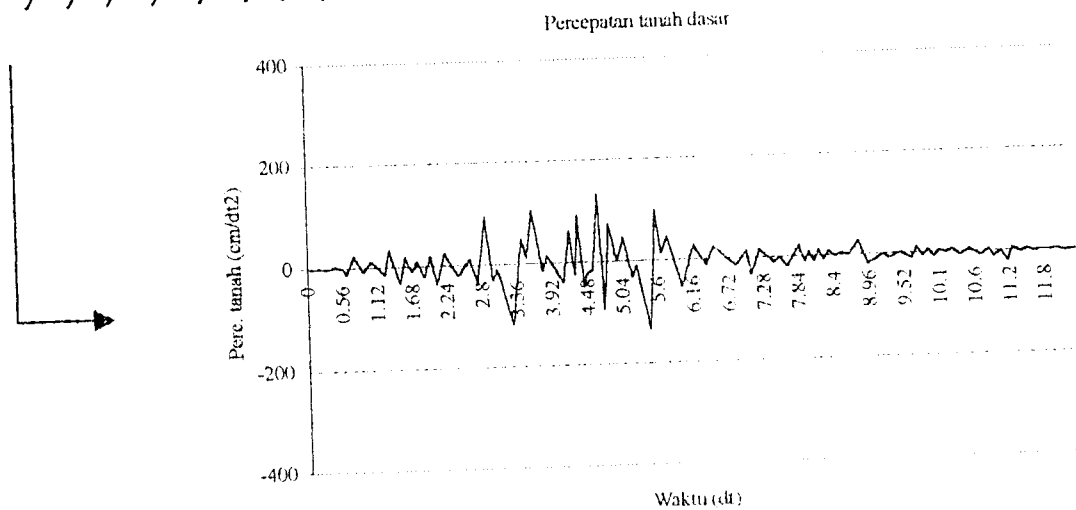
$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1290.9706 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.7161 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1225.6493 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.47 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1149.7214 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.3095 \text{ gr/cm}^3$



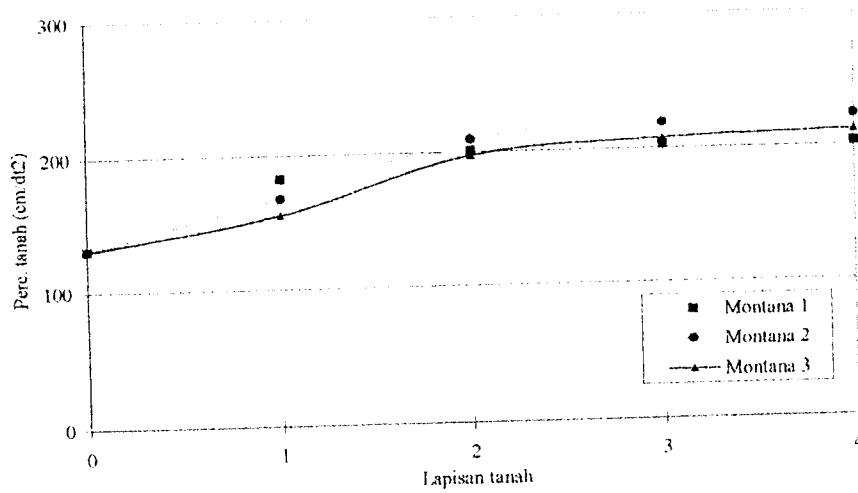
Gambar 5.36 Percepatan tanah akibat gempa Montana 2



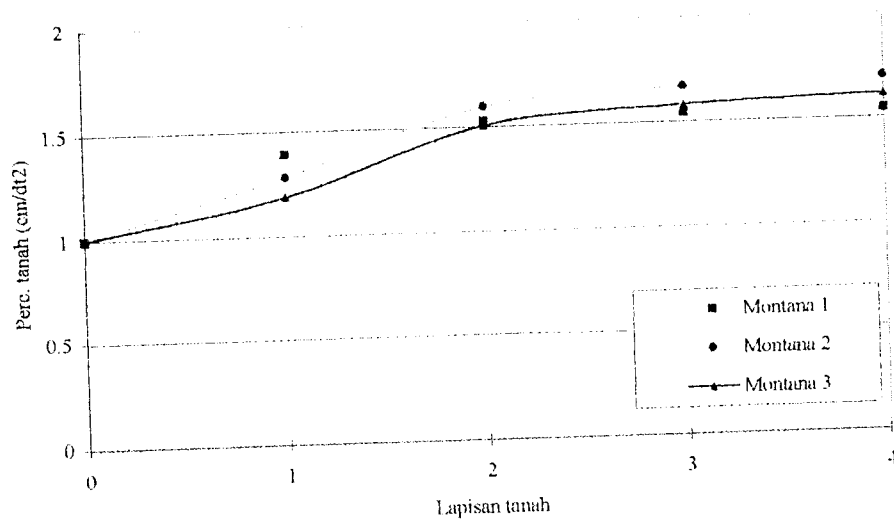
$G_{mak} = 1059.326 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.79054 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1290.9706 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.7161 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1225.6493 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.47 \text{ gr/cm}^3$
$G_{mak} = 1149.72914 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{\text{Efektif}} = 1.3095 \text{ gr/cm}^3$



Gambar 5.37 Percepatan tanah akibat gempa Montana 3



Gambar 5.38 Percepatan tanah maksimum pasir dan lempung tidak terendam air



Gambar 5.39 Normalisasi percepatan tanah maksimum pasir dan lempung tidak terendam air

#### **5.4.4 Pembahasan Lapisan Tanah Pasir dan Lempung Tidak Terendam Air**

Percepatan tanah akibat gempa Montana 1 pada “base rock” dan percepatan tanah pada permukaan untuk lapisan tanah pasir dan lempung tidak terendam air disajikan pada gambar 5.35. Sedangkan percepatan tanah akibat gempa Montana 2 dan Montana 3 pada “base rock” dan permukaan tanah, masing-masing disajikan pada gambar 5.36 dan gambar 5.37.

Berdasarkan gambar 5.35, 5.36 dan 5.37 tersebut, baik percepatan tanah akibat gempa Montana 1, Montana 2 dan Montana 3 terjadi amplifikasi pada permukaan tanah, amplifikasi percepatan tanah pada permukaan tersebut juga dapat mencapai 150%.

Terjadinya amplifikasi percepatan tanah pada lapisan tanah pasir disebabkan karena tanah pasir memiliki nilai plastisitas indeks yang relatif kecil, yang akan menyebabkan “degradasi” (kekuatan tanah pasir mengalami penurunan yang ditunjukkan oleh menurunnya nilai regangan geser maksimum ) yang lebih besar atau disebut juga sebagai tanah yang mempunyai derajat non linier yang tinggi. Kekuatan tanah pasir yang cepat terdegradasi ini akan berakibat pada bertambahnya periode getar tanah endapan pasir.

Peristiwa amplifikasi pada lapisan tanah lempung disebabkan oleh endapan tanah lempung tersebut, yang mana tanah endapan yang dalam akan menyebabkan waktu getar yang besar. Hal ini terjadi karena pada tanah endapan yang sangat dalam akan memiliki nilai kekakuan struktur tanah yang kecil, sehingga menyebabkan nilai frekuensi alam menjadi kecil dan waktu getar menjadi besar.

Selanjutnya bergesernya waktu getar tanah endapan juga akan berkecenderungan terjadinya amplifikasi percepatan tanah.

Amplifikasi juga terjadi karena tanah lempung memiliki nilai Plastisitas Index (PI) yang relatif tinggi, dimana tanah lempung dengan nilai PI yang tinggi akan berkecenderungan memiliki perilaku elastik dan akan cenderung berespon linier pada saat terjadi gempa, sehingga percepatan tanah akan tetap bertambah sesuai dengan sifat linier tanah tersebut. Hal inilah yang mengakibatkan tanah yang mempunyai PI tinggi berkecenderungan menyebabkan amplifikasi terhadap percepatan tanah.

Redaman material tanah juga merupakan penyebab terjadinya amplifikasi percepatan tanah. Tanah yang mempunyai plastisitas indeks yang tinggi akan bersifat linier, maka luasan hysteresis loop pada sifat dinamik tanah akan semakin kecil. Hal ini berarti bahwa redaman material tanah menjadi semakin kecil. Apabila redaman material tanah kecil, maka respon tanah akibat gempa akan semakin besar. Semakin besar amplifikasi percepatan tanah adalah salah satu akibat dari kecilnya nilai redaman material tanah endapan tersebut.

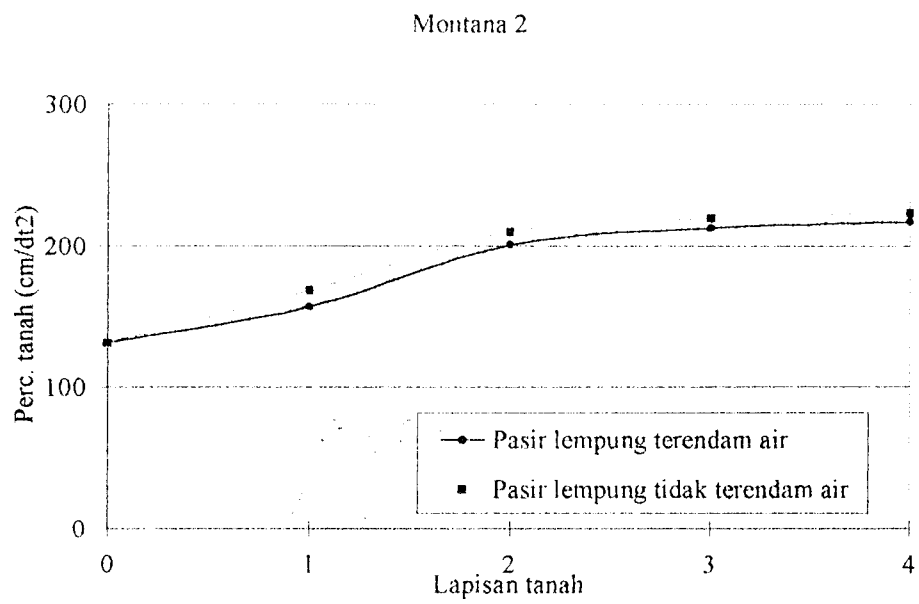
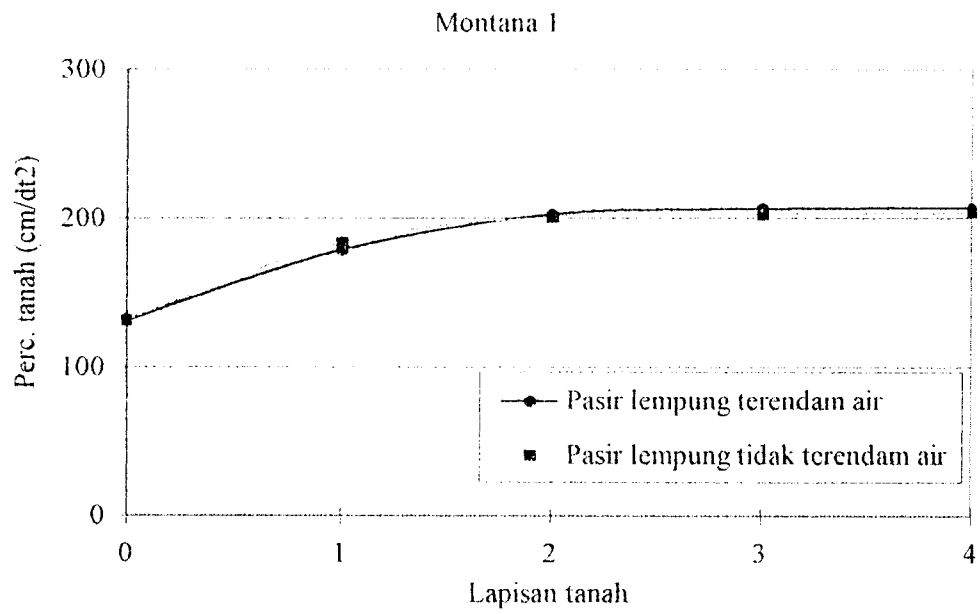
Gambar 5.38 menunjukkan nilai percepatan tanah maksimum untuk lapisan tanah lempung terendam air pada batuan dasar dan pada tiap-tiap lapisan tanah, sedangkan gambar 5.39 merupakan normalisasi nilai percepatan tanah maksimum yang dinormalisasikan terhadap nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock", artinya nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum disamakan dengan nilai percepatan tanah maksimum pada "base rock" atau batuan dasar.

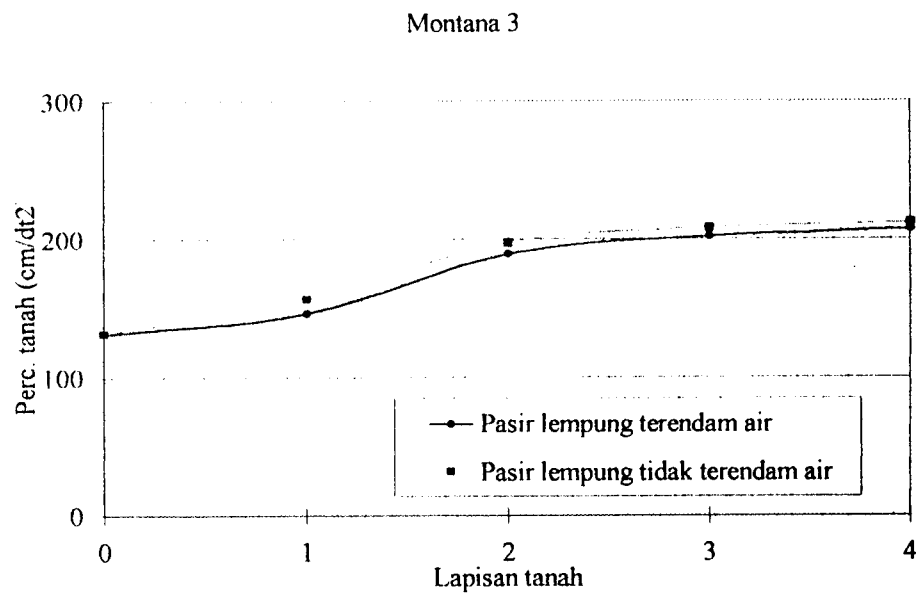
Hasil analisis berdasarkan gambar 5.38 dan 5.39, menunjukkan bahwa:

- a. Percepatan tanah maksimum pada lapis ke-1 pada gempa Montana 1 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 2 dan Montana 3.
- b. Untuk lapis ke-2 nilai percepatan tertinggi terjadi pada gempa Montana 2 setelah itu diikuti oleh gempa Montana 1 dan Montana 3.
- c. Sedangkan untuk lapis ke-3 dan lapis ke-4 gempa Montana 2 nilainya paling tinggi setelah itu diikuti oleh gempa Montana 3 dan Montana 1.

Adanya perbedaan nilai maksimum percepatan tanah pada setiap lapis tersebut disebabkan karena properti tanah yang bervariasi setiap lapisan yang mengakibatkan perbedaan nilai mode shape dan perbedaan data input percepatan tanah gempa Montana 1,2 dan 3.

Apabila dibandingkan antara lapisan pasir dalam kondisi terendam air dan tidak terendam air, maka berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa nilai percepatan tanah maksimum untuk tanah pasir lempung tidak terendam air mengalami kenaikan pada kondisi gempa Montana 2 dan montana 3, sedangkan untuk gempa Montana 1 nilainya hampir sama. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 5.40 di bawah ini yang mengacu pada gambar 5.32 dan 5.38.





Gambar 5.40 Percepatan tanah maksimum tanah pasir dan lempung terendam air dan tidak terendam air

Hal tersebut disebabkan karena ada kesamaan atau kedekatan frekuensi antara frekuensi gempa Montana 2 = 0.09 cps dan Montana 3 = 0.08 cps dengan frekuensi tanah pasir dan lempung lempung tidak terendam air = 1.6299 cps, sedangkan tanah pasir dan lempung terendam air frekuensinya adalah 1.7461 cps yang relatif jauh nilainya dengan frekuensi gempa Montana 2 dan Montana 3. Pada tanah pasir dan lempung tidak terendam air akan menyebabkan terjadinya resonansi, sehingga akan mengakibatkan respon lapisan tanah menjadi lebih besar.



### 5.5 Verifikasi Hasil Penelitian

Untuk membuktikan kebenaran hasil perhitungan menggunakan program komputer dilakukan perbandingan perhitungan dengan cara manual. Hitungan dilakukan pada 3 lapisan tanah dengan mengambil data massa ,kekakuan dan nilai redaman tertentu dan data input gempa dengan periode getar 1dt dan selisih waktu gempa 0.01.

Dari hasil perhitungan dengan program dan dengan cara manual diperoleh nilai yang hasilnya hampir sama atau terdapat selisih hasil hitungan sebesar  $\pm 0.00001$ , Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada lampiran.

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari hasil analisis hitungan respon percepatan tanah akibat gempa pada berbagai macam kondisi dan jenis properti tanah dapat diambil beberapa kesimpulan dan saran yang akan disampaikan untuk kesinambungan penelitian tugas akhir ini.

#### **6.1 Kesimpulan**

Dari analisis hitungan dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada lapisan tanah endapan lempung dan endapan pasir, baik dalam kondisi terendam air maupun dalam kondisi tidak terendam air akan terjadi amplifikasi percepatan tanah maksimum pada permukaan lapisan tanah dapat mencapai 150% jika terjadi gempa bumi.
2. Pada lapisan tanah pasir, baik terendam air maupun tidak terendam air akan terjadi kenaikan (amplifikasi) percepatan tanah maksimum pada lapis ke-2,3 dan ke-4 jika terjadi gempa, sedangkan pada lapis ke-1 akan mengalami penurunan nilai percepatan tanah maksimum (deamplifikasi).
3. Pada campuran lapisan tanah endapan pasir dan lempung, baik dalam kondisi terendam air maupun dalam kondisi tidak terendam air akan terjadi

amplifikasi percepatan maksimum pada permukaan lapisan tanah dapat mencapai 150% jika terjadi gempa bumi.

4. Nilai percepatan tanah maksimum pada tanah lempung dengan kondisi tidak terendam air, cenderung lebih tinggi dari pada tanah lempung dengan kondisi terendam air, hal ini terjadi pada kondisi frekuensi gempa montana 2 dan gempa montana 3. Sedangkan untuk kondisi frekuensi gempa montana 1 nilai percepatan tanah maksimum pada tanah lempung dengan kondisi terendam dan tidak terendam air nilainya hampir sama.
5. Nilai percepatan tanah maksimum pada tanah pasir dengan kondisi tidak terendam air, cenderung lebih rendah dari pada tanah pasir dengan kondisi terendam air, hal ini terjadi pada kondisi frekuensi gempa montana 3 dan gempa montana 2. Sedangkan untuk kondisi frekuensi gempa montana 1, nilai percepatan tanah maksimum pada tanah pasir dengan kondisi terendam dan tidak terendam air nilainya juga hampir sama.
6. Nilai percepatan tanah maksimum pada campuran tanah pasir dan lempung dengan kondisi tidak terendam air, cenderung lebih tinggi dari pada tanah lempung dengan kondisi terendam air, hal ini terjadi pada kondisi frekuensi gempa montana 3 dan gempa montana 2. Sedangkan untuk kondisi frekuensi gempa montana 1 nilai percepatan maksimum tanah pada tanah lempung dengan kondisi terendam dan tidak terendam air nilainya hampir sama.

## 6.2 Saran-saran

Dari hasil analisis dapat disampaikan saran-saran untuk kesinambungan penelitian tugas akhir ini, saran-saran tersebut antara lain:

1. Penyelesaian analisis hitungan untuk memperoleh nilai percepatan maksimum tanah pada setiap lapisan tanah dengan menggunakan program komputer sangat menghemat waktu dalam penyelesaian hitungan. Dalam tugas akhir ini, program hanya bisa menyelesaikan persamaan hitungan dengan jumlah lapisan tanah maksimum adalah 4 lapis dan input data riwayat waktu gempa selama 15 detik. Untuk itu perlu dibuat program dengan kemampuan pemakaian memori dasar komputer yang kecil, sehingga dapat mengeksekusi dan menyelesaikan persamaan hitungan dengan jumlah lapisan tanah yang lebih dari 4 lapis dan input data riwayat waktu gempa yang lebih dari 15 detik..
2. Untuk mendapatkan hasil yang sebenarnya, yang sesuai dengan kondisi tanah yang sebenarnya, perlu diambil data properti tanah yang sesuai dengan data tanah di lapangan.
3. Untuk mendukung hal tersebut di atas, perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh properti tanah endapan terhadap percepatan tanah akibat gempa.
4. Perlu dilakukan penelitian dan pembahasan lebih lanjut tentang pengaruh sifat-sifat fisik tanah endapan seperti nilai plastisitas indeks (PI) pada tanah lempung, redaman material tanah dan kandungan derajat nonlinear tanah terhadap modifikasi gelombang energi gempa yang merambat dari lapisan "base rock" ke permukaan tanah.

5. Perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang interaksi antara struktur tanah-bangunan akibat gempa bumi.
6. Untuk mendapatkan nilai respon tanah yang besar maka perlu dihitung nilai regangan geser, untuk memperoleh nilai modulus geser dan nilai “damping ratio” dari struktur tanah tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

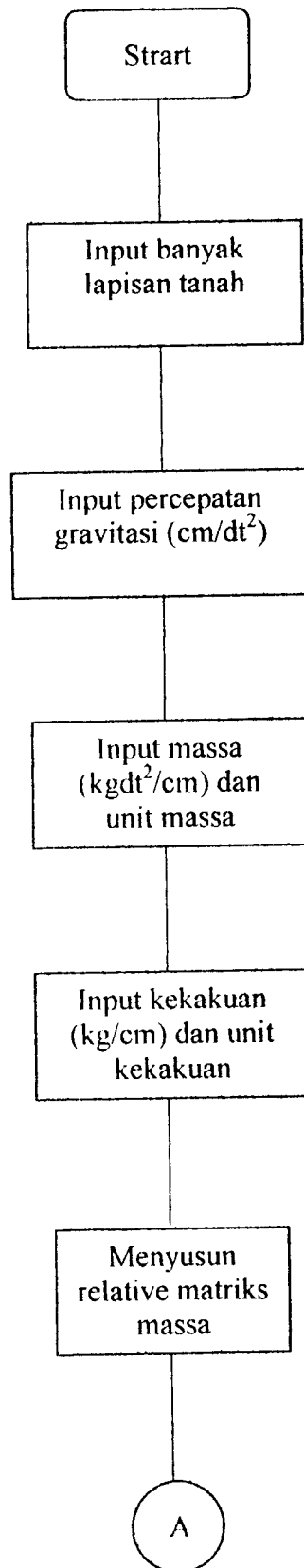
1. Bambang Triatmodjo, 1992, **METODE NUMERIK**, Beta Offset, Yogyakarta.
2. Bobby O. Hardin & Vincent P. Donevich, July 1972, "**SHEAR MODULUS AND DUMPING IN SOILS**", Journal of the Soil Mechanics And Foundation Division, ASCE.
3. Braja M.Das, 1993, "**PRINCIPLES OF SOIL DYNAMICS**", Shouthern Illinois University at Curbondale, PWS-Kent Publishing Company, Boston – United State of Amerika.
4. Clough, Ray W., dan Joseph Penzien, 1988, **DINAMIKA STRUKTUR** (Terjemahan), Jilid satu dan dua, Erlangga, Jakarta.
5. Craig R. F, 1991, **MEKANIKA TANAH**, Erlangga, Jakarta.
6. Hary Cristady Hardiyatmo, 1994, **MEKANIKA TANAH 1 & 2**, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
7. Idriss I.M & Seed H.B, 1986, "**SEISMIC RESPONSE OF HORIZONTAL SOIL LAYERS**", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE.
8. Joseph E. Bowles, 1986, **SIFAT-SIFAT FISIS & GEOTEKNIIS TANAH (MEKANIKA TANAH)** (Terjemahan), Erlangga, Jakarta.
9. Koerner R. M., 1985, "**CONSTRUCTION AND GEOTECHNICAL METHODS IN FOUNDATION ENGINEERING**", McGraw Hill Book Co., Singapore.
10. Kardyono Tjokrodimulyo, 1993, **TEKNIK GEMPA**, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
11. Mario Paz, 1990, **DINAMIKA STRUKTUR TEORI DAN PERHITUNGAN** (Terjemahan), Erlangga, Jakarta.
12. Nakazawa K., 1983, **MEKANIKA TANAH DAN TEKNIK PONDASI**, PT. Pradnya Paramitha, Jakarta.

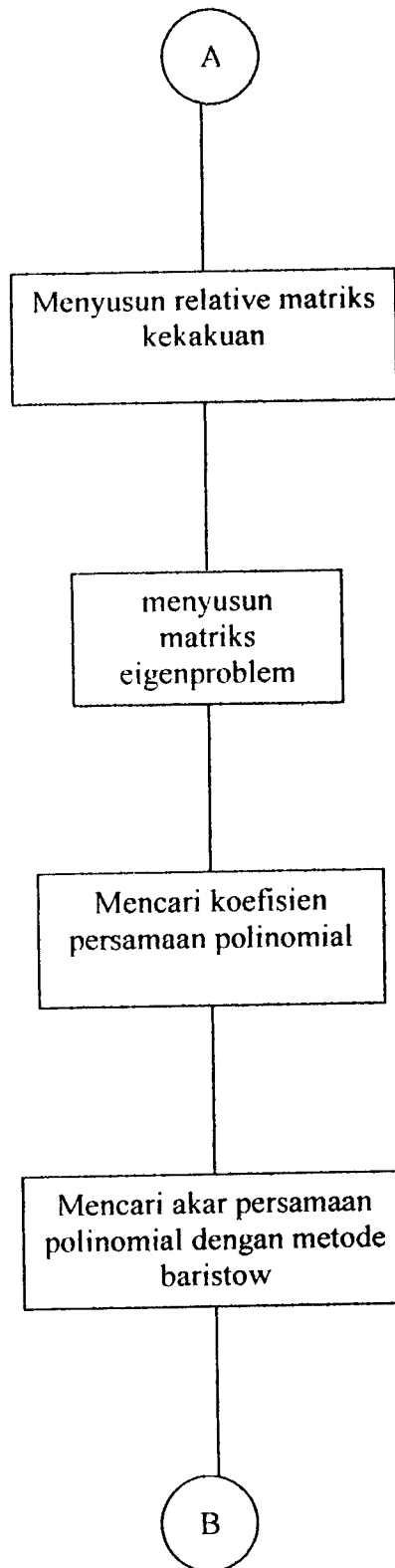
13. Wesley L. D., 1977, **MEKANIKA TANAH**, Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.
14. Widodo, **PENGANTAR TEKNIK GEMPA**, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
15. Widodo, **ANALISA DINAMIKA STRUKTUR**, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

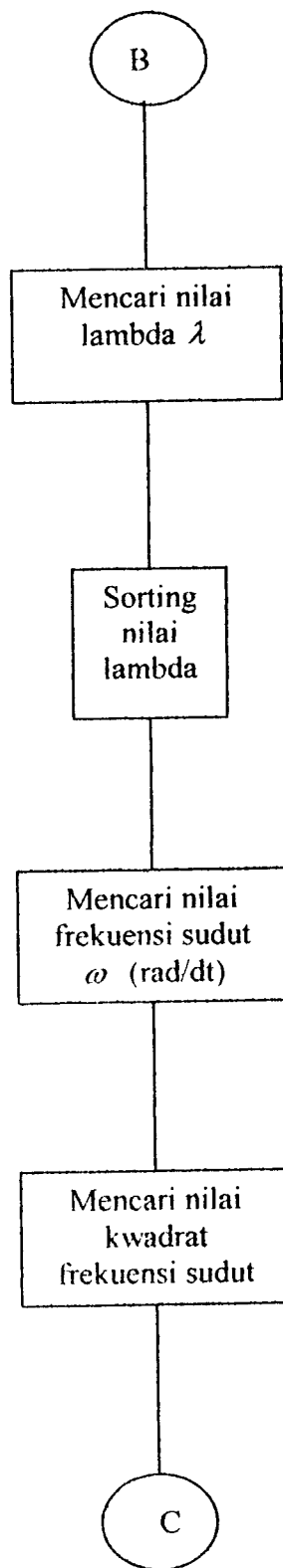
# LAMPIRAN



Lampiran 1 : Diagram alur







C

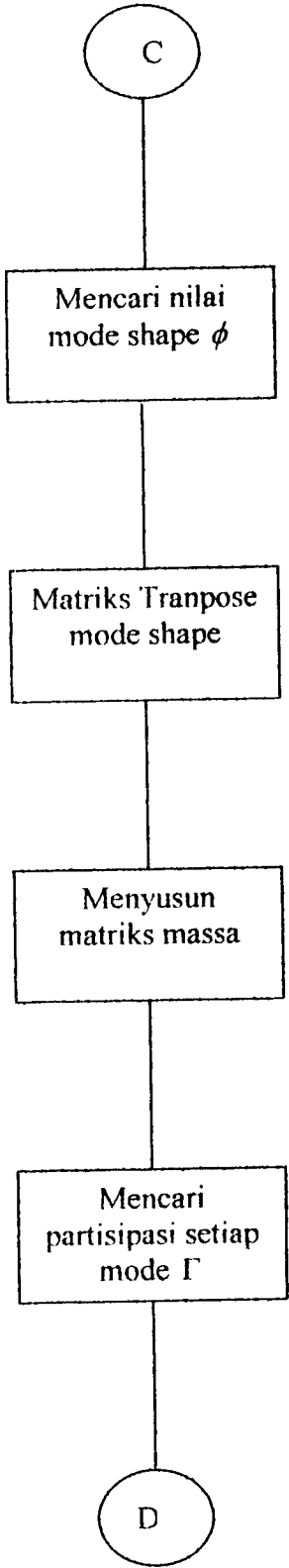
Mencari nilai  
mode shape  $\phi$

Matriks Tranpose  
mode shape

Menyusun  
matriks massa

Mencari  
partisipasi setiap  
mode  $\Gamma$

D



D

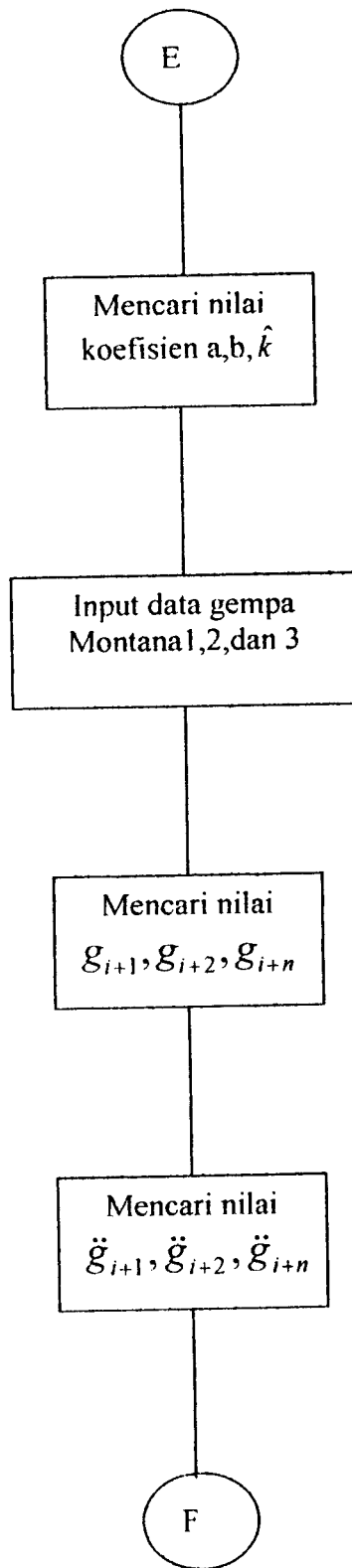
Mencari periode  
getar  $T$  (dt)  
lapisan tanah

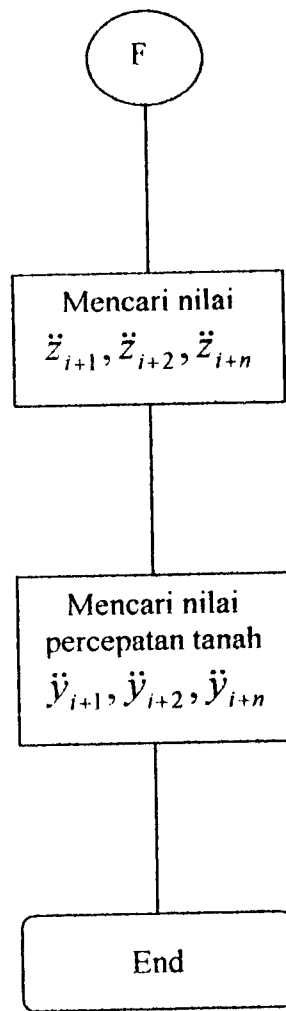
Input selisih  
waktu gempa

Input dumping  
ratio

Mencari  
equivalen  
dumping ratio

E





## Lampiran 2 : Program Komputer

```
Property of : Widodo + Titan DR
              Yulis + Arif
OPEN "I", 1, "MONTANA1.DAT"
OPEN "O", 2, "HASIL.DAT"
PRINT #2,
CLS
DIM A(5), AA#(5), B#(5), C#(5), U#(5), V#(5),
X#(5)
DIM D#(5), D(5), AAA#(5, 5), BB#(5, 5)
DIM P#(5), COLB#(5), K(5), M(5), RK(5)
DIM W(5), RKM#(5, 5), RMM#(5, 5), UT(5, 5), PM(5,
5)
DIM P(5), MM(5), MS(5, 5), U(5, 5), T(5)
DIM C(5), KA(5), PA(5)
DIM V(5)
DIM R(5), Z(5), F(5)
INPUT "NUMBER OF THE STORY" NE =
"; NE
INPUT "Percepatan gravitasi ( cm/dt2 ) G = "; G
FOR I = 1 TO NE
PRINT "Massa tiap lapisan tanah (kg.dt2/cm) M(";
I; ") = "; : INPUT M(I)
NEXT I
INPUT "Unit massa tanah UM = "; UM
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NE
RMM#(I, I) = M(I) / UM
NEXT I
FOR I = 1 TO NE
PRINT "Kekakuan tiap lapisan tanah (kg/cm) K(";
I; ") = "; : INPUT K(I)
NEXT I
INPUT "Unit kekakuan tanah UK = "; UK
FOR I = 1 TO NE
RK(I) = K(I) / UK
NEXT I
FOR I = 1 TO (NE - 1)
IF I = SA THEN RKM#(I, I) = RK(I) + RK(I + 1) +
KA(I): GOTO 650
RKM#(I, I) = RK(I) + RK(I + 1)
650 RKM#(I, I + 1) = -RK(I + 1): RKM#(I + 1, I) = R
RKM#(I, I + 1)
NEXT I
RKM#(NE, NE) = RK(NE)
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NE
FOR J = 1 TO NE
```



```

AAA#(I, J) = RKM#(I, J) / RMM#(I, I)
NEXT J
NEXT I
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NE
FOR J = 1 TO NE
BB#(I, J) = AAA#(I, J)
NEXT J
NEXT I
ME = NE - 1
FOR KE = 1 TO ME
TRACE# = 0
FOR I = 1 TO NE
TRACE# = TRACE# + BB#(I, I)
NEXT I
AK = KE
P#(KE) = TRACE# / AK
FOR I = 1 TO NE
BB#(I, I) = BB#(I, I) - P#(KE)
NEXT I
FOR J = 1 TO NE
FOR I = 1 TO NE
COLB#(I) = BB#(I, J)
NEXT I
FOR I = 1 TO NE
BB#(I, J) = 0
FOR LE = 1 TO NE
BB#(I, J) = BB#(I, J) + AAA#(I, LE) * COLB#(LE)
NEXT LE
NEXT I
NEXT J
NEXT KE
P#(NE) = BB#(1, 1)
R = (-1)
FOR KE = 1 TO NE
P#(KE) = R * (P#(KE))
NEXT KE
FOR I = 1 TO NE
AA#(I) = P#(I)
NEXT I
AA#(0) = 1
N = NE
IF N = 2 THEN K = 1: GOTO 1870
INPUT "Ketepatan mendekati nol E = "; E
K = 1
R = 0
IF N = 2 THEN 1810

```

```

1430 U#(K) = AA#(N - 1) / AA#(N - 2)
      V#(K) = AA#(N) / AA#(N - 2)
1450 B#(0) = AA#(0)
      B#(1) = AA#(1) - U#(K)
      FOR I = 2 TO N
      B#(I) = AA#(I) - B#(I - 1) * U#(K) - B#(I - 2) *
      V#(K)
      NEXT I
      C#(0) = B#(0)
      C#(1) = B#(1) - U#(K)
      FOR I = 2 TO N - 1
      C#(I) = B#(I) - C#(I - 1) * U#(K) - C#(I - 2) *
      V#(K)
      NEXT I
      DU#(K) = (B#(N - 1) * C#(N - 2) - B#(N) * C#(N -
      3)) / (C#(N - 2) ^ 2 - C#(N - 1) * C#(N -
      3))
      DV#(K) = (C#(N - 2) * B#(N) - C#(N - 1) * B#(N -
      1)) / (C#(N - 2) ^ 2 - C#(N - 1) * C#(N - 3))
      U#(K) = U#(K) + DU#(K)
      V#(K) = V#(K) + DV#(K)
      IF ABS(DU#(K)) + ABS(DV#(K)) <= E THEN 1610
      GOTO 1450
1610 PRINT #2,
      PRINT #2,
      X#(K) = (-U#(K) + (U#(K) ^ 2 - 4 * 1 * V#(K)) ^
      .5) / 2
      X#(K + 1) = (-U#(K) - (U#(K) ^ 2 - 4 * 1 * V#(K))
      ^ .5) / 2
      D#(K + R) = X#(K) : D#(K + 1 + R) = X#(K + 1)
      N = N - 2
      FOR S = 0 TO N
      AA#(S) = B#(S)
      NEXT S
      IF N = 2 THEN 1810
      IF N < 2 THEN 1780
      K = K + 1
      R = R + 1
      GOTO 1430
1780 PRINT #2,
      D#(2 * K + 1) = -AA#(1)
      GOTO 1960
1810 X#(K) = (-AA#(1) + (AA#(1) ^ 2 - 4 * 1 * AA#(2)) ^
      .5) / 2
      X#(K + 1) = (-AA#(1) - (AA#(1) ^ 2 - 4 * 1 *
      AA#(2)) ^ .5) / 2
      D#(2 * K + 1) = X#(K) : D#(2 * K + 2) = X#(K + 1)

```

```

GOTO 1930
1870 PRINT #2,
X#(K) = (-AA#(1) + (AA#(1) ^ 2 - 4 * 1 * AA#(2)) ^
.5) / 2
X#(K + 1) = (-AA#(1) - (AA#(1) ^ 2 - 4 * 1 *
AA#(2)) ^ .5) / 2
D#(K) = X#(K): D#(K + 1) = X#(K + 1)
1930 PRINT #2,
1960 PRINT #2,
FOR K = 1 TO NE: D(K) = D#(K): NEXT K
FOR K = 1 TO NE
NEXT K
FOR J = 1 TO NE - 1
FOR I = 1 TO NE - J
IF D(I) < D(I + 1) THEN 2100
T = D(I)
D(I) = D(I + 1)
D(I + 1) = T
2100 NEXT I
NEXT J
FOR J = 1 TO NE
W(J) = (D(J) * UK / UM) ^ .5
WKW(J) = (D(J) * UK / UM)
NEXT J
INPUT "Jumlah ragam dari goyangan struktur MVC =
"; MVC
PRINT #2, "4. Hasil mode shape adalah: "
PRINT #2,
IF NE > 2 THEN 2470
FOR J = 1 TO NE: U(1, J) = 1: NEXT J
2430 FOR J = 1 TO NE
U(2, J) = ((K(1) + K(2) - W(J) ^ 2 * M(1))) / K(2)
NEXT J
GOTO 2570
2470 PRINT #2,
FOR J = 1 TO MVC
U(1, J) = 1
NEXT J
FOR J = 1 TO MVC
FOR I = 3 TO NE
U(2, J) = ((K(1) + K(2) - W(J) ^ 2 * M(1))) / K(2)
U(I, J) = ((-U(I - 2, J)) * K(I - 1) + ((K(I - 1)
+ K(I) - W(J) ^ 2 * M(I - 1)) * U(I - 1, J))) /
K(I)
NEXT I
NEXT J
2570 FOR I = 1 TO NE

```

```

FOR J = 1 TO MVC
PRINT #2, USING "###.####"; U(I, J);
NEXT J
PRINT #2,
NEXT I
FOR I = 1 TO MVC
FOR J = 1 TO NE
UT(I, J) = U(J, I)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO MVC
FOR J = 1 TO NE
P(I) = P(I) + UT(I, J) * M(J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NE
MS(I, I) = M(I)
NEXT I
FOR I = 1 TO MVC
FOR J = 1 TO NE
PM(I, J) = PM(I, J) + UT(I, J) * MS(J, J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO MVC
FOR J = 1 TO NE
MM(I) = MM(I) + PM(I, J) * U(J, I)
PA(I) = P(I) / MM(I)
NEXT J
NEXT I
PRINT #2, "d1) PARTISIPASI SETIAP MODE"
PRINT #2,
PRINT #2,
FOR I = 1 TO MVC
PRINT #2, "PA("; I; ")="; PA(I)
NEXT I
PRINT #2,
FOR I = 1 TO MVC
T(I) = (2 * 3.14159) / W(I)
NEXT I
PRINT #2, "PERIODE GETAR SETIAP MODE"
PRINT #2,
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NE
PRINT #2, "T("; I; ")="; T(I)
NEXT I
PRINT #2,
INPUT "Step integrasi dt = "; DT

```

```

AE = 1
INPUT " BANYAKNYA LAPISAN TANAH N= "; N
P = 1
DIM LU(AE, N), QU(S, P), ZU(AE, P), DE(N, P),
AU(AE, P), DU(AE, P)
FOR I = 1 TO AE
FOR J = 1 TO N
INPUT LU(I, J)
NEXT J
PRINT
NEXT I
INPUT " DAMPING RATIO S="; S
FOR I = 1 TO N
FOR J = 1 TO P
INPUT OU(I, J)
NEXT J
PRINT
NEXT I
FOR I = 1 TO N
FOR J = 1 TO P
DE(I, J) = 1
NEXT J
NEXT I
PRINT
PRINT
PRINT
FOR I = 1 TO AE
FOR J = 1 TO P
AU(I, J) = 0
ZU(I, J) = 0
FOR K = 1 TO N
ZU(I, J) = ZU(I, J) + LU(I, K) * OU(K, J)
AU(I, J) = AU(I, J) + LU(I, K) * DE(K, J)
DU(I, J) = ZU(I, J) / AU(I, J)
NEXT K
NEXT J
NEXT I
PRINT
PRINT
FOR I = 1 TO NE
FOR K = 1 TO AE
FOR J = 1 TO P
R(I) = WKW(I) - (2 / (DT ^ 2))
Z(I) = (1 / DT ^ 2) - (2 * DU(K, J) * W(I) / (2 *
DT))
F(I) = (1 / DT ^ 2) + (2 * DU(K, J) * W(I) / (2 *
DT))

```

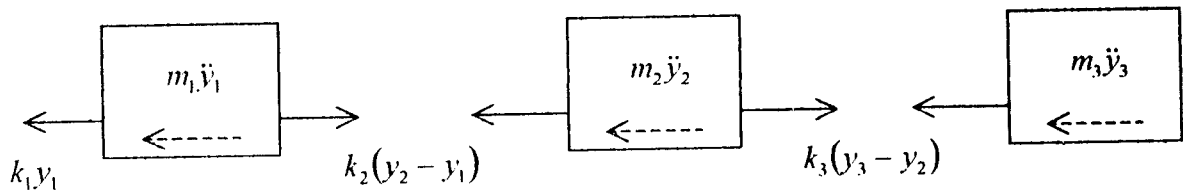
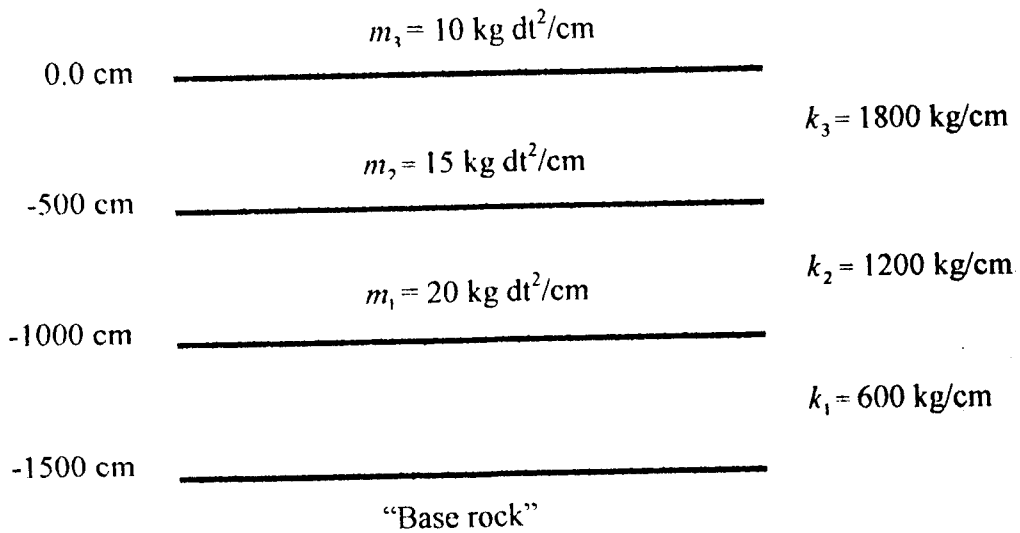
```

NEXT J
NEXT K
NEXT I
PRINT #2,
PRINT #2, "KOEFFISIEN I,R,Z,F = "
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NE
PRINT #2, USING "#####.####"; I; R(I); Z(I);
F(I)
NEXT I
PRINT #2,
PRINT #2,
DIM TT(1505), YY(1505)
I = 1
WHILE NOT EOF(1)
INPUT #1, TT$, YY$
TT(I) = VAL(TT$)
YY(I) = VAL(YY$)
I = I + 1
WEND
NJ = I
DIM GG(NJ, NE), GM(NJ, NE)
DIM ZM(NJ, NE)
DIM YM(NJ, NE)
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE
GG(I + 1, J) = (YY(I) - R(J) * GG(I, J) - Z(J) *
GG(I - 1, J)) / F(J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE
GM(I, J) = (GG(I + 1, J) - 2 * GG(I, J) + GG(I -
1, J)) / (DT ^ 2)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE
ZM(I, J) = GM(I, J) * PA(J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE

```

```
YM(I, J) = 0
FOR K = 1 TO MVC
YM(I, J) = YM(I, J) + U(J, K) * ZM(I, K)
NEXT K
NEXT J
NEXT I
PRINT #2,
PRINT #2,
FOR J = 1 TO NE
PRINT #2, "    YM("; J; ") ";
NEXT J
PRINT #2,
PRINT #2,
FOR I = 1 TO NJ - 1
FOR J = 1 TO NE
PRINT #2, USING "####.##### "; YM(I, J);
NEXT J
PRINT #2,
NEXT I
CLOSE
END
```

Lampiran 3 : Verifikasi Hasil Penelitian



Gambar Properti lapisan tanah dan Free body diagram

Berdasarkan gambar diatas dapat diperoleh persamaan diferensial gerakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \\
 m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) - k_3 (y_3 - y_2) &= 0 \\
 m_3 \ddot{y}_3 + k_3 (y_3 - y_2) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Persamaan (1) dapat ditulis menjadi persamaan::

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 &= 0 \\
 m_2 \ddot{y}_2 - k_2 y_1 + (k_2 + k_3) y_2 - k_3 y_3 &= 0 \\
 m_3 \ddot{y}_3 - k_3 y_2 + k_3 y_3 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$



Dari persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Dipakai: Unit massa  $m = 10 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$

Unit kekakuan  $k = 600 \text{ kg/cm}$

Maka matriks massa dan kekakuan diperoleh sebagai berikut:

a. Matriks massa:

$$[M] = \begin{bmatrix} 2m & 0 & 0 \\ 0 & 1.5m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

b. Matriks kekakuan:

$$[K] = \begin{bmatrix} 3k & -2k & 0 \\ -2k & 5k & -3k \\ 0 & -3k & 3k \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dengan memperhatikan matriks-matriks pada persamaan diatas, dapat diperoleh persamaan eigenproblem sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 3k - 2w^2m & -2k & 0 \\ -2k & 5k - 1.5w^2m & -3k \\ 0 & -3k & 3k - w^2m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Persamaan (5) dibagi dengan k, sehingga menjadi:

$$\begin{bmatrix} 3 - (2w^2m/k) & -2 & 0 \\ -2 & 5 - (1.5w^2m/k) & -3 \\ 0 & -3 & 3 - (w^2m/k) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Jika nilai  $\lambda = w^2m/k$

Maka persamaan (6) menjadi:

$$\begin{bmatrix} 3-2\lambda & -2 & 0 \\ -2 & 5-1.5\lambda & -3 \\ 0 & -3 & 3-\lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Persamaan (7) disederhanakan menjadi:

$$\begin{aligned} (3-2\lambda)\phi_1 - 2\phi_2 &= 0 \\ -2\phi_1 + (5-1.5\lambda)\phi_2 - 3\phi_3 &= 0 \\ -3\phi_2 + (3-\lambda)\phi_3 &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Penyelesaian persamaan simultan homogen tidaklah memberikan nilai-nilai yang pasti/definitif, tetapi hasil-hasil yang diperoleh hanya merupakan perbandingan antara yang satu dengan yang lainnya. Oleh karena itu diambil nilai,

$$\phi_1 = 1 \quad (9)$$

Dengan substitusi nilai persamaan (9) ke dalam baris pertama persamaan (8) diperoleh,

$$\phi_2 = (1.5 - \lambda) \quad (10)$$

Selanjutnya substitusi persamaan (9) dan (10) kedalam baris ke-2 pada persamaan (8), sehingga diperoleh,

$$\phi_3 = 0.5\lambda^2 - 2.4167\lambda + 1.8333 \quad (11)$$

Selanjutnya substitusi persamaan (10) dan (11) kedalam baris ke-3 persamaan (8), akan diperoleh persamaan yang telah disusun sebelumnya,

$$-0.5\lambda^3 + 3.9167\lambda^2 - 6.0833\lambda + 1 = 0 \quad (12)$$

Untuk mencari akar-akar persamaan polinomial di atas, maka cara yang paling sederhana adalah dengan cara coba-coba, sehingga didapat,

$$\lambda_1 = 0.1862, \text{ maka } \omega_1 = \sqrt{0.1862 * \frac{600}{10}} = 3.3422$$

$$\lambda_2 = 1.8546, \text{ maka } \omega_2 = \sqrt{1.8546 * \frac{600}{10}} = 10.5488$$

$$\lambda_3 = 5.7923, \text{ maka } \omega_3 = \sqrt{5.7923 * \frac{600}{10}} = 18.6424$$

Tabel nilai-nilai ordinat  $\phi_{ij}$

	Fungsi $\phi_i$	Nilai $\phi_{ij}$		
		Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3
		$\lambda_1 = 0.1862$	$\lambda_2 = 1.8546$	$\lambda_3 = 5.7923$
1	$\phi_1 = 1$	$\phi_{11} = 1$	$\phi_{12} = 1$	$\phi_{13} = 1$
2	$\phi_2 = (1.5 - \lambda)$	$\phi_{21} = 1.3138$	$\phi_{22} = -0.3546$	$\phi_{23} = -4.2923$
3	$\phi_3 = 0.5\lambda^2 - 2.4167\lambda + 1.8333$	$\phi_{31} = 1.4008$	$\phi_{32} = -0.9289$	$\phi_{33} = 4.6108$

Menghitung Partisipasi setiap mode.

Partisipasi mode ke-1:

$$\hat{p}_1 = \{\phi\}_1^T [M] \{1\} = \{1 \quad 1.3138 \quad 1.4008\} \begin{Bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = 53.71506 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$M_1 = \{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_1 = \begin{Bmatrix} 1 & 1.3138 & 1.4008 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.3138 \\ 1.4008 \end{Bmatrix}$$

$$= 65.51355 \text{ kgdt/m}$$

$$\Gamma_1 = \frac{\hat{p}_1}{M_1} = \frac{53.71506}{65.51355} = 0.81990$$

Partisipasi mode ke-2:

$$\hat{p}_2 = \{\phi\}_2^T [M] \{1\} = \begin{Bmatrix} 1 & -0.3546 & -0.9289 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = 5.39190 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$M_2 = \{\phi\}_2^T [M] \{\phi\}_2 = \begin{Bmatrix} 1 & -0.3546 & -0.9289 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.3546 \\ -0.9289 \end{Bmatrix}$$

$$= 30.51431 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$\Gamma_2 = \frac{\hat{p}_2}{M_2} = \frac{5.39190}{30.51431} = 0.17670$$

Partisipasi mode ke-3:

$$\hat{p}_3 = \{\phi\}_3^T [M] \{1\} = \begin{Bmatrix} 1 & -4.2923 & 4.6108 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = 1.72255 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$M_3 = \{\phi\}_3^T [M] \{\phi\}_3 = \begin{Bmatrix} 1 & -4.2923 & 4.6108 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ -4.2923 \\ 4.6108 \end{Bmatrix}$$

$$= 508.9524 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$\Gamma_3 = \frac{\hat{p}_3}{M_3} = \frac{1.72255}{508.9524} = 0.00338$$

Diambil nilai damping ratio=0.3%

Nilai Percepatan tanah dengan cara manual adalah:

i	Ti	$\ddot{y}_t$	$\ddot{y}_1$	$\ddot{y}_2$	$\ddot{y}_3$
1	0	0	0	0	0
2	0.01	-0.1633	-0.161055	-0.16199	-0.16212
3	0.02	-0.3267	-0.31734	-0.32147	-0.322
4	0.03	-0.49	-0.468403	-0.47818	-0.4794
5	0.04	-0.6533	-0.614135	-0.6322	-0.63442
6	0.05	-0.8167	-0.754465	-0.78354	-0.78713
7	0.06	-0.98	-0.889061	-0.93192	-0.93729
8	0.07	-0.784	-0.663571	-0.72092	-0.72823
9	0.08	-0.588	-0.44301	-0.51263	-0.5218
10	0.09	-0.392	-0.227908	-0.30697	-0.31794
11	0.1	-0.196	-0.018733	-0.10395	-0.11663
12	0.11	0	0.184107	0.09644	0.082166
13	0.12	-0.28	-0.089194	-0.17806	-0.19411
14	0.13	-0.56	-0.355275	-0.44769	-0.46601
15	0.14	-0.84	-0.613632	-0.71247	-0.73352
16	0.15	-1.12	-0.863829	-0.9724	-0.99659
17	0.16	-1.4	-1.105492	-1.22744	-1.25517
18	0.17	-1.68	-1.338313	-1.47751	-1.5092
19	0.18	-1.96	-1.562043	-1.72252	-1.75862
20	0.19	-1.12	-0.671892	-0.8513	-0.89142
21	0.2	-0.28	0.19427	0.00726	-0.03557
22	0.21	0.56	1.034793	0.85312	0.808947
23	0.22	1.4	1.848258	1.68614	1.642099
24	0.23	2.24	2.633476	2.50603	2.463822
25	0.24	3.08	3.389482	3.31241	3.273996
26	0.25	3.92	4.115529	4.10481	4.072448
27	0.26	2.695	2.774464	2.83417	2.808814
28	0.27	1.47	1.46413	1.58152	1.562694
29	0.28	0.245	0.187553	0.34654	0.333882
30	0.29	-0.98	-1.052592	-0.87087	-0.87779
31	0.3	-0.3267	-0.401502	-0.20732	-0.20767
32	0.31	0.3267	0.234409	0.44413	0.452423
33	0.32	0.98	0.853673	1.0834	1.102135
34	0.33	-3.5933	-3.699494	-3.47413	-3.44759
35	0.34	-8.1667	-8.115586	-7.95979	-7.93277
36	0.35	-12.74	-12.38719	-12.3725	-12.3531
37	0.36	-7.56	-6.889158	-7.03542	-7.02505
38	0.37	-2.38	-1.526636	-1.77866	-1.77172
39	0.38	2.8	3.689098	3.3985	3.407175
40	0.39	7.98	8.748169	8.49598	8.511687
41	0.4	13.16	13.6421	13.5129	13.54167
42	0.41	18.34	18.36381	18.4478	18.49674

43	0.42	23.52	22.90755	23.2984	23.37629
44	0.43	19.7225	18.4148	19.1561	19.26656
45	0.44	15.925	14.00414	15.0674	15.20858
46	0.45	12.1275	9.687419	11.0303	11.20147
47	0.46	8.33	5.475316	7.04312	7.24445
48	0.47	4.5325	1.377321	3.10529	3.336831
49	0.48	0.735	-2.598276	-0.78317	-0.52196
50	0.49	-3.0625	-6.444386	-4.62148	-4.33236
51	0.5	-6.86	-10.1551	-8.40818	-8.09462
52	0.51	-4.41	-7.564053	-5.94362	-5.60628
53	0.52	-1.96	-5.015487	-3.52305	-3.15969
54	0.53	0.49	-2.516452	-1.14448	-0.75482
55	0.54	2.94	-0.073416	1.1937	1.608388
56	0.55	5.39	2.307766	3.49273	3.929994
57	0.56	7.84	4.621864	5.7534	6.210101
58	0.57	10.29	6.864293	7.9761	8.448839
59	0.58	12.74	9.031107	10.1608	10.64636
60	0.59	10.535	6.527988	7.68912	8.181305
61	0.6	8.33	4.082054	5.25292	5.742376
62	0.61	6.125	1.698398	2.85182	3.329976
63	0.62	3.92	-0.618486	0.48576	0.944671
64	0.63	1.715	-2.864712	-1.84504	-1.41283
65	0.64	-0.49	-5.03699	-4.14007	-3.74169
66	0.65	-2.695	-7.132623	-6.39855	-6.04095
67	0.66	-4.9	-9.149485	-8.61944	-8.30952
68	0.67	-7.105	-11.086	-10.8015	-10.5462
69	0.68	-9.31	-12.94113	-12.9431	-12.7497
70	0.69	-11.515	-14.71431	-15.0426	-14.9186
71	0.7	-13.72	-16.40546	-17.0982	-17.0513
72	0.71	-1.715	-4.000224	-5.01148	-5.03842
73	0.72	10.29	8.062321	6.89497	6.80926
74	0.73	22.2949	19.75912	18.6205	18.49256
75	0.74	34.3	31.07079	30.1632	30.01202
76	0.75	27.734	23.66489	23.0964	22.92965
77	0.76	21.168	16.39771	16.1356	15.94932
78	0.77	14.602	9.28767	9.27747	9.070502
79	0.78	8.036	2.351456	2.51981	2.292726
80	0.79	1.47	-4.396079	-4.13855	-4.38436
81	0.8	-5.096	-10.94192	-10.6976	-10.961
82	0.81	-11.662	-17.27489	-17.1564	-17.4374
83	0.82	-18.228	-23.38563	-23.5127	-23.8134
84	0.83	-24.794	-29.26656	-29.7636	-30.0888
85	0.84	-31.36	-34.91181	-35.9049	-36.2629
86	0.85	-21.168	-23.7895	-25.308	-25.6976
87	0.86	-10.976	-12.92426	-14.8609	-15.2703
88	0.87	-0.784	-2.340691	-4.56073	-4.98044
89	0.88	9.408	7.939498	5.59348	5.172213
90	0.89	19.6	17.89751	15.6011	15.18755

91	0.9	14.8633	12.79394	10.6504	10.24385
92	0.91	10.1267	7.784437	5.78687	5.376613
93	0.92	5.39	2.881487	1.00779	0.585299
94	0.93	0.6533	-1.90323	-3.68871	-4.13016
95	0.94	-4.0833	-6.559216	-8.30391	-8.76969
96	0.95	-8.82	-11.07747	-12.8387	-13.3333
97	0.96	-5.096	-7.105503	-8.90003	-9.42098
98	0.97	-1.372	-3.233191	-5.01624	-5.5539
99	0.98	2.352	0.53202	-1.18769	-1.73216
100	0.99	6.076	4.183666	2.58485	2.04391
101	1	9.8	7.716258	6.30015	5.773741

**Hasil Analisis dengan menggunakan program komputer:**

**a) HASIL RELATIVE-MASS MATRIK :**

```

2.000000  0.000000  0.000000
0.000000  1.500000  0.000000
0.000000  0.000000  1.000000

```

**b) HASIL RELATIVE-KEKAKUAN MATRIK :**

```

3.000000 -2.000000  0.000000
-2.000000  5.000000 -3.000000
0.000000 -3.000000  3.000000

```

**c) HASIL INITIAL EIGENPROBLEM MATRIK:**

```

1.5000 -1.0000  0.0000
-1.3333  3.3333 -2.0000
0.0000 -3.0000  3.0000

```

**d) HASIL LAMBDA:**

```

1.000000  0.186168
2.000000  1.854630
3.000000  5.792332

```

**e) HASIL FREKUENSI ALAM( rad/sec ) :**

1.0000	3.3422
2.0000	10.5488
3.0000	18.6424

**f) HASIL MODE SHAPE:**

1.0000	1.0000	1.000
1.3138	-0.3546	-4.2923
1.4008	-0.9289	4.6108

**g) P = {a}T \* {M} (kg.dt2/cm)**

P( 1 )	=	53.71506
P( 2 )	=	5.391908
P( 3 )	=	1.722559

**h) MM = {a}T \* [M] \* {a} (kg.dt2/cm)**

MM( 1 )	=	65.51355
MM( 2 )	=	30.51431
MM( 3 )	=	508.9524

**i) PARTISIPASI SETIAP MODE**

PA( 1 )	=	.8199077
PA( 2 )	=	.1767009
PA( 3 )	=	3.384519E-03

**j) PERCEPATAN TANAH TIAP LAPIS:**

No.	$\ddot{y}_1$	$\ddot{y}_2$	$\ddot{y}_3$
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	-0.161055	-0.161998	-0.162120
3	-0.317340	-0.321473	-0.321986
4	-0.468403	-0.478193	-0.479387
5	-0.614135	-0.632211	-0.634404
6	-0.754465	-0.783556	-0.787107
7	-0.889061	-0.931944	-0.937259
8	-0.663571	-0.720939	-0.728208
9	-0.443010	-0.512637	-0.521781



10	-0.227909	-0.306982	-0.317932
11	-0.018733	-0.103951	-0.116627
12	0.184106	0.096439	0.082164
13	-0.089194	-0.178067	-0.194103
14	-0.355274	-0.447701	-0.466000
15	-0.613634	-0.712491	-0.733502
16	-0.863830	-0.972423	-0.996560
17	-1.105494	-1.227465	-1.255134
18	-1.338314	-1.477543	-1.509160
19	-1.562042	-1.722560	-1.758572
20	-0.671892	-0.851323	-0.891389
21	0.194271	0.007258	-0.035562
22	1.034797	0.853144	0.808930
23	1.848258	1.686170	1.642052
24	2.633474	2.506074	2.463750
25	3.389481	3.312476	3.273901
26	4.115527	4.104893	4.072329
27	2.774466	2.834231	2.808735
28	1.464129	1.581551	1.562647
29	0.187554	0.346552	0.333872
30	-1.052594	-0.870884	-0.877770
31	-0.401504	-0.207321	-0.207668
32	0.234411	0.444142	0.452411
33	0.853676	1.083433	1.102104
34	-3.699494	-3.474204	-3.447495
35	-8.115589	-7.959961	-7.932549
36	-12.387193	-12.372719	-12.352699
37	-6.889159	-7.035567	-7.024848
38	-1.526643	-1.778708	-1.771677
39	3.689105	3.398575	3.407089
40	8.748174	8.496157	8.511453
41	13.642104	13.513223	13.541284
42	18.363808	18.448215	18.496208
43	22.907551	23.298910	23.375624
44	18.414799	19.156511	19.266003
45	14.004142	15.067773	15.208134
46	9.687420	11.030514	11.201136
47	5.475315	7.043283	7.244226
48	1.377314	3.105375	3.336719
49	-2.598283	-0.783172	-0.521976
50	-6.444398	-4.621562	-4.332262
51	-10.155111	-8.408343	-8.094419
52	-7.564039	-5.943702	-5.606121
53	-5.015512	-3.523128	-3.159648
54	-2.516459	-1.144492	-0.754814
55	-0.073399	1.193766	1.608353
56	2.307742	3.492791	3.929842
57	4.621886	5.753570	6.209945
58	6.864294	7.976290	8.448598
59	9.031124	10.161005	10.646060
60	6.528003	7.689323	8.181086

61	4.082029	5.253017	5.742172
62	1.698399	2.851898	3.329875
63	-0.618460	0.485815	0.944663
64	-2.864676	-1.845006	-1.412741
65	-5.037058	-4.140216	-3.741673
66	-7.132578	-6.398612	-6.040719
67	-9.149465	-8.619588	-8.309260
68	-11.086046	-10.801725	-10.545962
69	-12.941099	-12.943302	-12.749285
70	-14.714329	-15.042947	-14.918147
71	-16.405451	-17.098572	-17.050755
72	-4.000247	-5.011630	-5.038301
73	8.062291	6.895053	6.809034
74	19.759077	18.620834	18.491987
75	31.070765	30.163811	30.011141
76	23.664886	23.096853	22.928995
77	16.397694	16.135887	15.948855
78	9.287627	9.277602	9.070181
79	2.351445	2.519851	2.292642
80	-4.395954	-4.138465	-4.384067
81	-10.941917	-10.697861	-10.960714
82	-17.274818	-17.156683	-17.436800
83	-23.385632	-23.513247	-23.812721
84	-29.266651	-29.764311	-30.088032
85	-34.911686	-35.905518	-36.261715
86	-23.789394	-25.308462	-25.696705
87	-12.924356	-14.861358	-15.269979
88	-2.340710	-4.560882	-4.980306
89	7.939500	5.593562	5.172087
90	17.897566	15.601443	15.187219
91	12.793916	10.650547	10.243529
92	7.784389	5.786897	5.376405
93	2.881537	1.007848	0.585364
94	-1.903267	-3.688861	-4.130079
95	-6.559182	-8.304062	-8.769376
96	-11.077470	-12.839012	-13.332949
97	-7.105402	-8.900114	-9.420554
98	-3.233307	-5.016524	-5.553886
99	0.532052	-1.187696	-1.732055
100	4.183553	2.584727	2.043705
101	7.716163	6.300128	5.773451