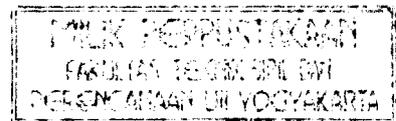
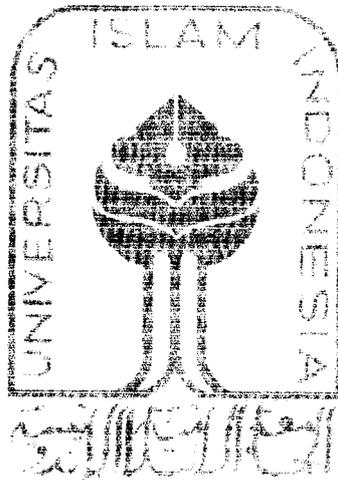


TUGAS AKHIR

PERENCANAAN FONDASI UNTUK MIJSTN  
RECIPROCATING BERBENTUK PENSI TINGGI



Disusun oleh :

HERY PRANOTO

02 319 319

SUWITO AGUS SILLAWAN

03 319 236

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

1999

**Tugas Akhir**

**PERENCANAAN PONDASI UNTUK MESIN  
*RECIPROCATING* BERFREKUENSI TINGGI**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Guna Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Program S-1  
Pada Jurusan Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan  
Universitas Islam Indonesia  
Yogyakarta

**Disusun oleh :**

**HERY PRANOTO                      NO.MHS : 92 310 319**  
**SUWITO AGUS SETIAWAN      NO.MHS : 93 310 276**

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

**1999**

# LEMBAR PENGESAHAN

## Tugas Akhir

### PERENCANAAN PONDASI UNTUK MESIN *RECIPROCATING* BERFREKUENSI TINGGI

Disusun oleh :

Hery Pranoto                      92 310 319

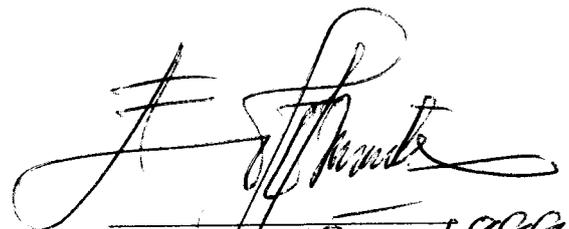
Suwito Agus Setiawan        93 310 276

Telah disetujui di Yogyakarta  
pada tanggal : November 1999

oleh :

DR. Ir. Edy Purwanto, CES. DEA.  
Dosen Pembimbing I

Ir. A. Marzuko, MT  
Dosen Pembimbing II



Tanggal: 19-11-1999



Tanggal: 19-11-1999

*Untuk : Perpustakaan  
Jurusan Teknik Sipil  
Universitas Islam Indonesia*

## MOTTO

*Diikuti juga cinta, setelah kita menyesuaikan hal-hal itu,  
saya bisa dapat dibagi.*

*Tapi jika harus membagi waktu ke dalam kegiatan  
mendidik-mendidik, maka sebaiknya kita mulai menaruh perhatian  
pada diri sendiri, dan setelah mana bisa  
saya menaruh perhatian pada orang lain,  
dan setelah mana bisa dapat dengan keadilan.*

*(Makalah Bahasa)*

## KATA PENGANTAR

Segala puji hanya bagi Allah, Tuhan Satu Sekalian Alam yang telah melimpahkan berbagai kenikmatan yang tidak mampu manusia menghitungnya. Salah satu kenikmatan tersebut adalah bahwa dengan ridho-Nya penulis telah dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Maksud dan tujuan penyusunan tugas akhir ini, selain memenuhi salah satu syarat untuk lulus sajian program S1 di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, juga untuk memberikan tambahan pengetahuan dan pemahaman tentang pondasi (khususnya pondasi untuk mesin).

Pada kesempatan ini, penulis banyak mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Widodo, Msc, PhD, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Ir. Udayudin BMA, MS, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak DR. Ir. Eddy Purwanto, CERS, IMEA, selaku Dosen Pembimbing I dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. A. Maruko MT, selaku Dosen Pembimbing II dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Ibnu Saclanadji MS, selaku Dosen Penguji dalam tugas akhir ini.

6. Teman-teman angkatan 1977 dan 1993 yang banyak membantu hambatan penyusunan karya tulis ini
7. Para sahabat di kost Rostiani, Gununggraya yang selalu memberikan dorongan moral kepada penulis,
8. Semua pihak yang tidak bisa disebut satu per satu, yang telah membantu baik moral maupun materiil kepada penulis.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda atas keikhlasannya membantu penulis. Amien.

Akhirnya penulis berharap semoga karya tulis ini bermanfaat bagi para pembaca

Yogyakarta – November 1999

P e n a l i s :

## DAFTAR ISI

KATA AWAL HUBUN	1
DALAMAN PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iii
LEMBAR MOTIVASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GRAFIK	viii
DAFTAR NOTASI	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	5
1.3 Manfaat Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	8
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Metodologi Penelitian	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	7
2.1 Ponds Mesin	7
2.2 Belon Dimensi	8
a. Mesin Dauri (Serakan Dauri)	9
b. Mesin <i>Becceranza</i> (Serakan Perodda)	10
c. <i>Chimmi Rendom</i>	11
d. Belon Nipda ( <i>Becceranza</i> )	12

2.3 Metode Analisis Pondasi Berbeban Dinamis .....	12
a. Metode Yang Menganggap Tanah Sebagai <i>Semi-infinite Elastic Solid</i> .....	13
b. Metode Empiris.....	20
c. Tanah Yang Dipertimbangkan Sebagai Pegas .....	22
<b>BAB III LANDASAN TEORI.....</b>	<b>27</b>
3.1 Resonansi dan Efeknya .....	27
3.2 Teori Sistem Kebebasan Berderajat Tunggal.....	27
a. Gaya Pengeksitasi Konstan .....	28
b. Tipe Pengeksitasi Masa Berputar.....	30
3.3 Teori Sistem Kebebasan Berderajat Dua.....	33
a. Kasus Tak Tereadam.....	33
i. Gaya Pengeksitasi Beraksi Hanya Pada $m_2$ .....	33
ii. Gaya Pengeksitasi Hanya Pada $m_1$ .....	34
b. Kasus Tak Tereadam.....	36
i. Gaya Harmonis Beraksi Pada $m_1$ .....	36
3.4 Teori Getaran Pada Pondasi Mesin .....	37
a. Getaran Vertikal Pondasi .....	37
i. Getaran Vertikal Pondasi Dengan Mengabaikan Efek Redaman Dari Reaksi Tanah.....	38
ii. Efek Inersia Tanah Pada Getaran Paksa Vertikal Pondasi ..	41
b. Getaran <i>Rocking</i> Pondasi.....	43
c. Getaran Geser.....	44
d. Getaran Pondasi Yang Diakibatkan Oleh Rotasi, <i>Sliding</i> , dan <i>Displacement</i> Vertikal.....	44
3.5 Parameter Geoteknis .....	47
a. Modulus Geser $G^?$ .....	47
b. Rasio Poisson $\nu$ .....	50
c. Rasio Redaman.....	51

d. Densitas Masa $\rho$ .....	53
e. Konstanta Pegas Tanah.....	54
i. Koefisien Elastis Tekanan Seragam ( $C_u$ ).....	54
ii. Koefisien Elastis Tekanan Tidak Seragam ( $C_\phi$ ).....	54
iii. Koefisien Elastis Geser Seragam ( $C_\tau$ ).....	55
iv. Koefisien Elastis Geser Tidak seragam ( $C_\psi$ ).....	55
<b>BAB IV ANALISIS DINAMIS PONDASI MESIN.....</b>	<b>57</b>
4.1 Mode Getaran Pondasi Blok.....	57
4.2 Metode Analisis Pondasi Blok.....	58
a. Translasi Vertikal.....	59
b. Gerakan <i>Sliding</i> dan <i>Rocking</i> Pada Bidang $x - z$ .....	60
c. Gerakan <i>Sliding</i> dan <i>Rocking</i> Pada Bidang $y - z$ .....	63
d. <i>Yawing</i> (atau gerakan <i>Twisting</i> terhadap sumbu $z$ ).....	63
4.3 Analisis Momen dan Gaya Induksi.....	65
a. Mesin Multi Silinder.....	66
i. Gaya Induksi Paralel Ke Sumbu Silinder (sumbu $z$ ).....	67
ii. Gaya Induksi Tegak Lurus Ke Sumbu Silinder (sumbu $x$ ).....	68
iii. Momen Induksi.....	68
b. Prosedur Newcomb's untuk Desain Pondasi Mesin.....	69
c. Gaya Yang Beraksi Pada Pondasi.....	71
d. Distribusi Gaya Inersia.....	73
e. Pondasi diatas <i>Absorbers</i> Getaran.....	75
4.4 Properti Geometris Pondasi Mesin.....	78
a. Pusat Gravitasi.....	78
b. Momen Inersia Daerah Alas.....	79
c. Masa Momen Inersia.....	79
<b>BAB V ISOLASI GETARAN.....</b>	<b>80</b>
5.1 Tipe Isolasi Aktif dan Pasif – <i>Transmissibility</i> .....	81
5.2 Metode Isolasi dalam Pondasi Mesin.....	84

5.3 Isolasi dalam Pondasi Mesin .....	85
a. Perimbangan Beban <i>Exciting</i> .....	86
b. Stabilisasi Tanah .....	86
c. Menggunakan Ukuran Struktur .....	86
i. Meningkatkan <i>Area</i> Dasar atau Masa Pondasi .....	87
ii. Menggunakan <i>Slab</i> yang Ditahan ke Pondasi .....	87
iii. Menggunakan Bantuan Sistem Masa Pegas .....	89
d. Isolasi dengan <i>Trench Barriers</i> .....	92
e. Isolasi dalam Gedung .....	93
5.4 Properti Bahan Isolasi .....	93
a. Gabus ( <i>Cork</i> ) .....	93
b. <i>Felt</i> .....	94
c. Karet ( <i>Rubber</i> ) .....	94
d. Pegas Baja ( <i>Steel Springs</i> ) .....	96
<b>BAB VI DESAIN PONDASI MESIN .....</b>	<b>99</b>
6.1 Desain Nilai Amplitudo yang Diiijinkan untuk Getaran Pondasi .....	99
6.2 Hal-hal yang Perlu Diperhatikan dalam Desain .....	101
6.3 Data untuk Desain Pondasi Mesin .....	103
a. Parameter Mesin .....	103
b. Parameter Tanah .....	103
6.4 Perhitungan .....	106
<b>BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>117</b>
7.1 Kesimpulan .....	117
7.2 Saran .....	118
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>119</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan Satu Dimensi pada Blok Kaku.....	9
Gambar 2.2	Mekanisme <i>Crank</i> Sederhana.....	11
Gambar 2.3	Tipe Distribusi Tekanan.....	13
Gambar 2.4	Sistem Parameter Tergumpal Ekuivalen.....	15
Gambar 2.5	Asumsi pada Metode Pauw.....	22
Gambar 2.6	Koordinat Pondasi.....	23
Gambar 2.7	Ragam Mode Getaran.....	26
Gambar 3.1	Sistem Kebebasan Berderajat Tunggal.....	28
Gambar 3.2	Sistem Kebebasan Berderajat Dua.....	33
Gambar 3.3	Getaran Titik Pusat Masa yang Bertumpu pada Pegas.....	39
Gambar 3.4	Definisi Material Redaman.....	52
Gambar 4.1	Ragam Getaran pada Pondasi Blok.....	57
Gambar 4.2	<i>Displacement</i> Pondasi pada Gaya Osilasi di Bidang $x-z$ .....	58
Gambar 4.3	Pusat Rotasi Sliding dan Rocking bidang $x-z$ .....	62
Gambar 4.4	Grafik yang Mengilustrasikan Persamaan 4.25.....	64
Gambar 4.5	Gaya Pengeksitasi pada Pondasi Blok.....	65
Gambar 4.6	Gaya Pengeksitasi pada Mesin Torak Dua Silinder.....	69
Gambar 4.7	Gaya Pengeksitasi dalam Berbagai Arah.....	71
Gambar 4.8	Distribusi Gaya Inersia.....	73
Gambar 4.9	Zona Efektif <i>Absorbers</i> .....	78
Gambar 5.1	Isolasi Getaran.....	81
Gambar 5.2	Dua Bentuk Pemasangan Lilitan Pegas.....	85
Gambar 5.3	Penggunaan <i>Slab</i> Penahan.....	87
Gambar 5.4	Penggunaan Sistem Masa Bantu.....	89
Gambar 5.5	Isolasi Getaran dengan <i>Trenches</i> .....	92

Gambar 5.6	Bantalan Karet dalam Tekanan.....	95
Gambar 6.1	Pondasi untuk Mesin Gen-set.....	104
Gambar 6.2	Variasi Distribusi Beban.....	112
Gambar 6.3	Dimensi Pondasi Rancangan dan Detail Penulangan.....	114
Gambar 6.4	Penampang Lintang Pondasi .....	116

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rasio Redaman Ekivalen.....	17
Tabel 2.2	Fungsi $F_1$ dan $F_2$ .....	18
Tabel 2.3	Faktor $\alpha$ Berdasarkan Bentuk Pondasi.....	20
Tabel 2.4	Rumus untuk Konstanta Pegas.....	23
Tabel 3.1	Hubungan untuk SDOF.....	32
Tabel 3.2	Nilai yang Representatif untuk Modulus Geser $G'$ .....	49
Tabel 3.3	Jangkauan Nilai Banding Poisson $\nu$ .....	51
Tabel 3.6	Nilai $C_\psi$ dan $C_\tau$ untuk Tanah dan <i>Area</i> Pondasi yang Berbeda....	55
Tabel 3.4	Nilai Rerata untuk $C_u$ .....	56
Tabel 3.5	Nilai $C_\theta$ untuk Tanah dan Pondasi yang Berbeda.....	56
Tabel 4.1	Sudut <i>Wedging</i> untuk Mesin Multi Silinder.....	67
Tabel 4.2	Gaya yang Tak Seimbang dalam Susunan <i>Crank</i> Berbeda.....	70
Tabel 4.3	Gaya yang Beraksi pada Pondasi.....	72
Tabel 4.4	Masa Momen Inersia Terhadap Sumbu Pusat.....	79
Tabel 5.1	Properti Campuran Karet alam.....	96
Tabel 6.1	Nilai yang Diijinkan untuk Amplitudo Getaran.....	100
Tabel 6.2	Perhitungan Pusat Gravitasi dan Masa Momen Inersia.....	105
Tabel 6.3	Evaluasi Gaya Inersia.....	111
Tabel 6.4	Kecepatan Gelombang Kompresi dan Geser.....	115

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 2.1	Hubungan untuk Variasi Nilai $v$ .....	14
Grafik 2.2	Parameter untuk Pondasi Segi-Empat.....	16
Grafik 2.3	Hubungan $f_{nt}$ dan $A_f$ pada Pondasi Mesin.....	21
Grafik 3.1	Respon SDOF dibawah Gaya Pengeksitasi Konstan.....	30
Grafik 3.2	Respon SDOF pada Gaya Pengeksitasi Masa Berputar.....	31
Grafik 3.3	Kurva Respon untuk DDOF.....	35
Grafik 3.4	Respon Masa $m_j$ untuk Bermacam Rasio Redaman.....	37
Grafik 3.5	Rasio Redaman Geometrik.....	52
Grafik 3.6	Rasio Material Redaman untuk <i>Sands</i> dan <i>Clays</i> .....	53
Grafik 5.1	Hubungan <i>Transmissibility</i> dan Rasio Frekuensi.....	82
Grafik 5.2	Efisiensi Isolasi untuk Sistem <i>Resiliently Mounted</i> .....	83
Grafik 5.3	Faktor $\alpha$ untuk Pegas Baja.....	98
Grafik 6.1	Batas yang Diijinkan untuk Amplitudo Getaran.....	100

$G$	modulus geser
$h$	tinggi ekivalen kelebihan tanah
$H$	tinggi pondasi blok
$i$	sufik yang menunjukkan mode getaran
$I_0$	momen inersia <i>area</i> dasar pondasi blok
$I_x, I_y, I_z$	momen inersia yang mengelilingi sumbu $x, y, z$
$K$	koeffisien kekakuan
$K_z$	kekakuan tanah melawan translasi dalam arah vertikal
$K_{\theta x}, K_{\theta y}$	kekakuan tanah melawan rotasi mengelilingi sumbu $x$ dan $y$
$K_{\psi}$	kekakuan melawan osilasi torsional
$K_s$	kekakuan pegas
$L$	panjang pondasi
$m$	masa mesin dan pondasi
$m_{\theta}$	masa eksentrisitas
$m_{rec}$	masa <i>reciprocating</i>
$m_{rot}$	masa rotasi
$m_f$	masa pondasi
$m_s$	masa tanah yang ikut bertranslasi
$M_d$	momen dinamis
$N$	jumlah total elastisitas dukungan
$p$	tekanan rata-rata piston
$P_0$	amplitudo gaya pengeksitasi
$P$	beban mesin terkonsentrasi
$Q$	gaya geser
$r$	radius <i>crank</i>
$S$	tinggi pusat gravitasi diatas alas pondasi
$T$	<i>transmissibility</i>
$T_0$	amplitudo momen <i>twisting</i>
$V_s$	kecepatan gelombang geser

$W$	berat mesin dan pondasi
$x, y, z$	sufik yang digunakan untuk menunjukkan mode linier atau rotari (atau mengelilingi) sumbu $x, y, z$
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	koordinat pusat gravitasi mesin dan pondasi
$Z$	tinggi gaya osilasi horisontal diatas pusat gravitasi
$\alpha_1, \alpha_2$	jarak pusat rotasi dalam pondasi blok diukur dari alas
$\alpha_0$	konstanta yang digunakan Ford dan Haddow
$\alpha_z, \alpha_x, \alpha_\theta$	faktor kekakuan pondasi <i>rectangular</i> untuk vertikal, horisontal, dan mode <i>rocking</i>
$Y_s$	faktor untuk konstanta pegas vertikal tanah (dalam metode Pauw)
$Y_{\theta x}, Y_{\theta y}$	faktor kekakuan tanah untuk rotasi mengelilingi sumbu $x$ dan $y$ (dalam metode Pauw)
$\beta$	efisiensi pegas <i>absorbers</i>
$\beta_0$	faktor <i>decay</i> yang digunakan dalam Ford dan Haddow
$\nu$	rasio poisson
$\xi$	rasio redaman
$\rho$	densitas masa tanah
$\delta_v$	<i>displacement</i> vertikal
$\delta_h$	<i>displacement</i> horisontal
$\eta$	rasio frekuensi
$\sigma_p$	tegangan tanah yang diijinkan
$\sigma_{st}$	tegangan akibat beban statis
$\sigma_d$	tegangan akibat beban dinamis
$\tau$	tegangan geser
$\omega_n$	frekuensi alam ( $sec^{-1}$ )
$\omega_m$	frekuensi opsional mesin ( $sec^{-1}$ )
$\omega_{n1}, \omega_{n2}$	frekuensi alam <i>circular</i> dalam sistem dua tingkat

## INTISARI

Pondasi mesin adalah pondasi yang direncanakan selain untuk mendukung beban statis, juga untuk menahan beban dinamis yang diakibatkan oleh bekerjanya mesin. Getaran yang disebabkan oleh bergetarnya pondasi (efek dari operasional mesin) sering menyebabkan kedudukan pondasi tidak simetris lagi. Pondasi yang terkena getaran secara periodik, menjadi sumber penyebaran gelombang melalui tanah yang berpotensi untuk merusak struktur, ketahanan operasional dan daya mesin. Oleh karena itu dalam perancangannya, memperhitungkan perilaku pondasi akibat beban dinamis yang bekerja dan properti elastis tanah yang mendukungnya.

Perencanaan pondasi yang melibatkan mesin pada prinsipnya adalah menverifikasi amplitudo getaran yang terjadi akibat bekerjanya mesin, sesuai dalam batas yang diizinkan dan frekuensi main yang terjadi dalam batas yang diijinkan. Parameter geoteknik tanah yang berpengaruh dalam analisis dinamis antara lain modulus geser ( $G$ ), rasio poisson ( $\nu$ ), material rasio cedaran ( $\beta$ ) dan densitas massa ( $\rho$ ).

Energi gelombang getaran yang disebabkan melalui tanah dapat direduksi panjang gelombangnya dengan cara memberi isolasi getaran disekitar pondasi mesin. Pada tugas akhir ini, dipakai bolak getaran model *Timoshenko-Rayleigh* yang berupa nilai penyusutan dengan kedalaman sepertiga panjang gelombang yang terjadi dan diisi dengan material perisolasi *Basaltic Glass*.

Untuk mencapai persyaratan bahwa frekuensi alam sistem lebih besar dari frekuensi operasional mesin, salah satu caranya adalah dengan menambah kedalaman tanah dibawah pondasi. Dengan demikian, akan terjadi peningkatan frekuensi alam sistem pondasi-tanah. Pada tugas akhir ini, tanah dibawah pondasi disolidasi dengan semen untuk meningkatkan kekakuannya.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kemajuan di bidang industri dan teknik disertai oleh bertambahnya angka penggunaan mesin dan peningkatan dayanya (*power*) dan juga dengan dikenalkannya metode peledakan (*blasting*) dalam praktek konstruksi, serta semakin meningkatnya kecepatan, intensitas dan tonase dari berbagai jenis transportasi. Semua faktor ini menjadi penyebab utama dalam meningkatnya pengaruh kejutan dan getaran, sehingga dalam penempatannya memerlukan desain pondasi yang khusus.

Getaran yang disebabkan oleh bergetarnya pondasi (efek dari operasional mesin) sering menyebabkan *performance* yang buruk pada bantalan mesin, yang akhirnya menyebabkan pondasi tidak simetris lagi kedudukannya. Getaran pondasi dibawah mesin berkecepatan tinggi juga menyebabkan kelelahan prematur pada bagian-bagian mesin (Barkan, 1962).

Getaran dan kejutan juga mempunyai efek yang membahayakan pada pondasi itu sendiri. Dari kasus yang bisa dicatat, pondasi mesin yang rusak akibat getaran atau kejutan yang terjadi disebabkan terutama oleh begitu cepatnya retak (*cracks*) meluas pada pondasi, yang pertama kali disebabkan oleh perbedaan penurunan pondasi. Akibat dari penurunan yang tidak seragam itulah, maka perlu untuk mengatur dan mengukur keberadaan mesin secara periodik.

Pondasi yang dikenai getaran, menjadi sumber penyebaran gelombang melalui tanah yang mempunyai efek merusak pada struktur dan orang disekelilingnya. Gelombang dari pondasi *hammer* dengan frekuensi yang cukup besar menyebabkan perbedaan penurunan pada kolom atau dinding bengkel pande besi/tempa (*forge shop*). Kejutan pada pondasi *hammer* juga menyebabkan *crane track* lokomotif miring, penyimpangan pada kusen jendela dan kerusakan pada beberapa hubungan elemen struktur (Barkan, 1962).

Gelombang dari pondasi mesin tidak hanya berefek pada struktur, tetapi juga berbagai macam proses teknologi, ketelitian operasional dan daya mesin. Efek yang membahayakan pada struktur, khususnya pada proses teknologi dalam struktur ini, disebabkan oleh gelombang yang disebarkan dari pondasi dibawah mesin berfrekuensi tinggi, dengan pedoman yang stabil dari operasional seperti kompresor, diesel dan *saw frames*. Mesin-mesin ini biasanya mempunyai kecepatan yang sama dan mempunyai besaran nilai karakteristik getaran alam struktur yang sama pula.

Konsekuensinya, frekuensi gelombang yang disebarkan dari pondasi dibawah mesin berfrekuensi tinggi terkadang bersamaan waktu dengan frekuensi alam getaran pada struktur. Getaran semakin membesar dan kemudian mengembang dalam *superstruktur* gedung yang akhirnya gedung akan mengalami kerusakan, pada kondisi demikian gedung dikatakan sedang dalam keadaan beresonansi.

Jika gedung mengalami getaran pada amplitudo yang agak besar, banyak proses teknologi didalam gedung ini menjadi sulit atau sama sekali tidak dapat

berjalan. Getaran yang demikian, mempunyai efek khusus yang membahayakan pada manusia jika seperempat energi getaran masih tertinggal di gedung yang bergetar. Wawancara dengan orang yang tinggal dekat dengan gedung yang bergetar menunjukkan bahwa orang yang mengalami efek getaran setiap hari, sering menderita sakit kepala, susah tidur dan sering gugup (Barkan, 1962).

Dasar-dasar desain pondasi untuk beban dinamis dalam hal ini sangat penting ditinjau dari titik pandang ekonomi. Karena kapasitas bantalan tanah dibawah pondasi mesin biasanya diambil 50 sampai 60 persen dari nilai aksi beban statis, yang pondasinya diperkuat dengan tiang pancang. Klarifikasi tahun terakhir ini pada kasus dasar-dasar dinamis dibawah struktur, dibuat sedemikian rupa untuk meningkatkan nilai desain kapasitas bantalan tanah dibawah pondasi mesin diatas 80 sampai 100 persen dari nilai beban statis (Barkan, 1962)

Sampai saat ini masih dipercayai oleh desainer bahwa masa yang lebih besar dari pondasi mesin, akan memperkecil amplitudo getarannya. Oleh karena itu pondasi dibawah mesin didesain sebagai blok masif yang terkadang mencapai berat beberapa ribu ton dan ditempatkan pada kedalaman 10 sampai 12 meter.

Bangunan pondasi yang demikian, akan menelan pemakaian biaya, material dan waktu yang besar. Desain pondasi yang rasional, sampai pada satu kesimpulan bahwa dari titik tinjauan stabilitas dinamis, selayaknya dibuat pondasi yang seringan mungkin.

Disebabkan oleh desain ini, biaya proyek industri telah tereduksi agak besar pada banyak kasus. Sebagai contoh, pondasi dibawah kompresor horisontal yang kuat dahulu dibangun dengan berat 2.000 sampai 2.500 tons, sekarang bisa

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk merencanakan pondasi yang mendukung mesin *reciprocating engine* berfrekuensi tinggi dalam bentuk struktur fondasi yang efisien, ekonomis dan optimal sehingga gelombang energi yang menyebar ke bangunan disekelilingnya dapat teredaksi dengan baik.

## 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penulisan tugas akhir ini secara umum adalah agar nantinya hasil dan seluruh proses perhitungan yang dilakukan dapat digunakan sebagai acuan dalam merencanakan pondasi dengan beban dinamis (biasanya mesin), serta untuk pemahaman yang lebih luas lagi dalam bidang ilmu pondasi.

## 1.4 Batasan Masalah

Ditak menghasutkan suatu desain yang memuatkan semua perlu pembatasan pada obyek yang ditinjau yaitu

- Mesin yang digunakan jenis *reciprocating engine* (mesin torak), dengan frekuensi tinggi (1500 rpm).
- Struktur pondasi yang direncanakan bertumpu langsung pada tanah dasar dan terpadu dengan bangunan atasannya.
- Bentuk struktur pondasi yang akan didesain bertipe blok (*massive block foundation*).
- Data tanah diambil dari Proyek Gedung Laboratorium, Fakultas Teknik Industri, UH, Yogyakarta, nomor sondir 1, pada kedalaman 1 m.
- Pemertuan pondasi akibat getaran tidak ditinjau dianggap nol.

## BAB II

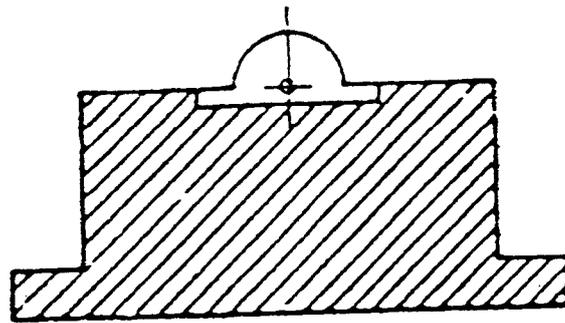
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Pondasi Mesin

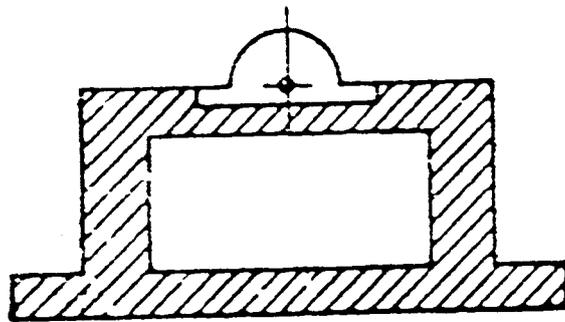
Semua konstruksi yang direkayasa untuk bertumpu pada tanah harus didukung oleh suatu pondasi. Pondasi adalah bagian dari suatu sistem rekayasa yang meneruskan beban yang ditopang oleh pondasi dan beratnya sendiri kepada dan ke dalam tanah dan batuan yang terletak dibawahnya (Bowles,1992). Sedangkan bila pondasi tersebut meneruskan beban dinamis seperti pondasi yang mendukung mesin, maka selain beban statis yang didukung, juga dikenai beban dinamis yang diakibatkan oleh bekerjanya mesin. Oleh karena itu dalam perencanaannya, perlu diperhatikan perilaku pondasi akibat beban dinamis yang bekerja dan properti elastis tanah yang mendukungnya.

Srinivasulu (1976) mengklasifikasikan pondasi mesin berdasarkan bentuk strukturnya, yaitu sebagai berikut (gambar 2) :

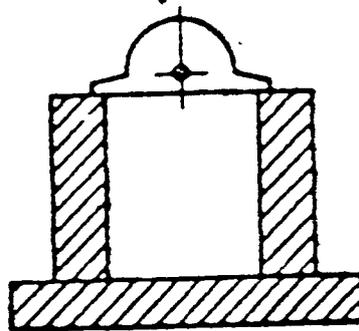
- a. Pondasi tipe blok, yaitu mesin terletak pada penyangga yang terbuat dari beton.
- b. Pondasi tipe *box* atau *caisson*, yaitu mesin didukung pada bagian atas balok berlubang yang terbuat dari beton.
- c. Pondasi tipe *wall*, yaitu terbuat dari sepasang dinding yang mendukung mesin dibagian atasnya.
- d. Pondasi tipe *frame*, yaitu terdiri atas sepasang kolom vertikal yang mendukung balok horisontal sebagai tempat dudukan mesin.



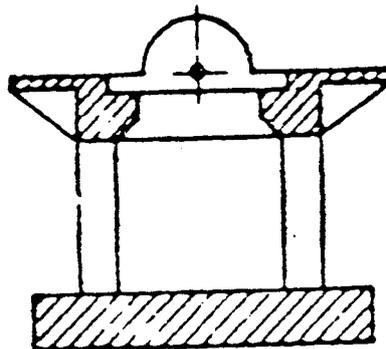
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2 : Tipe Pondasi Mesin – (a) Tipe Blok, (b) Tipe Box, (c) Tipe Wall, (d) Tipe Frame. (Srinivasulu, 1976)

Sedangkan berdasarkan kriteria desain pondasinya, mesin diklasifikasikan menurut, :

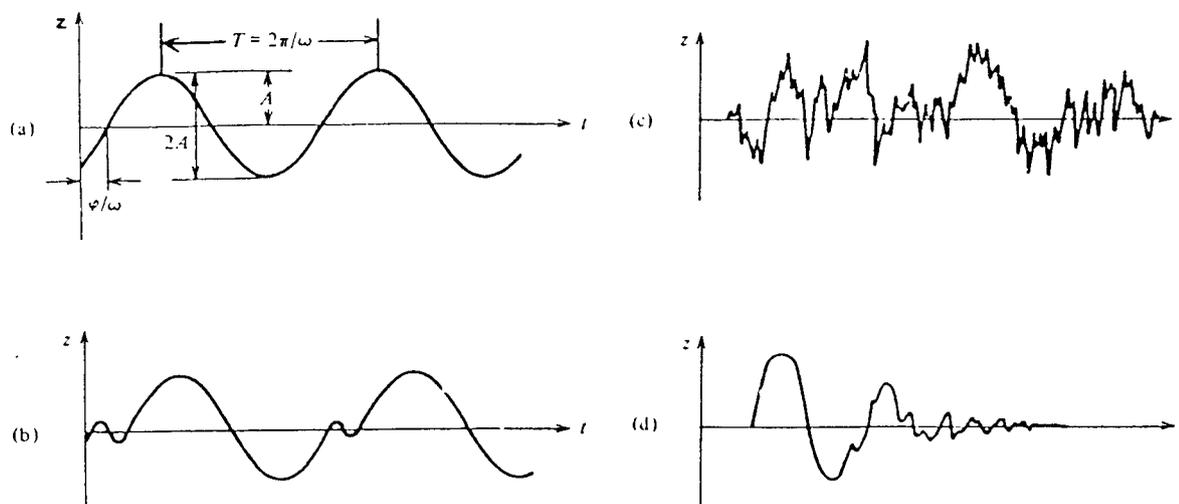
- a. Mesin yang menghasilkan gaya impak, seperti : *forge hammers, stresses*.
- b. Mesin yang menghasilkan gaya periodik, seperti : *reciprocating engines*, contohnya adalah kompresor
- c. Mesin yang berkecepatan tinggi, seperti turbin dan kompresor rotari.

Berdasarkan frekuensi operasinya, mesin dibagi dalam tiga kategori, yaitu :

- |  |                |
|--|----------------|
| a. Mesin berfrekuensi rendah – sedang      | 0 – 500 rpm    |
| b. Mesin berfrekuensi sedang – tinggi      | 300 – 1000 rpm |
| c. Mesin berfrekuensi <u>sangat tinggi</u> | > 1000 rpm     |

## 2.2. Beban Dinamis

Dalam merencanakan pondasi dengan beban dinamis, maka perlu untuk menentukan beban dinamis aplikasi yang akan diset pada gerakan pondasi. Pada gambar 2.1 diilustrasikan empat pola gerakan getaran satu dimensi terhadap arah z pada blok kaku (Richart,1962). Gambar 2.1a mendeskripsikan gerakan harmonis yang direpresentasikan oleh kurva sinusoidal pada diagram *displacement z* dengan waktu *t*. Gambar 2.1b merepresentasikan gerakan periodik dalam pola berulang, tapi tidak bergerak harmonis. Gambar 2.1c sering diaplikasikan terhadap gaya yang berasal dari alam, contohnya ; angin, gelombang air atau gempa bumi. Pada gambar 2.1d dideskripsikan gerakan transien yang merupakan hasil dari sebuah gaya yang relatif singkat, atau beban pukulan (*pulse loading*).



Gambar 2.1: Gerakan Satu Dimensi Pada Blok Kaku : (a) Harmonis;  
(b) Periodik; (c) Random; (d) Transien (Richart, 1962).

#### a. Mesin Rotari (Gerakan Harmonis)

Richart (1962) menjabarkan beban dinamis yang terjadi pada mesin dengan gerakan harmonis sebagai berikut :

$$Q = Q_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

dimana :  $Q_0$  adalah konstanta atau fungsi dari frekuensi rotari  $\omega$  (rad/sec).

Frekuensinya tergantung pada gaya yang diberikan olen :

$$Q_0 = m_e e \omega^2 = m_e e 4\pi^2 f^2 \quad (2.2)$$

dimana :  $m_e$  adalah eksentrisitas masa,

$e$  adalah eksentrisitas jari-jari dari pusat rotasi terhadap pusat gravitasi rotasi masa,

$\omega$  frekuensi angular (rad/sec), dan

$f$  frekuensi operasi (cycles/sec).

Gaya pengeksitasi dideskripsikan oleh substitusi persamaan 2.2 kedalam persamaan 2.1, dimana itu adalah tipe yang umum dikembangkan oleh mesin jenis rotari. Untuk menghitung gaya ini, maka perlu untuk menentukan rotasi masa (berat/g) dan eksentrisitas jari-jari  $e$ .

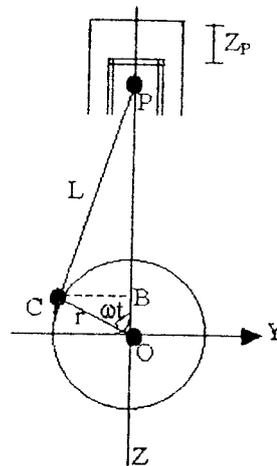
Untuk mesin rotasi pada bagian yang bergerak, secara teori tidak menghasilkan gaya yang tak seimbang selama putarannya. Akan tetapi, dalam praktiknya gaya yang tak seimbang selalu ada dan besarnya dipengaruhi oleh prosedur desain, manufaktur, instalasi, dan perawatannya. Kontribusi ketidakseimbangannya ini termasuk : *misalignment* selama instalasi ; rusak, korosi, atau pemakaian bagian yang bergerak ; pengencangan yang tak cakup pada komponen ; dan defleksi gravitisional pada *shaft*. Bagaimanapun eksesisifnya getaran pada mesin rotari dan pondasinya terjadi, nyatanya menolong mereduksi gaya yang tak seimbang.

#### **b. Mesin *Reciprocating* (Gerakan Periodik)**

Mesin dengan mekanisme *crank* yang menghasilkan gaya *reciprocating* diantaranya adalah mesin pembakaran dalam, mesin uap, pompa tipe piston dan kompresor. Pada dasarnya mekanisme *crank* adalah mengubah gerakan *reciprocating* kegerakan rotari, atau sebaliknya (gambar 2.2 )

Richart (1962) menjabarkan tentang mekanisme *crank* yang terdiri atas piston yang bergerak vertikal dalam silinder penuntun, batang penghubung dengan panjang  $L$  yang ditahan terhadap piston dititik  $p$  dan terhadap *crank* dititik  $C$  dan *crank* yang mempunyai panjang  $r$  berrotasi mengelilingi titik  $o$  dengan kecepatan

sudut  $\omega$ . Dengan demikian, pasak *crank*  $C$  mengikuti bagian yang berputar ketika pasak pergelangan  $p$  berosilasi sepanjang bagian garis lurus.



Gambar 2.2 : Mekanisme *Crank* Sederhana (Richart, 1962)

Akselerasi pasak *crank*  $C$  dalam arah vertikal adalah :

$$\ddot{Z}_C = r\omega^2 \cos \omega t \quad (2.3)$$

akselerasi dari pasak pergelangan (*wrist pin*)  $p$  dan piston dalam arah vertikal

adalah :

$$\ddot{Z}_p = r\omega^2 \left( \cos \omega t + \frac{r}{L} \cos 2\omega t \right) \quad (2.4)$$

sedangkan rumus yang mengilustrasikan hubungan antara *displacement*, kecepatan,

dan akselerasi dari piston adalah :

$$Z_p = \left[ r + \left( \frac{r^2}{4L} \right) \right] - r \left[ \cos \omega t + \left( \frac{r}{4L} \right) \cos 2\omega t \right]$$

$$\dot{Z}_p = r\omega \left[ \sin \omega t + \left( \frac{r}{2L} \right) \sin 2\omega t \right]$$

$$\ddot{Z}_p = r\omega^2 \left[ \cos \omega t + \left( \frac{r}{L} \right) \cos \omega t \right]$$

Masa pada batang penghubung dapat ditempatkan lagi oleh dua masa yang ekuivalen, satu berotasi dengan pasak *crank*  $C$  dan lainnya bergerak translasi dengan pasak pergelangan  $p$ . Maka, total gaya vertikal  $F_Z$  dan total gaya horisontal  $F_Y$  dapat direpresentasikan dalam *term* pada total masa rotasi  $m_{rot}$  dan total masa *reciprocating*  $m_{rec}$  sebagai berikut :

$$F_Z = (m_{rec} + m_{rot}) r \omega^2 \cos \omega t + m_{rec} \frac{r^2}{L} \omega^2 \cos 2 \omega t \quad (2.5)$$

dan  $F_Y = m_{rot} r \omega^2 \cos 2 \omega t \quad (2.6)$

### c. Getaran Random

Gempa bumi, angin, gelombang air mempunyai pola gerakan random (tak teratur) yang berpengaruh terhadap struktur dan pondasi. Dalam menetapkan gaya atau pola *displacement* yang akan diaplikasikan sebagai beban desain, perlu untuk memperoleh data lapangan yang dapat dipercaya dari kejadian yang lalu untuk diajukan sebagai kondisi awal desain (Richart, 1962).

### d. Beban Singkat (*Pulse Loadings*)

Operasional dari mesin *punch presses*, *forging hammers* dan *drop test*, adalah contoh dari mesin penghasil beban impulsif yang dipertimbangkan sebagai *single pulses* karena efek dari satu beban *pulse* hilang sebelum beban berikutnya terjadi. Dalam mengevaluasi respon pondasi blok terhadap beban tipe *pulse*, perlu untuk memperoleh data gaya dan waktu pada *pulse* (Richart, 1962).

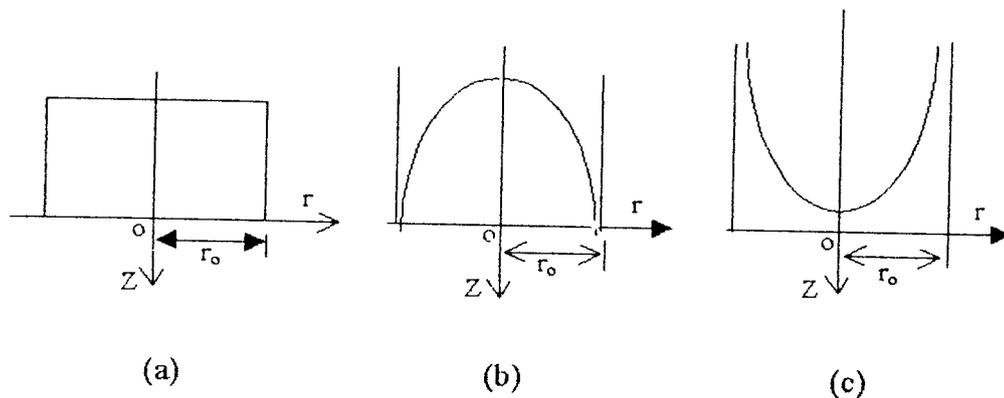
## 2.3. Metode Analisis Pondasi Berbeban Dinamis

Dalam menganalisis perilaku gerakan yang terjadi pada pondasi akibat beban dinamis, perlu juga untuk menganalisa perilaku tanah pendukungnya karena

ada interaksi antara tanah dan pondasi yang didukungnya. Ada beberapa metode untuk menganalisa perilaku tanah seperti berikut ini (Srinivasulu, 1976) :

**a. Metode Yang Menganggap Tanah sebagai *Semi-infinite Elastic Solid***

Tanah dipertimbangkan sebagai *Semi-infinite Elastic Solid* (atau disebut *elastic half space*) yang dipengaruhi getaran dari osilator memiliki alas lingkaran. Properti yang penting dari tanah sebagai bodi elastis adalah : modulus geser  $G$ , rasio poisson  $\nu$ , *mass density*  $\rho$ . Ada tiga tipe distribusi tekanan yang diasumsikan terjadi pada alas pondasi yaitu :



Gambar 2.3 : Tipe Distribusi Tekanan- (a) *Uniform*, (b) *Parabolic*, dan (c) *Rigid base* (Srinivasulu, 1976)

Richart (1962) memberikan pendekatan yang berdasarkan pada asumsi dari distribusi tekanan alas kaku dibawah pondasi. Dua tipe gaya pengeksitasi yang dipertimbangkan yang pertama adalah tipe gaya yang amplitudo pengeksitasinya konstan dan yang lainnya dipengaruhi oleh frekuensi pengeksitasi.

Pada grafik 2.1 ditunjukkan plot gambar non dimensi dengan faktor frekuensi ( $\omega_0$ ) dan faktor amplitudo ( $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$ ) yang diambil masing-masing sebagai absis

dan rasio masa ( $b_2$ ) sebagai ordinat untuk variasi nilai rasio poisson ( $\nu$ ). Notasi yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\text{Faktor frekuensi } (\omega_0) = \omega_z r_o \sqrt{\rho/G} \tag{2.7}$$

$$\text{Rasio masa } (b_2) = m/\rho r_o^3 \tag{2.8}$$

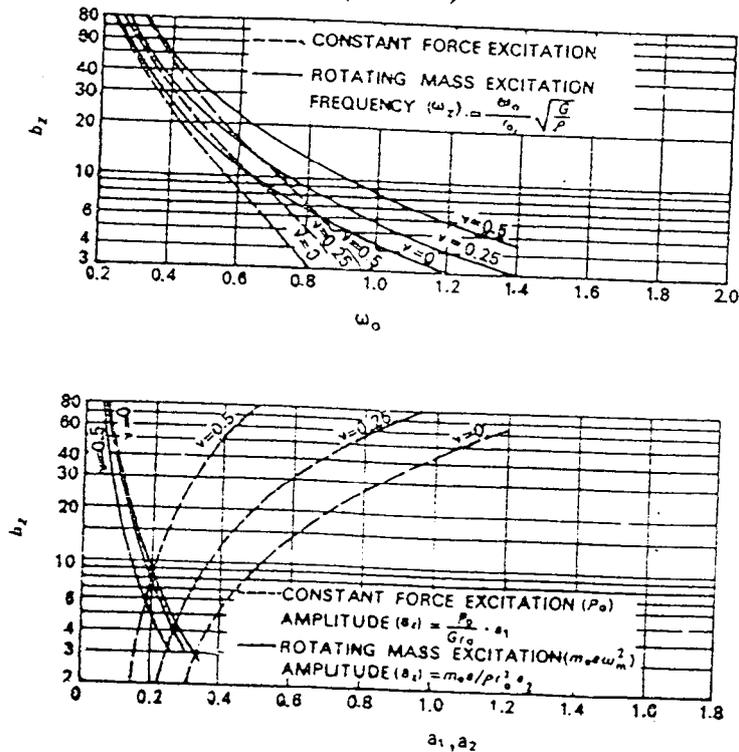
dimana  $\rho$  adalah densitas masa tanah,  $m$  adalah masa pondasi mesin,  $r_o$  radius ekivalen alas lingkaran  $\left( \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \right)$  dan  $A_f$  adalah luas aias pondasi.

Faktor amplitudo ( $a_1, a_2$ )

$$a_1 = a_z \frac{r_o}{p_o} \text{ untuk gaya pengeksitasi } (P_o) \text{ konstan} \tag{2.9}$$

$$a_2 = a_z \frac{\rho r_o^3}{m_e \ell} \text{ untuk masa pengeksitasi } (m_e \ell \omega_m^2) \text{ rotasi} \tag{2.10}$$

dimana  $a_z$  adalah amplitudo resonansi (vertikal)



Grafik 2.1: hubungan  $\omega_0, a_1$  dan  $a_2$ , dan  $b_2$  untuk variasi nilai  $\nu$  (Srinivasulu, 1976)

Srinivasulu (1976) menyatakan bahwa sistem parameter tergroupal (*lumped parameter*), ekuivalen dengan model *elastic half-space* yaitu dengan merepresentasikan masa pegas dan sebuah *dashpot* yang digunakan sebagai model dasar untuk menganalisis gerakan pondasi blok kaku. Persamaan yang diberikan untuk sistem diatas adalah :

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t) \quad (2.11)$$

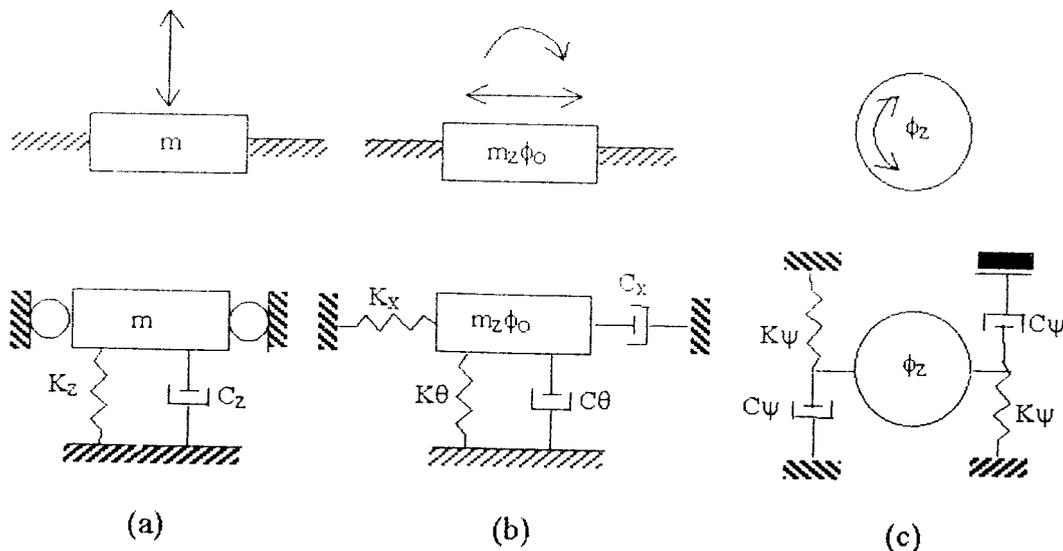
dimana :  $m$  adalah masa ekuivalen,

$C$  adalah konstanta redaman ekuivalen,

$K$  adalah konstanta pegas ekuivalen

$P(t)$  adalah gaya yang tergantung pada waktu.

Masa mesin dan pondasi dianggap sebagai masa tergroupal. Tipikal yang ekuivalen dengan parameter tergroupal diberikan oleh gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 : Sistem Parameter Tergroupal Ekuivalen Untuk mode (a) Vertikal, (b) *Sliding* dan *Rocking*, (c) Torsional (Srinivasulu, 1976).

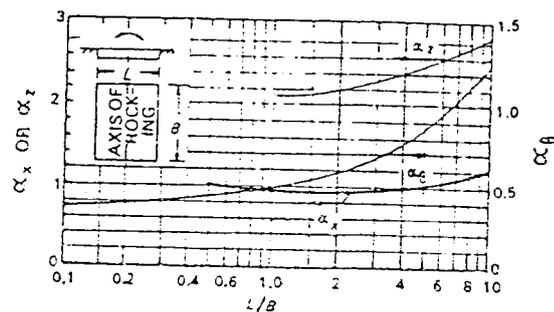
Konstanta pegas untuk *footing* yang mempunyai dimensi ( $L \times B$ ) dan bertumpu pada *elastic half-space*, ditentukan dari rumus berikut :

$$\text{Vertikal} \quad K_z = \frac{G}{1-\nu} \alpha_z \sqrt{LB} \quad (2.12)$$

$$\text{Horisontal} \quad K_x = 2(1+\nu) G \alpha_x \sqrt{LB} \quad (2.13)$$

$$\text{Rocking} \quad K_\theta = \frac{G}{1-\nu} \alpha_\theta BL^2 \quad (2.14)$$

Adapun parameter  $\alpha_z$ ,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_\theta$ , dapat ditentukan dari grafik 2.2 dibawah ini, dan frekuensi resonansi juga amplitudo dapat ditentukan dari rumus yang diberikan dalam tabel 3.1. Dan rasio redaman dapat diperoleh dari rumus dalam tabel 2.1.



Grafik 2.2 Parameter Yang Digunakan Untuk Pondasi Segi Empat

(Richart, 1970)

Hsieh (1962) memberikan penyelesaian analitis untuk masalah pondasi lingkaran dibawah asumsi distribusi tekanan alas kaku dibawahnya. Adapun persamaan gerakan yang terjadi pada pondasi adalah :

$$\text{Translasi} \quad m \ddot{x} + \sqrt{\rho G} r_o^2 F_2 \dot{x} + F_1 G r_o x = P_o \sin \omega_m t \quad (2.15)$$

$$\text{Rocking} \quad \varphi \ddot{\theta} + \sqrt{\rho G} r_o^4 F_2 \dot{\theta} + Gr_o^3 F_1 \theta = M_o \sin \omega_m t \quad (2.16)$$

dimana :

$F_1, F_2$  adalah fungsi yang ditentukan dalam tabel 2.2

$\alpha_1, \alpha_2$  terdapat dalam rumus untuk  $F_1$ , yaitu  $F_1 = \alpha_1 - \alpha_2 \omega_o^2$

$\omega_o$  adalah faktor frekuensi =  $\omega_n r_o \sqrt{\rho / \gamma}$

$P_o$  adalah amplitudo gaya pegeksitasi

Tabel 2.1  
Rasio Redaman Ekuivalen (Richart, 1970)

Mode	Rasio Masa ( $B_i$ )	Rasio Redaman ( $\xi_i$ )
Vertikal	$B_z = \frac{(1-\nu)}{4} \frac{m}{\rho r_o^3}$	$\xi_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}}$
Sliding	$B_x = \frac{(7-8\nu)}{32(1-\nu)} \frac{m}{\rho r_o^3}$	$\xi_x = \frac{0,288}{\sqrt{B_x}}$
Rocking	$B_\theta = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{\phi_\theta}{\rho r_o^3}$	$\xi_\theta = \frac{0,15}{(1+B_\theta)\sqrt{B_\theta}}$
Torsi	$B_\psi = \frac{\varphi_z}{\rho r_o^3}$	$\xi_\psi = \frac{0,5}{1+2B_\psi}$

Tabel 2.2  
Fungsi  $F_1$  dan  $F_2$  (Hsieh,1962)

Mode	Ratio poisson $\nu$	$F_1$	$F_2$
Vertikal ( $0 < \omega_0 < 1.5$ )	0	$4.0 - 0.5\omega_0^2$	$3.3 + 0.4\omega_0$
	0.25	$5.3 - 1.0\omega_0^2$	$4.4 + 0.8\omega_0$
	0.5	$8.0 - 2.0\omega_0^2$	6.9
Horisontal ( $0 < \omega_c < 2.0$ )	0	$4.5 - 0.2\omega_0^2$	$2.4 + 0.3\omega_0$
	0.25	$4.8 - 0.2\omega_0^2$	$2.5 + 0.3\omega_0$
	0.5	$5.3 - 0.1\omega_0^2$	$2.8 + 0.4\omega_0$
Rocking ( $0 < \omega_0 < 1.5$ )	0	$2.5 - 0.4\omega_0^2$	$0.4\omega_0$
Torsi ( $0 < \omega_0 < 2.0$ )	Semua	$5.1 - 0.3\omega_0^2$	$0.5\omega_0$

Substitusikan  $F_1 = \alpha_1 - \alpha_2 \omega_0^2$  kedalam persamaan 2.15 dan 2.16 yang tereduksi dalam bentuk berikut :

$$(m + \alpha_2 \rho r_o^3) \ddot{x} + \sqrt{\rho G} r_o^2 F_2 \dot{x} + \alpha_1 G r_o x = P_o \sin \omega_m t \quad (2.17)$$

$$(\varphi + \alpha_2 \rho r_o^3) \ddot{\phi} + \sqrt{\rho G} r_o^2 F_2 \dot{\phi} + \alpha_1 G r_o^3 \theta = M_o \sin \omega_m t \quad (2.18)$$

Membandingkan persamaan 2.17 dan 2.18 dengan persamaan standar gerakan pada sistim kebebasan berderajat tunggal (persamaan 3.1), berikut kesimpulan yang dapat diperoleh :

1. Istilah  $\alpha_2 \rho r_o^3$  mewakili masa tanah efektif yang ikut bergetar pada mode translasi. Rumus yang berhubungan untuk masa momen inersia tanah pada mode rotasional adalah  $\alpha_2 \rho r_o^3$ .

2. Istilah  $\sqrt{\rho G r_o^2} F_2$  ekuivalen dengan koefisien redaman ( $C$ ) pada mode translasi. Rumus yang berhubungan pada mode rotari adalah  $\sqrt{\rho G r_o^4} F_2$ .
3. Istilah  $\alpha_1 Gr_o$  ekuivalen dengan konstanta pegas tanah pada mode translasi. Rumus yang berhubungan untuk mode rotari adalah  $\alpha_1 Gr_o^3$ .

Dengan diketahuinya masa efektif, redaman dan kekakuan yang ekuivalen dengan sistem kebebasan berderajat tunggal, maka dapat ditentukan nilai frekuensi alam dan amplitudo dari rumus yang diberikan pada tabel 3.1. Untuk distribusi tekanan *uniform* dan *parabolic* dibawah kaki pondasi, Hsieh menyarankan jari-jari  $\alpha r_o$  digunakan dalam rumus diatas, dimana  $\alpha$  adalah 0,78 dan 0,59.

Ford and Haddow (1960), memberikan metode analisis untuk menentukan frekuensi alam pondasi mesin, yang didasarkan pada prinsip tentang kekekalan energi yang diasumsikan bahwa sistem adalah konservatif. Rumus untuk frekuensi alam dan getaran vertikal adalah :

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2G(1+\nu)\beta_o g}{\left(\frac{\rho g}{\beta_o}\right) + \sigma}} \quad (2.19)$$

dimana :

$\beta_o$  adalah faktor keruntuhan yang mewakili tingkat keruntuhan amplitudo pada

kedalaman tertentu dibawah permukaan

$\rho$  adalah densitas masa

$g$  adalah akselerasi selama gravitasi

$\sigma$  tekanan bantalan pada tanah

nilai  $\beta_o$  ditentukan dari

$$\beta_o = \frac{C}{\alpha \sqrt{A_f (1 - \nu^2)}} \quad (2.20)$$

dimana :

$\alpha$  adalah konstanta yang tergantung pada bentuk pondasi (tabel 2.3)

$C$  adalah konstanta tanah ( $C = 2$  untuk *sands* dan  $1,5$  untuk *clays*)

$A_f$  adalah luas alas pondasi dalam  $ft^2$

Tabel 2.3  
Faktor  $\alpha$  Berdasarkan Bentuk Pondasi  
(After Ford dan Haddow, 1960)

Bentuk	Lingkaran	Persegi	Segi Empat Panjang					
Rasio L/B	-	1.0	1,5	2	3	5	10	100
$\alpha$	0,96	0,95	0,84	0,92	0,88	0,82	0,71	0,37

Rumus untuk frekuensi alam horisontal adalah seperti berikut :

$$f_x = f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G\beta_o g}{\rho g / \beta_o + \sigma}} \quad (2.21)$$

#### b. Metode Empiris

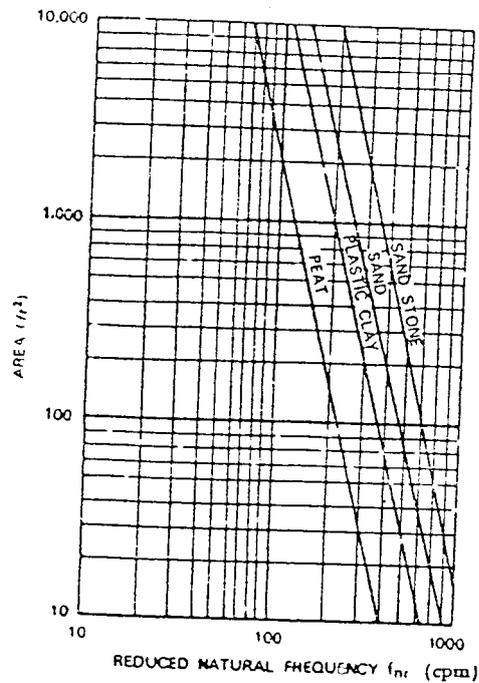
Tschebotarioff (1953) memberikan pendekatan hubungan antara bidang kontak dari pondasi mesin dan variabel yang diistilahkan sebagai *reduced natural frequency* ( $f_{nr}$ ), yang didefinisikan sebagai hasil dari frekuensi alam dan akar dari bidang kontak.

$$f_{nr} = f_n \sqrt{\sigma} \quad \text{dimana } \sigma = W/A_f, t/ft^2 \quad (2.22)$$

dimana :

$W$  adalah berat dari pondasi dan  $A_f$  adalah luas alas.

Grafik 2.3 digunakan untuk menentukan frekuensi alam dari berat mesin ditambah pondasi dan luas bidang kontakannya.



Grafik 2.3 : Hubungan  $f_{nr}$  dan  $A_f$  Pada Pondasi Mesin  
(Tschebotarioff, 1953)

Alpan (1961) menggunakan data Tschebotarioff dan mengembangkan rumus untuk frekuensi alam, dalam bentuk :

$$f_n = \frac{\alpha}{\sqrt{W}} (A_f)^{\frac{1}{4}} \quad (2.23)$$

dimana

$f_n$  adalah frekuensi alam ,

$W$  adalah berat mesin dan pondasi,

$A_f$  adalah luas bidang kontak,

$\alpha$  adalah konstanta (3900 untuk *peats*, 69000 untuk tanah liat plastis,

82000 untuk pasir dan 111000 untuk pasir berbatu).

Metode ini digunakan untuk desain awal jika konstanta tanah tidak diketahui.

### c. Tanah Yang Dipertimbangkan Sebagai Pegas

Srinivasulu (1976) menyatakan bahwa metode ini didasarkan pada asumsi bahwa masa tertentu dari tanah ikut bergetar bersama dengan pondasi. Interpretasi perilaku ini sebagai sistem masa pegas tak teredam, frekuensi alam *circular* ( $\omega_n$ ) dalam mode vertikal adalah :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_z}{m + m_s}} \quad (2.24)$$

dimana :

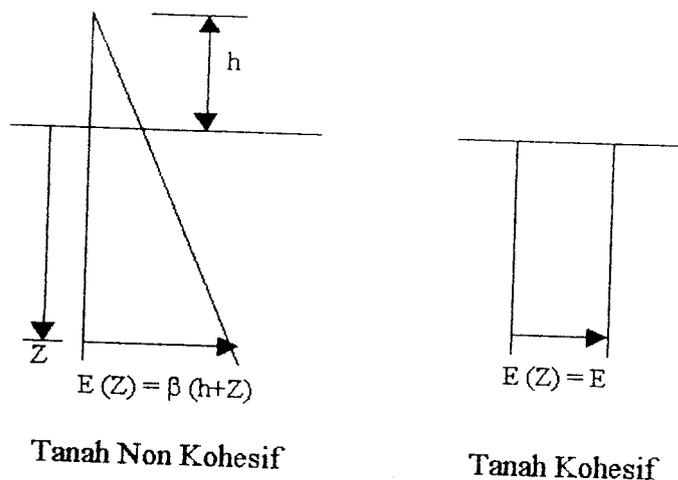
$K_z$  adalah konstanta pegas tanah,

$m$  adalah masa pondasi mesin, dan

$m_s$  adalah masa tanah yang bergetar bersama pondasi.

Hasil penyelidikan yang telah dilakukan menegaskan bahwa masa tanah tertentu bergetar dengan pondasi, dan ini harus dipertimbangkan dalam analisis.

Pauw (1953) menyarankan bahwa daerah efektif tanah dibawah pondasi, diasumsikan sebagai piramida terpancung yang melebar sampai kedalaman tak terbatas. Asumsi lain dari metode Pauw adalah sebagai berikut (gambar 2.5).



Tanah Non Kohesif

Tanah Kohesif

Gambar 2.5 : Asumsi pada Metode Pauw (1953)

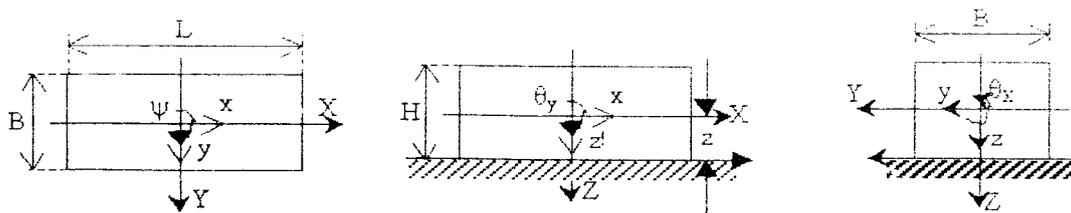
Untuk tanah non kohesif, modulus elastisitas ( $E$ ) sebanding dengan kedalaman efektif. Untuk tanah kohesif, nilai  $E$  adalah konstan dan distribusi tekanan pada setiap bagian paralel pada bidang kontak adalah seragam.

Menurut metode ini, faktor kekakuan pegas ( $K_z$ ,  $K_x$ , dan  $K_y$ ) untuk mode getaran translasi diberikan dalam rumus pada tabel 2.4 dibawah ini :

Tabel 2.4  
Rumus Untuk Konstanta Pegas  
(After Pauw, 1953)

Mode	Konstanta Pegas	Tanah Non kohesif	Tanah Kohesif
Translasi	$K_z$	$\beta B^2 \gamma z$	$E\alpha B \gamma z$
	$K_x = K_y$	$\beta' B^2 \gamma z$	$G\alpha B \gamma z$
Rocking	$K\theta_x$	$\beta B^4 \gamma \theta_x$	$E\alpha B^3 \gamma \theta_x$
	$K\theta_y$	$\beta B^4 \gamma \theta_y$	$E\alpha B^3 \gamma \theta_y$
	$K\psi$	$\beta' B^4 (\gamma \theta_x + \gamma \theta_y)$	$G\alpha B^3 (\gamma \theta_x + \gamma \theta_y)$

Untuk pondasi blok kaku yang mempunyai enam derajat kebebasan umumnya berkoordinat  $x, y, z, \theta_x, \theta_y$  dan  $\psi$  seperti dalam gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 : Koordinat Pondasi (Srinivasulu, 1976).

Parameter inersia digunakan bersama dengan koordinat ini, yang digunakan sebagai suffik adalah :

$$m_x = m_y = m_z = m^f = m^s \quad (2.25)$$

dimana : pangkat  $f$  dan  $s$  menunjukkan pondasi dan tanah.

Begitupun, masa momen inersia  $\varphi_{ox}$ ,  $\varphi_{oy}$ ,  $\varphi_{oz}$  yang berotasi mengelilingi sumbu  $x$ ,  $y$ ,  $z$  diberikan dalam rumus berikut :

$$\begin{aligned}\varphi_{ox} &= (\varphi_{ox})^f + (\varphi_{ox})^s \\ \varphi_{oy} &= (\varphi_{oy})^f + (\varphi_{oy})^s \\ \varphi_{oz} &= (\varphi_{oz})^f + (\varphi_{oz})^s\end{aligned}\quad (2.26)$$

Untuk pondasi dengan koordinat yang ditunjukkan dalam gambar 2.3, enam frekuensi alam pondasi blok dapat ditulis sebagai berikut :

Vertikal  $\omega_z^2 = K_z/m_z$  (2.27)

*Sliding dan rocking pada bidang xz*

$$\omega_x^2, \theta_y = \frac{1}{2} \left[ \frac{K_x}{m_x} + \frac{K_x S^2 + K_{\theta y}}{\varphi_{0y}} + \sqrt{\left\{ \frac{K_x}{m_x} + \frac{K_x S^2 + K_{\theta y}}{\varphi_{0y}} \right\}^2 - \frac{4 K_x K_{\theta y}}{m_x \varphi_{0y}}} \right] \quad (2.28)$$

*Sliding dan rocking pada bidang yz*

$$\omega_y^2, \theta_x = \frac{1}{2} \left[ \frac{K_y}{m_y} + \frac{K_y S^2 + K_{\theta x}}{\varphi_{0x}} + \sqrt{\left\{ \frac{K_y}{m_y} + \frac{K_y S^2 + K_{\theta x}}{\varphi_{0x}} \right\}^2 - \frac{4 K_y K_{\theta x}}{m_y \varphi_{0x}}} \right] \quad (2.29)$$

“ $S$ ” menunjukkan tinggi pada pusat gravitasi diatas alas pondasi.

Torsional (*yawing*)  $\omega_\psi^2 = \frac{K_\psi}{\varphi_{0z}}$  (2.30)

Barkan (1962) dalam desain pondasi mesinnya, mengabaikan efek redaman dan mempertimbangkan tanah sebagai pegas linier tak berbobot. Menurutnya, redaman hanya sedikit efeknya terhadap hitungan frekuensi alam, dan jika operasional frekuensi alamnya tersendiri, maka efek redaman pada amplitudo dapat diabaikan.

Memperhatikan efeknya pada inersia tanah, Barkan menunjukkan bahwa masa tanah yang ikut bergetar bersama pondasi normalnya tidak melampaui 23 persen dari total masa mesin dan pondasi. Kemudian menurutnya pula, hitungan frekuensi alam yang salah tidak boleh lebih dari 10 %.

Untuk pondasi yang langsung bertumpu pada tanah, Barkan mengenalkan parameter tanah berikut yang hasilnya berupa kekakuan pegas tanah dalam berbagai mode. Parameter tanah tersebut adalah sebagai berikut :

Koefisien elastis tekanan seragam untuk mode translasi vertikal  $C_z$

Koefisien elastis tekanan tidak seragam untuk mode *rocking*  $C_\theta$

Koefisien elastis geser seragam untuk mode translasi horisontal  $C_\tau$

Koefisien elastis geser tidak seragam untuk mode *yawing*  $C_\psi$

Jika pusat gravitasi mesin dan pondasi serta titik pusat alas terletak pada garis vertikal yang sama disalah satu bidang pokok pondasi, maka dapat dikatakan bahwa gerakan translasi dari pondasi sepanjang sumbu vertikal (sumbu  $z$ ) dan gerakan memutar mengelilingi sumbu yang sama (*yawing*) adalah independen (*uncoupled*). Karena itu, gerakan dalam dua mode ini, dapat direpresentasikan dengan dua sistem kebebasan tunggal secara terpisah. Dengan kata lain, gerakan sliding dalam sumbu horisontal  $x$  (atau  $y$ ) dan gerakan memutar mengelilingi sumbu  $y$  (atau  $x$ ) adalah saling tergantung (*coupled*). Dan karenanya gerakan ini dapat direpresentasikan oleh dua sistem kebebasan berderajat dua secara terpisah.

Dan untuk menyelesaikan analisa dinamis pada pondasi blok seperti ini diilustrasikan dalam gambar 2.7.

## BAB III

### LANDASAN TEORI

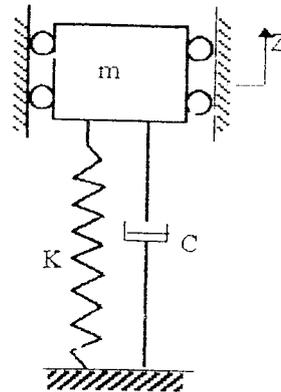
#### 3.1 Resonansi dan Efeknya

Setiap sistem yang dari alam mempunyai frekuensi karakteristik yang dikenal sebagai “frekuensi alam”. Gejala ini ditandai dengan bergetarnya sistem bila dikenai getaran bebas. Manakala frekuensi operasi mesin mendekati frekuensi alam pondasinya, maka amplitudo getaran yang terjadi cenderung menjadi besar. Sistem dikatakan beresonansi bila kedua frekuensi (pondasi dan mesin) menjadi sama. Pada keadaan resonansi akan dijumpai amplitudo getaran yang eksekif, yang menyebabkan penurunan pondasi secara besar terjadi (Srinivasulu, 1976).

Dalam desain pondasi mesin, kriteria terpenting adalah menghindari terjadinya resonansi agar amplitudo getaran tidak menjadi berlebihan. Secara matematis, timbulnya resonansi dapat diterangkan sebagai kasus sistem kebebasan berderajat tunggal. Untuk pondasi mesin yang diberi peredam, secara matematis diterangkan sebagai kasus sistem kebebasan berderajat dua.

#### 3.2 Teori Sistem Kebebasan Berderajat Tunggal

Gambar 3.1 menunjukkan sistem yang dibentuk dari masa kaku  $m$  yang diletakan pada sebuah pegas dengan kekakuan  $k$  dan redaman liat (*viscous damping*) yang mempunyai koefisien redaman  $c$ .



Gambar 3.1: Sistem Kebebasan Berderajat Tunggal (SDOF)  
(Srinivasulu, 1976)

Sistem ini gerakannya terkekang hanya pada satu arah. Bila sistem dipengaruhi oleh gaya pegeksitasi harmonis  $P_0 \sin \omega_m t$ , maka persamaan gerakannya tergantung pada tipe gaya pegeksitasinya yang terdiri atas :

a. Gaya Pegeksitasi Konstan

Yang konstan adalah amplitudo gaya pegeksitasinya ( $P_0$ ), maka persamaan gerakannya (Srinivasulu,1976) :

$$m \ddot{z} + C \dot{z} + K z = P_0 \sin \omega_m t \quad (3.1)$$

dimana :

$$P_0 \sin \omega_m t = \text{gaya pegeksitasi}$$

$$P_0 = \text{amplitudo gaya pegeksitasi}$$

$$kz = \text{gaya pegas}$$

$$C \dot{z} = \text{gaya redaman}$$

$$m \ddot{z} = \text{gaya inersia}$$

di bawah gaya pegeksitasi dalam keadaan tetap, sistem cenderung untuk bergetar pada frekuensi  $\omega_m$ .

Maka solusi dari persamaan 3.1 ini adalah :

$$z = a d \sin (\omega_m t + \alpha) \quad (3.2)$$

dimana :

$ad$  = amplitudo

$\alpha$  = beda fasa antara gaya pegeksitasi dan *displacement*

Substitusikan persamaan 3.2 ke dalam persamaan 3.1, akan didapat :

$$ad = \frac{P_0}{\sqrt{(k - m \omega_m^2)^2 + C^2 \omega_m^2}} \quad (3.3)$$

$$\tan \alpha = \frac{C \omega_m}{K - m \omega_m^2} \quad (3.3a)$$

Substitusikan :

$$\omega_n^2 = k/m, \xi = \frac{C}{(2 \sqrt{km})}, \eta = \omega_m / \omega_n$$

Persamaan 3.3 dan 3.3a dapat ditulis :

$$ad = \frac{P_0}{K \sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2 \eta \xi)^2}} \quad (3.4)$$

$$\tan \alpha = \frac{2 \eta \xi}{1 - \eta^2} \quad (3.4a)$$

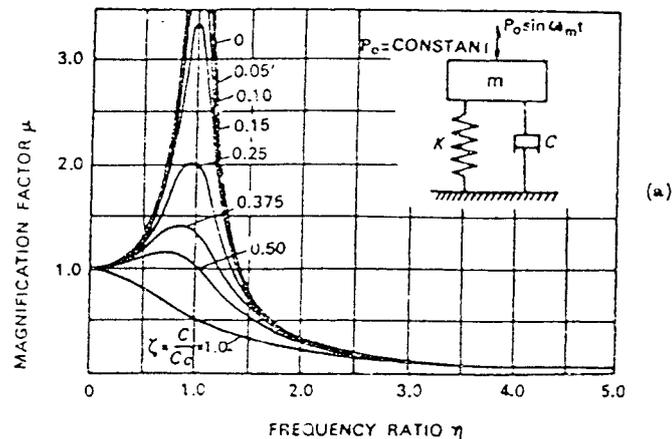
Substitusikan  $P/K = Z_{st}$  (pergeseran statis), maka persamaan 3.4 dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$Z = Z_{st} \mu \quad (3.5)$$

dimana

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2 \eta \xi)^2}} \quad (3.5a)$$

Disini,  $\mu$  adalah faktor pembesaran dinamis. Dalam grafik 3.1 ditunjukkan variasi nilai  $\mu$  dengan  $\eta$  untuk beragam nilai  $\xi$ .



Grafik 3.1: Respon SDOF dibawah Gaya Pengeksitasi Konstan  
(Srinivasulu, 1976)

b. Tipe Pengeksitasi Masa Berputar

Persamaan gerakan dari tipe ini adalah (Srinivasulu, 1976) :

$$m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = (m_e e \omega_m^2) \sin \omega_m t \quad (3.6)$$

dimana :

- $P_o (= m_e e \omega_m^2)$  = gaya pengeksitasi
- $m_e$  = rotasi massa torak atau tidak seimbang
- $e$  = *displacement* pada kasus torak, sedangkan dalam kasus masa tidak seimbang sebagai eksentrisitas
- $\omega_m$  = frekuensi gerakan

Substitusikan  $P_o = m_e e \omega_m^2$  kedalam persamaan 3.3, solusinya menjadi :

$$ad = \frac{m_e e \omega_m^2}{\sqrt{(k - m \omega_m^2)^2 + C^2 \omega_m^2}} \quad (3.7)$$

substitusikan :

$$\omega_n^2 = k/m, \quad \xi = \frac{C}{(2 \sqrt{km})}, \quad \eta = \omega_m / \omega_n$$

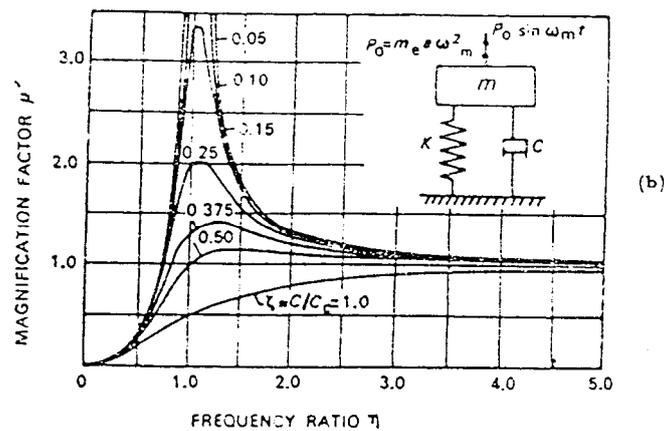
maka persamaan 3.7 menjadi :

$$\frac{ad}{m_e e/m} = \eta^2 \frac{1}{\sqrt{(k - m\omega_m^2)^2 + (2\eta\xi)^2}} \quad (3.8)$$

atau

$$\mu' = \eta^2 \mu \quad (3.9)$$

dimana  $\mu'$  faktor pembesaran, dan berikut adalah grafik (3.2) yang menunjukkan variasi nilai  $\mu'$  dengan  $\eta$  untuk beragam nilai  $\xi$ .



Grafik 3.2 : Respon SDOF dibawah Gaya Pengeksitasi Masa Berputar  
(Srinivasulu, 1976)

jika redaman dalam sistem diatas diabaikan, yaitu  $C = 0$  atau  $\xi = 0$ , maka

- untuk gaya pengeksitasi konstan 
$$\mu = \frac{1}{1 - \eta^2} \quad (3.10)$$

- untuk tipe pengeksitasi masa berputar 
$$\mu' = \frac{\eta^2}{1 - \eta^2} \quad (3.11)$$

Bila  $\eta = 1$ , maka  $\mu$  dan  $\mu'$  menjadi tak terbatas. Ini pertanda dalam keadaan resonansi. Dalam prakteknya, amplitudo pada resonansi akan terbatas karena redaman yang *inheren* disetiap sistem alam.

Oleh karena itu untuk meyakinkan dalam desain struktur yang mempunyai beban dinamis nilai rasio frekuensi  $\eta$  tidak sama dengan satu. Adapun *range* untuk nilai rasio frekuensi  $\eta$  adalah  $1,4 < \eta < 0,5$ . Dalam tabel 3.1 disajikan hubungan untuk getaran paksa teredam dibawah aksi gaya pegeksitasi konstan dan masa berputar.

Tabel 3.1  
Hubungan Untuk Sistem Kebebasan Berderajat Tunggal  
(Srinivasulu, 1976)

	Gaya Pengeksitasi Konstan ( $P_o = \text{Konstan}$ )	Pengeksitasi Tipe Rotasi ( $P_o = m_e e \omega_m^2$ )
Frekuensi Resonansi	$f_n \sqrt{1 - 2 \zeta^2}$	$f_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \zeta^2}}$
Amplitudo di frekuensi $f$	$\frac{P_o}{K} \left[ \frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + (2 \eta \zeta)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\frac{m_e \ell}{m} \eta^2 \left[ \frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + (2 \eta \zeta)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$
Amplitudo Maksimum Getaran	$\frac{P_o}{K} \frac{1}{2 \zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}$	$\frac{m_e \ell}{m} \frac{1}{2 \zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}$
dimana : Frekuensi alam tak teredam	$f_n = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$	
Rasio redaman	$\zeta = C / C_c$	
Redaman kritis	$C_c = 2 \sqrt{Km}$	

Teori sistem kebebasan berderajat tunggal dibawah getaran paksa digunakan didalam analisis pondasi blok untuk mesin tipe *reciprocating* atau rotari.

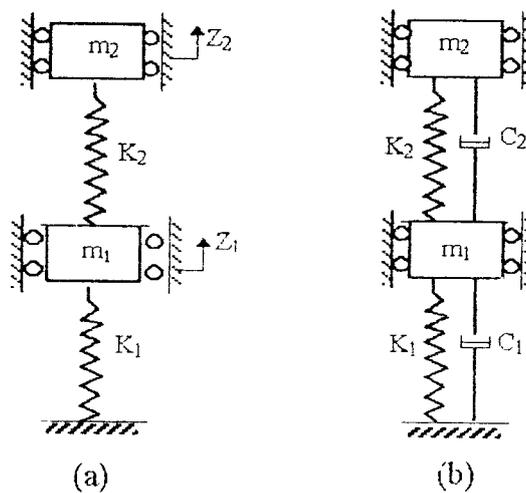
### 3.3 Teori Sistem Kebebasan Berderajat Dua

Secara matematis teori ini dapat digunakan dalam menganalisis pondasi blok dengan tumpuan pada absorbers untuk mesin *reciprocating* vertikal yaitu :

#### a. Kasus Tak Teredam

##### i. Gaya pengeksitasi beraksi hanya pada $m_2$

Dalam gambar 3.2 ditunjukkan sistem kebebasan berderajat dua. Masa  $m_2$  dikenai gaya osilasi  $P_o \sin \omega_m t$ , dimana  $P_o$  adalah gaya puncak dan  $\omega_m$  adalah frekuensi operasional.



Gambar 3.2 : Sistem Kebebasan Berderajat Dua

(a) Tanpa Redaman, (b) Dengan Redaman (Srinivassulu, 1976).

Persamaan differensial gerakan untuk gaya osilasi pada sistem ini dirumuskan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976) :

$$m_1 \ddot{z}_1 + K_1 z_1 + K_2 (z_1 - z_2) = 0 \quad (3.12)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + K_2 (z_2 - z_1) = P_o \sin \omega_m t \quad (3.13)$$

Solusinya, amplitudo  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  dari dua masa  $m_1$  dan  $m_2$  ditentukan dari :

$$\alpha_1 = \frac{\bar{\omega}_{n2}^{-2}}{m_1 f(\omega_m^2)} P_o \quad (3.14)$$

$$\alpha_2 = \frac{\left[ (1 + \alpha) \bar{\omega}_{n1}^{-2} + \alpha \bar{\omega}_{n2}^{-2} - \omega_m^2 \right]}{m_2 f(\omega_m)} P_o \quad (3.15)$$

dimana :

$$\bar{\omega}_{n2}^{-2} = \frac{K_2}{m_2}, \quad \bar{\omega}_{n1}^{-2} = \frac{K_1}{m_1 + m_2}, \quad \alpha = \frac{m_2}{m_1}$$

dan

$$f(\omega_m^2) = \omega_m^2 - (1 + \alpha) \left( \bar{\omega}_{n1}^{-2} + \bar{\omega}_{n2}^{-2} \right) \omega_m^2 + (1 + \alpha) \bar{\omega}_{n1}^{-2} \bar{\omega}_{n2}^{-2} \quad (3.16)$$

ii. Gaya pegeksitasi hanya pada  $m_1$

Merujuk pada gambar 3.2, sekarang gaya osilasi  $P_o \sin \omega_m t$  beraksi hanya pada  $m_1$ . Persamaan gerakan pada sistem ini adalah (Srinivasulu, 1976) :

$$m_1 \ddot{z}_1 + K_1 z_1 + K_2 (z_1 - z_2) = P_o \sin \omega_m t \quad (3.17)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + K_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad (3.18)$$

Solusi untuk amplitudo ditentukan dari persamaan :

$$\alpha_1 = \frac{P_o}{m_1 f(\omega_m^2)} \left( \bar{\omega}_{n2}^{-2} - \omega_m^2 \right) \quad (3.19)$$

$$\alpha_2 = \frac{P_o}{m_1 f(\omega_m^2)} \left( \bar{\omega}_{n2}^{-2} \right) \quad (3.20)$$

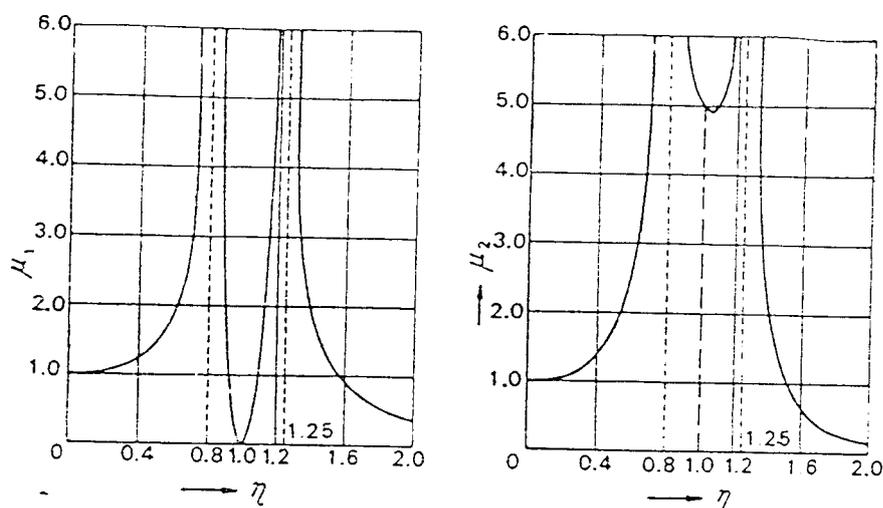
Persamaan 3.19 dan 3.20 dapat dirumuskan untuk faktor dinamis  $\mu_1$  dan  $\mu_2$  sebagai berikut, bila  $\frac{K_2}{m_2} = \frac{K_1}{m_1}$  :

$$\mu_1 = \frac{1 - \eta^2}{(1 - \eta^2)(1 + \alpha - \eta^2) - \alpha} \quad (3.21)$$

dan

$$\mu_2 = \frac{1}{(1 - \eta^2)(1 + \alpha - \eta^2) - \alpha} \quad (3.22)$$

Dalam grafik 3.3 ditunjukkan variasi nilai  $\mu_1$  dan  $\mu_2$  (yang diberikan oleh persamaan 3.21 dan 3.22) dengan  $\eta$  untuk kasus bila  $\alpha = 0,2$ .



Grafik 3.3 : Kurva Respon untuk Sistem Kebebasan Berderajat Dua  
(Srinivasulu, 1976).

Dari grafik 3.3 dapat diperoleh, bila nilai  $m_2$  dan  $k_2$  seperti  $\sqrt{\frac{K_2}{m_2}}$  sama

dengan frekuensi ( $\omega_m$ ) gaya pengeksitasi yang beraksi pada masa  $m_1$ , maka amplitudo masa  $m_1$  sama dengan nol. Bila  $\bar{\omega}_{n2} = \omega_m$ ,  $a_1 = 0$ , maka amplitudo masa  $m_2$  diperoleh dari persamaan 3.20 sebagai berikut :

$$a_2 = \left| \frac{P_0}{K_2} \right| \quad (3.23)$$

Amplitudo masa  $m_2$  akan sama dengan *displacement* statis (*displacement*  $m_2$  dibawah pengaruh statis dari  $P_0$ ).

b. Kasus Tereadam

i. Bila gaya harmonis  $P_o \sin \omega_m t$  beraksi pada  $m_1$

Persamaan gerakan untuk sistem ini adalah sebagai berikut (Srinivasulu, 1976) :

$$m_1 \ddot{z}_1 + C_1 \dot{z}_1 + K_1 z_1 + K_2 (z_1 - z_2) + C_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) = P_o \sin \omega_m t \quad (3.24)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + C_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad (3.25)$$

dimana :

$$z_1 = a_1 e^{i\omega_m t} \quad (3.26)$$

$$z_2 = a_2 e^{i\omega_m t} \quad (3.27)$$

Dari substitusi persamaan 3.24 dan 3.25, berikut hubungan yang diperoleh untuk nilai  $a_1$  dan  $a_2$ .

$$a_1 = \frac{P_o}{m_1} \left[ \frac{\left( \bar{\omega}_{n2}^2 - \omega_m^2 \right) + 2i\xi_2 \bar{\omega}_{n2} \omega_m}{F(\omega_m^2) + 2i\omega_n \left\{ \begin{array}{l} \xi_1 \bar{\omega}_{n1} \left( \bar{\omega}_{n2}^2 - \omega_m^2 \right) \\ \sqrt{1+\alpha} + \xi_2 \bar{\omega}_{n2} \left( \bar{\omega}_{n1}^2 - \omega_m^2 \right) (1+\alpha) \end{array} \right\}} \right] \quad (3.28)$$

dan

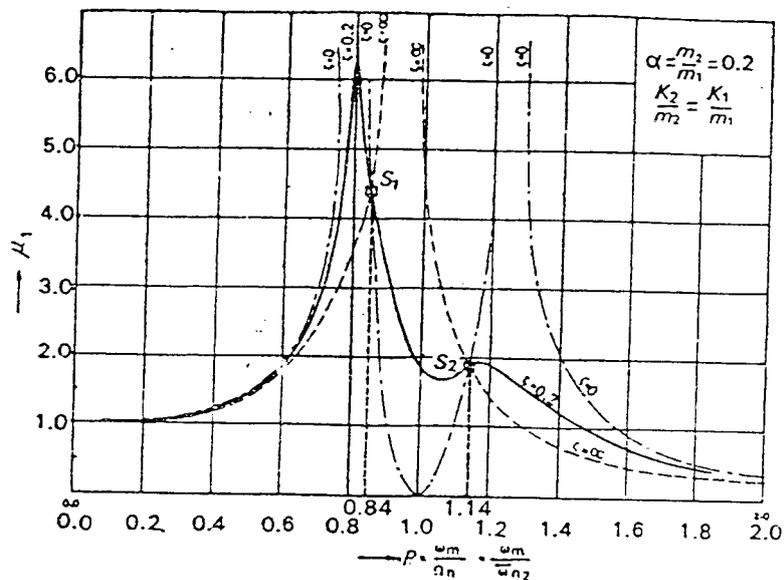
$$a_2 = \frac{a_1 (K_2 + C_2 i\omega)}{K_2 - m_2 \omega^2 + C_2 i\omega} \quad (3.29)$$

untuk

$$F(\omega_m^2) = \omega_m^4 - \omega_m^2 (1+\alpha) \left( \bar{\omega}_{n1}^2 + \bar{\omega}_{n2}^2 + 4\xi_1 \xi_2 \bar{\omega}_{n1} \bar{\omega}_{n2} \right) \left( \sqrt{1+\alpha} + \bar{\omega}_{n1} \bar{\omega}_{n2} (1+\alpha) \right) \quad (3.30)$$

Pada grafik 3.4 ditunjukkan variasi nilai  $\mu_1$  dengan  $\eta$  untuk bermacam nilai redaman

( $\xi$ ), bila kasus yang terjadi  $\frac{K_2}{m_2} = \frac{K_1}{m_1}$ .



Grafik 3.4 : Respon Masa  $m_1$  untuk Berbagai Rasio Redaman ( $\xi$ )  
(Srinivasulu, 1976).

Dari grafik 3.4 diketahui bahwa semua kurva respon melewati dua titik tetap  $S_1$  dan  $S_2$ , yang absisnya diperoleh sebagai akar persamaan berikut :

$$\eta^4 - 2\eta^2 \left( \frac{1 + \beta^2 + \alpha\beta^2}{2 + \alpha} \right) + \frac{2\beta^2}{2 + \alpha} = 0 \quad (3.31)$$

dimana :  $\beta = \eta_1 / \eta_2$ , dengan  $\alpha = 0,2$

### 3.4 Teori Getaran pada Pondasi Mesin

#### a. Getaran Vertikal Pondasi

Barkan (1962) dalam teorinya, berasumsi bahwa ada hubungan yang linier antara reaksi tanah dan *displacement* dari pondasi yang bergetar, kemudian hubungan ini ditentukan dalam batas koefisien elastis tekanan seragam dan tidak seragam, dan juga koefisien elastis geser seragam dan tidak seragam.

Pondasi dipertimbangkan mempunyai properti inersia, dan tanah diperhitungkan mempunyai properti elastis. Asumsi diatas, untuk menganalisa getaran pondasi sebagai *solid body* yang bertumpu pada pegas tak berbobot (*weightless spring*).

#### i. Getaran Vertikal Pondasi dengan Mengabaikan Efek Redaman dari Reaksi Tanah

Untuk getaran pondasi yang disebabkan oleh gaya pengeksitasi vertikal  $P(t)$ , diasumsikan bahwa pusat masa pondasi dan mesin serta titik pusat luas alas pondasi yang kontak dengan tanah terletak pada garis vertikal yang sama dan bersamaan arah dengan aksi gaya pengeksitasi  $P(t)$ . Dalam kasus diatas, pondasi hanya mengalami getaran vertikal, dan pondasi yang diasumsikan sebagai *solid body*, *displacement*nya ditentukan oleh *displacement* pusat gravitasinya (gambar 3.3).

Jika *displacement* pusat gravitasi pondasi sama dengan  $z$ , maka reaksi pegas (mewakili tanah) menjadi (Barkan, 1962) :

$$R = W + C_r Z \quad (3.32)$$

dimana :  $W$  = berat pondasi dan mesin

$$C_r = \text{koefisien kekakuan aias} \quad C_r = C_u A \quad (3.33)$$

$C_u$  = koefisien elastis tekanan seragam tanah

$A$  = luas kontak pondasi horisontal dengan tanah

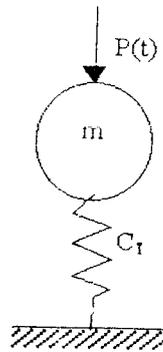
Dan persamaan yang terjadi untuk getaran pondasi vertikal adalah :

$$- m\ddot{z} + W + P(t) - R = 0 \quad (3.34)$$

atau, menggunakan persamaan 3.1, akan menjadi :

$$m\ddot{z} + c_r z = P(t) \quad (3.35)$$

dimana  $m$  = masa pondasi dan mesin :  $m = W/g$ , dan  $g$  = akselerasi gravitasi.



Gambar 3.3 Getaran pada Sebuah Titik Pusat Masa yang Bertumpu pada Pegas (Barkan, 1962).

Persamaan 3.35 dibagi dengan masa  $m$ , hasilnya sebagai berikut :

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = p(t) \quad (3.36)$$

dimana :

$$f_{nz}^2 = \frac{c_T}{m} = \frac{c_u A}{m} \quad (3.37)$$

$$p(t) = \frac{P(t)}{m}$$

Persamaan 3.36 diatas, menggambarkan getaran vertikal pondasi dibawah aksi gaya pengeksitasi.

Sedangkan untuk getaran paksa vertikal pondasi, gaya pengeksitasi  $P(t)$  merupakan fungsi waktu yang harmonis, yang mana  $P(t) = p \sin \omega t$ . Maka persamaan untuk getaran vertikal pondasi adalah :

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = p \sin \omega t \quad (3.38)$$

Untuk mennyelesaikan persamaan 3.38, dihubungkan ke getaran dalam keadaan tenang, yaitu seperti berikut :  $z = A_z \sin \omega t$  (3.39)

Dari persamaan 3.39, dapat diperoleh rumus untuk amplitudo  $A_z$  getaran paksa dengan mensubstitusikan persamaan 3.39 kedalam persamaan 3.38, yaitu :

$$A_z = \frac{P}{m (f_{nz}^2 - \omega^2)} \quad (3.40)$$

Dari persamaan 3.39 menunjukkan bahwa frekuensi getaran paksa adalah sama terhadap frekuensi gaya pengeksitasi. Maka, frekuensi getaran paksa tidak tergantung pada properti elastis dan properti inersia pondasi serta alasnya. Juga amplitudo getaran paksa tergantung pada masa pondasi dan perbedaan antara frekuensi bebas dan getaran paksa, yang mana untuk mengetahui pengaruhnya pada pondasi, rumus 3.40 ditransformasikan kedalam :

$$A_z = \frac{P}{m f_{nz}^2} \frac{1}{1 - \omega^2 / f_{nz}^2} \quad (3.41)$$

dimana :  $\frac{P}{m f_{nz}^2} = A_{zT}$

yang mana  $A_{zT}$  adalah *displacement* pondasi dibawah aksi gaya  $P$  jika kemudian diaplikasikan secara statis, rumus 3.41 dapat ditulis sebagai berikut :

$$A_z = \eta A_{zT} \quad (3.42)$$

dimana  $\eta$  adalah modulus dinamik (*magnification factor*)

$$\eta = \frac{1}{1 - \xi^2} \quad (3.43)$$

dan  $\xi = \omega/f_{nz}$  adalah rasio frekuensi

Nilai modulus dinamik tergantung pada hubungan antara frekuensi gaya pengeksitasi dan frekuensi alam pondasi. Dengan meningkatnya frekuensi gaya pengeksitasi, nilai  $\xi$  meningkat, dan nilai modulus dinamik berkurang. Bila  $\xi = 1$ , yaitu jika frekuensi gaya pengeksitasi sama dengan frekuensi alam pondasi, amplitudo getaran pondasi akan menjadi tak terbatas, dan ini bersesuaian ke resonansi.

Untuk pondasi dibawah mesin *reciprocating* biasanya frekuensi alam pondasi didesain lebih tinggi daripada frekuensi operasional mesin yaitu  $\xi < 1$ . Jika masa pondasi ditingkatkan tanpa merubah bentuk pondasi, maka frekuensi alam getaran berkurang dan nilai  $\xi$  meningkat. Dan bila tinggi pondasi ditambah akan meningkatkan amplitudo getaran paksa. Untuk alasan inilah maka pondasi untuk mesin torak didesain dengan alas yang besar dan tinggi yang minimum.

## ii. Efek Inersia Tanah pada Getaran Paksa Vertikal Pondasi

Berdasarkan teori sebelumnya (Barkan, 1962), pondasi diasumsikan bertumpu pada pegas tak berbobot (mewakili reaksi tanah) dengan karakteristik koefisien  $C_U$ . Dan untuk menganalisis getaran paksa vertikal yang disebabkan oleh gaya  $P \sin \omega t$  persamaannya adalah :

$$m\ddot{z} + R \exp(i\omega t) = P \exp[i(\omega t + \varepsilon)] \quad (3.44)$$

dimana :

$R$  = besarnya reaksi tanah yang melawan tanah

$\varepsilon$  = *phase shift* antara gaya pengeksitasi dan reaksi tanah

Untuk menyelesaikan persamaan 3.44 perlu untuk menentukan ketergantungan nilai  $R$  pada *displacement*, karakteristik pondasi dan properti tanah. O. Ya. Shekhter (1948) memberikan solusi untuk perhitungan  $R$ , sebagai rata-rata *arithmetic* antara besarnya penurunan dibawah pusat daerah fleksibel lingkaran dan dibawah ujungnya. Hubungan yang terjadi antara  $R$  dan  $z$  disajikan dalam bentuk persamaan (3.45) :

$$z = -\frac{R}{r_0 G} (f_1 + i f_2) \exp(i \omega t) \quad (3.45)$$

dimana :

$G$  = modulus elastisitas geser tanah

$r_0$  = radius lingkaran =  $\sqrt{A/\pi}$

$A$  = luas kontak antara pondasi dan tanah

$f_1, f_2$  = fungsi yang tergantung pada rasio antara  $r_0$  dan panjang geser gelombang yang disebarkan oleh pondasi dibawah mesin, dan juga tergantung pada rasio poisson tanah

Dari hasil substitusi nilai  $z$  persamaan 3.45 kedalam persamaan 3.44 akan diperoleh persamaan yang hasilnya berupa nilai  $R$  dan  $\epsilon$  yaitu :

$$\tan \epsilon = \frac{\left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_2}{1 + \left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_1} \quad (3.46)$$

$$R = \frac{P}{\sqrt{\left[ 1 + \left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_1 \right]^2 + \left[ \left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_2 \right]^2}} \quad (3.47)$$

Kemudian nilai  $R$  disubstitusikan kedalam persamaan 3.45, maka akan didapat rumus untuk amplitudo ( $a$ ) getaran paksa pondasi :

$$a = \frac{P}{Gr_0} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{\left[ 1 + \left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_1 \right]^2 + \left[ \left( \frac{m \omega^2}{Gr_0} \right) f_2 \right]^2}} \quad (3.48)$$

Sedangkan rumus untuk amplitudo getaran dibawah keadaan resonansi  $a_r$  adalah :

$$a_r = \frac{k\pi^{\frac{1}{2}}}{GA^{\frac{1}{2}}} + \frac{l\pi^2}{G\gamma} \frac{p_{st}}{\sqrt{A}} \quad (3.49)$$

dimana  $\gamma$  = satuan berat tanah, dan  $p_{st}$  = tekanan statis normal

Dari rumus 3.49, terlihat bahwa karakteristik inersia tanah efeknya kecil pada amplitudo dibawah kondisi resonansi. Juga menunjukkan resonansi amplitudo bertambah dengan meningkatnya tekanan normal statis pada alas pondasi dan berkurang dengan meningkatnya luas kontak pondasi. Kemudian dibawah kondisi yang sama, redaman getaran pondasi oleh tanah berkurang dengan meningkatnya tekanan statis dibawah pondasi. Dengan bertambahnya luas kontak pondasi, resonansi amplitudo berkurang, dan redaman bertambah. Konsekuensinya, redaman properti tanah tidak hanya tergantung pada properti psikomekanikalnya, tetapi juga pada bentuk dan masa pondasi.

#### b. Getaran *Rocking* Pondasi

Getaran pondasi selama aksi momen *rocking* eksternal berubah menurut waktu terhadap fungsi  $M \sin \omega t$  dan terletak pada salah satu bidang pokok pondasi. Asumsinya adalah bahwa pusat inersia masa pondasi dan titik pusat daerah alas horisontalnya terletak pada garis vertikal yang terletak dalam bidang momen *rocking* (Barkan, 1962).

Gerakan yang disebabkan oleh momen eksternal  $M \sin \omega t$  akan berputar mengelilingi sumbu, terus melewati titik pusat daerah pondasi yang kontak dengan tanah, tegak lurus terhadap bidang getaran. Persamaan untuk gerakan ini adalah :

$$- W_o \varphi + \sum M_i = 0 \quad (3.50)$$

dimana :

$W_o$  = momen inersia pondasi dan mesin dengan respek ke sumbu rotasi

$\varphi$  = sudut rotasi pondasi

$\sum M_i$  = jumlah momen eksternal dengan respek ke sumbu yang sama

Dan persamaan untuk getaran paksa pondasinya adalah :

$$-W_0 \ddot{\varphi} + WL \varphi - c_\varphi I \dot{\varphi} + M \sin \omega t \quad (3.51)$$

Sedangkan frekuensi alam getaran *rocking* pondasinya adalah :

$$f_{n\varphi} = \frac{c_\varphi I - WL}{W_0} \quad (3.52)$$

Amplitudo getaran pondasinya dirumuskan sebagai berikut :

$$A_\varphi = \frac{M}{W_0 (f_{n\varphi}^2 - \omega^2)} \quad (3.53)$$

### c. Getaran Geser

Jika resistensi tanah terhadap tekanan lebih besar dibandingkan dengan resistensi geser, maka *displacemement* pondasi dibawah aksi gaya horisontal akan terjadi terutama dalam arah aksi gaya pengeksitasi horisontal. Dan persamaan untuk getaran paksa horisontalnya adalah (Barkan, 1962) :

$$\ddot{x} + f_{nx}^2 x = p_T \sin \omega t \quad (3.54)$$

dimana  $x$  adalah *displacement* horisontal pusat gravitasi pondasi, dan frekuensi alam getaran gesernya yaitu :

$$f_{nx}^2 = \frac{c_T A}{m} \quad (3.55)$$

dan amplitudonya

$$a_x = \frac{p_T}{m (f_{nx}^2 - \omega^2)} \quad (3.56)$$

### d. Getaran Pondasi Yang Diakibatkan Oleh Rotasi, *Sliding*, dan *Displacement* Vertikal

Di bawah aksi beban  $P(t)$  dan  $M(t)$ , pondasi akan mengalami gerakan dua dimensional yang ditentukan oleh tiga nilai parameter bebas; proyeksi  $x$  dan  $z$  dari *displacement* titik pusat gravitasi pondasi pada sumbu koordinat dan sudut rotasi  $\varphi$

pondasi dengan respek ke sumbu  $y$  yang melewati titik pusat gravitasi pondasi dan mesin, tegak lurus terhadap bidang getaran.

Dengan proyeksi semua gaya beraksi pada pondasi di waktu  $t$  pada sumbu  $x$  dan  $z$  serta gaya inersia pada sumbu yang sama, maka :

$$\begin{aligned} -m\ddot{x} + \sum X_i \\ -m\ddot{z} + \sum Z_i \end{aligned} \quad (3.57)$$

dimana :

$m$  = masa pondasi

$X_i, Z_i$  = proyeksi pada sumbu  $x, z$  dari semua gaya eksternal yang beraksi pada pondasi

Persamaan momen dengan respek ke sumbu  $y$  juga ditambahkan dalam pers. 3.57

$$-M_m \ddot{\psi} + \sum M_i = 0 \quad (3.58)$$

Berikut gaya yang beraksi pada pondasi di waktu  $t$  :

i. Berat  $W$  pondasi dan mesin.

Proyeksi gaya  $W$  pada sumbu  $x$  sama dengan nol, maka pada sumbu  $z$

$$Z_1 = -W$$

ii. Reaksi tanah yang disebabkan oleh penurunan pondasi dibawah aksi berat.

Proyeksi gaya  $W$  pada sumbu  $x$  sama dengan nol, maka pada sumbu  $z$

$$Z_2 = C_u A Z_{st}$$

dimana :

$C_u$  = koefisien elastis tekanan seragam tanah

$A$  = area pondasi yang kontak dengan tanah

$Z_{st}$  = penurunan elastis yang disebabkan oleh aksi berat pondasi dan mesin



Dan momen yang dihasilkan dengan respect ke sumbu  $y$  adalah :

$$M_1 = WL\phi$$

dimana  $L$  adalah jarak dari pusat gravitasi masa ke alas pondasi

iii. Reaksi elastis resistensi tanah horisontal

Proyeksinya pada sumbu  $x$  adalah :  $X_i = - C_\tau A X_0$

dimana :

$C_\tau$  = koefisien elastis geser seragam tanah

$X_0$  = *displacement* titik pusat *area* kontak pondasi

$$X_0 = X - L\phi$$

dimana  $X$  adalah *displacement* horisontal titik pusat gravitasi pondasi dan mesin

Momen gaya ini dengan respect ke sumbu  $y$  adalah

$$M_2 = C_\tau AL (X - L\phi)$$

iv. Resistensi tanah reaktif yang disebabkan oleh rotasi *area* alas pondasi

Reaksi  $dR$  tanah pada elemen ini adalah

$$dR = C_\phi L\phi dA$$

dimana :

$C_\phi$  = koefisien elastis tekanan tanah tidak seragam

$L$  = jarak antara *area* elemen  $dA$  dan sumbu rotasi

Momen yang terjadi pada gaya ini adalah :  $M_3 = - C_\phi I_\phi$

dimana  $I_\phi$  adalah momen inersia pondasi

Dari keempat gaya diatas dan persamaan 3.57 dan 3.58, didapat persamaan getaran paksa pondasi, yaitu :

$$m\ddot{z} + c_u \dot{z} = P_z (t) \quad (3.59)$$

$$m\ddot{x} + c_T Ax - c_T AL\varphi = P_X(t)$$

$$Mm\ddot{\varphi} - c_T ALx + (c_\varphi I - WL + c_T AL^2)\varphi = M(t) \quad (3.60)$$

### 3.5 Parameter Geoteknis

Pondasi yang dikenai beban dinamis, pada waktu getarannya menimbulkan tegangan pada tanah pendukungnya, yang mana dalam gerakannya menghendaki elemen pondasi (*footing, piles*) untuk berdeformasi secara kompatibel dengan deformasi tanah. Karenanya perlu untuk mengadopsi model yang dapat memperkirakan respon dari tanah terhadap beban dinamis yang diimbulkan, termasuk efek deformasi pondasi dalam analisis struktur keseluruhan (Arya, 1979).

Salah satu pemodelan tanah yang mendukung pondasi, dalam analisis getarannya adalah dianggap sebagai pegas tanah. Dalam mengevaluasi konstanta pegas  $k_z$ ,  $k_x$ ,  $k_\theta$ , dan  $k_\psi$  serta rasio redaman yang dibutuhkan dalam analisa dinamis interaksi tanah-struktur, perlu untuk menentukan nilai yang relevan untuk parameter tanahnya yaitu modulus geser  $G'$ , rasio poisson  $\nu$ , material rasio redaman  $\beta$ , dan densitas masa  $\rho$ .

#### a. Modulus Geser $G'$

Modulus geser  $G'$  yang didefinisikan sebagai perbandingan tegangan geser terhadap regangan geser umumnya dipakai pada masalah getaran untuk memperkirakan amplitudo perpindahan dan frekuensi pondasi, dan pondasi mesin yang memuaskannya adalah bila tegangan geser yang terjadi kecil pada sekitar tanah, dengan cirinya 10-50 microstrain ( $\mu\varepsilon$ ), yaitu dua derajat besarnya lebih kecil daripada yang ditimbulkan oleh beban statis (Bowles, 1988).

Modulus geser bisa diperkirakan dengan pengujian resonan-kolom, yang mana perlu membuat sel-sel triaksial khusus untuk menghasilkan getaran beramplitudo sangat kecil terhadap tanah percobaan. Dan nilai modulus geser dinamis  $G'$  bisa dihitung dengan menggunakan persamaan empiris yang disajikan oleh Hardin dan Black (1968) sebagai berikut :

$$G' = \frac{6900 (2,17 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{0,5} \quad \text{kPa} \quad (3.61)$$

untuk pasir berbutir bundar  $e < 0,80$

Untuk bahan-bahan butiran sudut dengan  $e > 0,6$  dan lempung dengan aktivitas sedang maka perkiraan  $G'$  adalah

$$G' = \frac{3230 (2,97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{0,5} \quad \text{kPa} \quad (3.62)$$

Hardin dan Drnevich (1972) memasukkan perbandingan konsolidasi lebih ( $OCR$ ) kedalam persamaan 3.62 untuk mendapatkan

$$G' = \frac{3230 (2,97 - e)^2}{1 + e} OCR^M \sigma_0^{0,5} \quad \text{kPa} \quad (3.63)$$

dimana  $e$  = perbandingan ruang kosong (*in situ* atau contoh pengujian)

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \text{tegangan efektif utama rata-rata}$$

*in situ* gunakan  $\sigma_1 (1 + 2K_0) / 3$ , kPa

Nilai-nilai  $M$  dalam persamaan 3.63 tergantung dari perbandingan konsolidasi lebih ( $OCR$ ) dan indeks plastisitas tanah berikut ini :

$I_p, \%$	0	20	40	60	80 %
$M$	0	0,18	0,30	0,41	0,48

Anderson dan kawan-kawan (1978) menunjukkan bahwa persamaan-persamaan ini memungkinkan untuk meramal nilai  $G'$  lebih rendah *in situ* (langsung ditempat) dengan faktor antara 1,3 sampai 2,5 karena tidak dimungkinkan adanya pembentukan semen (*cementation*) dan ketidakisotropian (*anisotropi*). Berikut nilai-nilai  $G'$  (tabel 3.2) yang didapat para peneliti sebagai suatu pedoman atau untuk perkiraan pendahuluan amplitudo getaran.

Untuk menentukan modulus geser dinamis  $G'$  langsung ditempat, pada masa tanah homogen dan elastis yang diberi tegangan dinamis pada satu titik dekat permukaan, akan terjadi tiga gelombang elastis yang merambat keluar dengan kecepatan yang berbeda-beda. Ketiga gelombang tersebut adalah; gelombang kompresi ( $P$ ), gelombang geser ( $S$ ) - umumnya gelombang interest, dan gelombang permukaan (Rayleigh).

Kecepatan gelombang kompresi dan geser berhubungan dengan konstanta elastis tanah menurut teori elastisitas sebagai berikut :

$$\text{Kompresi : } v_c = \sqrt{\frac{Es(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.64)$$

$$\text{Geser : } v_s = \sqrt{\frac{G'}{\rho}} \quad (3.65)$$

Tabel 3.2

Nilai-nilai representatif modulus geser  $G'$  (Bowles, 1988)

Bahan	ksi	MPa
Pasir kuarsa padat bersih	1,8-3	12-20
Pasir halus seperti mika	2,3	16
Pasir Berlin ( $e=0,53$ )	2,5-3,5	17-24
Pasir tanah liat	1,5	10
Pasir-kerikil padat	19*	70*
Lempung berlumpur lunak basah	1,3-2	9-15
Lempung berlumpur lunak kering	2,5-3	17-21
Lempung berlumpur kering	4-5	25-35
Lempung sedang	2-4	12-30
Lempung berpasir	2-4	12-30

Hubungan antara modulus geser  $G'$  dan modulus tegangan-regangan  $E_s$  adalah sama seperti pada nilai-nilai statis yaitu :  $E_s = 2(1+\mu)G'$

Dan perbandingan antara gelombang kompresi dan geser akan didapat :

$$\left(\frac{V_s}{V_c}\right)^2 = \frac{1-2\mu}{2(1+\mu)} \quad (3.66)$$

Dari persamaan terakhir ini, didapat nilai gelombang geser berkisar antara

$$0 \leq V_s \leq 0,707 V_c$$

Modulus geser juga bisa diperoleh dengan cara mencari ukuran-ukuran dilapangan kecepatan gelombang geser  $V_s$  dan dengan memakai persamaan 3.65

untuk mendapatkan nilai  $G'$  yaitu :  $G' = \rho V_s^2$

#### b. Rasio Poisson $\nu$

Rasio poisson  $\nu$  dipakai untuk mengkaji penurunan dan getaran yang terjadi pada pondasi. Hal ini ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuai lateral sebagai (Bowles, 1988):

$$\nu = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \quad (3.67)$$

Ada tiga nilai untuk tanah anisotropik dengan poros "1" yang pada gilirannya mengambil ketiga arah koordinat dan "3" poros yang tegak lurus terhadap masing-masing. Pada kebanyakan tanah, kondisi isotropik itu diasumsikan sehingga hanya ada satu nilai  $\nu$ .

Dari definisi  $\nu$  terbukti bahwa  $\nu$  itu dapat negatif kalau terdapat pengkerutan lateral. Bukti eksperimental menunjukkan bahwa  $\nu$  mungkin lebih besar dari 0,5 (yang menunjukkan pemuai volume yang besar – atau paling tidak, terdapat regang lateral yang besar – selama pergeseran).

Secara ketat,  $\nu > 0,5$  menunjukkan keadaan tanah yang plastis dimana teori elastisitas tidak dapat diterapkan; tetapi telah dicatat bahwa tanah itu bersifat elastis semu pada hampir seluruh rentang tegangan untuk hampir semua terapan perkerayaan. Nilai  $\nu$  yang khas diberikan dalam tabel 3.3 dibawah ini sebagai pedoman awal desain jika sukar menentukan dilapangan.

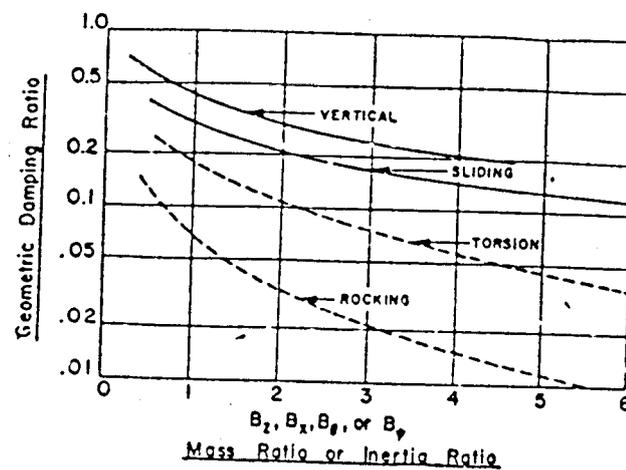
Tabel 3.3  
Jangkauan nilai banding Poison  $\nu$  (Bowles,1988)

Jenis Tanah	$\nu$
Lempung jenuh	0,4 - 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 - 0,3
Lempung berpasir	0,2 - 0,3
Lanau	0,3 - 0,35
Pasir (padat) pasir berkerikil	0,1 - 1,00
biasa dipakai	0,3 - 0,4
Batuan ( <i>rock</i> )	0,1 - 0,4
Tanah lus	0,1 - 0,4
Es	0,36
Beton	0,15

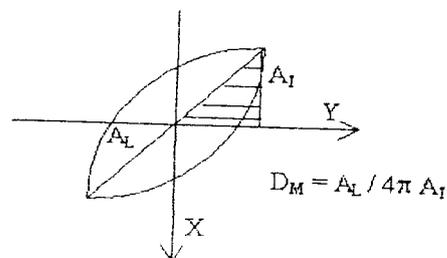
### c. Rasio Redaman

Redaman dalam sistem pondasi tanah terdiri atas komponen geometrik, yang diukur berdasarkan energi yang tersebar dari pondasi, dan material redaman dalam tanah, yang diukur dari energi hilang sebagai hasil efek *hysteresis* (Arya,1979). Rasio redaman geometrik berhubungan dengan masa atau rasio inersia yang ditunjukkan dalam empat mode gerakan *uncoupled* berikut (grafik 3.5).

Material redaman yang ditandai dalam gambar 3.4 adalah proporsional terhadap rasio  $A_L$ , luas *loop hysteresis* dalam geser sederhana (energi hilang), dan  $A_T$ , daerah *crosshatched* (energi masuk).



Grafik 3.5 : Rasio Redaman Geometrik (Arya, 1979)

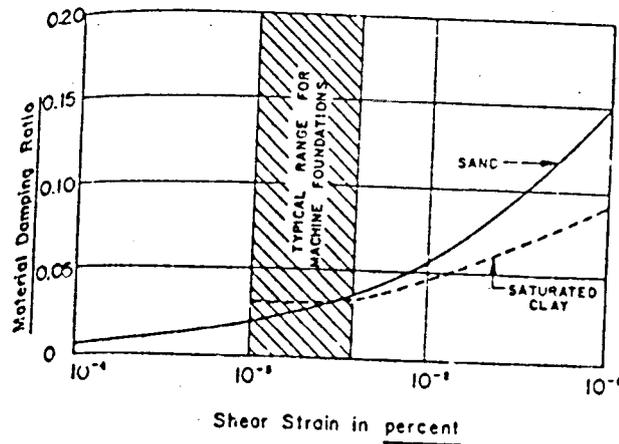


Gambar 3.4 : Definisi Material Redaman (Arya, 1979).

Rasio material redaman dapat diperoleh sebagai bagian test resonan kolom. Selama getaran, terjadi hubungan *displacement* – waktu yang berbentuk sinusoidal, tetapi dengan amplitudo yang berkurang seiring waktu. Jika kedua amplitudo suksesif adalah  $z_1$  dan  $z_2$ , maka:

$$D_m = (\ln [z_1 / z_2]) \left[ 4\pi^2 + (\ln [z_1 / z_2])^2 \right]^{-0.5} \quad (3.68)$$

Seed and Idriss (1970) menunjukkan bahwa material redaman dalam tanah adalah fungsi utama dari tegangan amplitudo dan tipe tanah, yang mana nilai karakteristik material redaman ditunjukkan dalam grafik 3.6.



Grafik 3.6 Rasio Material Redaman untuk *Sands* dan *Clays*  
(Arya, 1979).

Untuk memperoleh jumlah rasio redaman sistem pondasi tanah  $D_T$ , rasio geometris dan rasio material redaman langsung ditambahkan. Rasio material redaman digunakan untuk menganalisis respon pondasi dalam mode rotasi, dan rasio geometris untuk mode translasi. Pengecualian pada material redaman dari analisis akan menghasilkan amplitudo yang terlalu tinggi, sampai mendekati resonansi, dan frekuensi resonansi, dan untuk masa pengeksitasi rotasi sedikit rendah.

#### d. Densitas Masa $\rho$

Densitas masa dirumuskan sebagai berikut :  $\rho = \gamma/g$  (3.69)

dimana  $\gamma$  adalah berat tanah, dan  $g$  adalah akselerasi gravitasi

Nilai tipikal densitas masa berkisar antara  $1400 \text{ kg/m}^3$  untuk *loose*, pasir kering sampai  $2200 \text{ kg/m}^3$  untuk tanah keras, tanah jenuh air.

### e. Konstanta Pegas Tanah

Barkan (1962), menunjukkan bahwa parameter tanah yang digunakan untuk mengevaluasi kekakuan pegas tanah dalam berbagai getaran tak teredam adalah :

- i. koefisien elastis tekanan seragam ( $C_u$ ),

Koefisien elastis tekanan seragam ( $C_u$ ) didefinisikan sebagai rasio gaya kompresi yang diaplikasikan untuk pondasi blok kaku ke “elastis” sebagai akibat dari bagian penurunan. Berikut rumus yang diberikan untuk koefisien elastis tekanan seragam  $C_u$

$$C_u = 1,13 \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (3.70)$$

Persamaan 3.70 ditentukan dari teori elastisitas mengenai distribusi tegangan normal dalam tanah dibawah *area* kontak *rigid plate*, yang menghasilkan kesimpulan bahwa jika penurunan pondasi adalah seragam, maka tegangan dibawah alasnya tidak didistribusikan secara seragam. Berikut nilai  $C_u$  yang mewakili untuk desain awal jika tidak diketahui nilainya dilapangan (tabel 3.4).

- ii. koefisien elastis tekanan tidak seragam ( $C_\phi$ ),

Didefinisikan sebagai reaksi vertikal tanah normal di setiap titik dibawah alas bantalan plat kaku (alas pondasi) yang hanya tergantung pada penurunan titiknya dan menurut perimbangannya. Adapun rumusnya adalah :

$$C_\phi = \frac{k_\phi}{\sqrt{A}} \quad (3.71)$$

dimana :

$$k_\phi = \frac{2 \pi \alpha \sqrt{\alpha}}{2 \alpha^2 \ln \left[ \left( \frac{\sqrt{4 \alpha^2 + 1} + 1}{\sqrt{4 \alpha^2 - 1} - 1} \right) \right] + \sqrt{4 \alpha^2 + 1} - 1} \quad (3.72)$$

Dibawah ini adalah tabel yang mewakili nilai nilai  $C_p$  bila tidak diketahui dibarengan (tabel 3.5) atau dengan persamaan  $0,5 C_u$  (Srinivasulu, 1976) :

iii koefisien elastis geser seragam ( $C_g$ ),

Koefisien elastis geser seragam ( $C_g$ ) adalah rasio gaya kompresi geser rata-rata pada daerah kontak pondasi ke bagian 'elastis' dari gerakan geser (*sliding*) pondasi, karena *sliding* dari pondasi yang dikenai gaya pada prinsipnya tidak berbeda dengan pemuntiran. Dan secara matematis, rumus untuk  $C_g$  adalah :

$$C_g = \frac{e_1 C_u}{\sqrt{d}} \quad (3.73)$$

Adapun nilai  $C_g$  yang mewakili disajikan dalam tabel 3.6 atau dengan persamaan  $0,5 C_u$  (Srinivasulu, 1976).

iv koefisien elastis geser tidak seragam ( $C_p$ ),

Jika pondasi dikenai aksi momen dengan respect ke sumbu vertikal, maka pondasi akan berotasi mengelilingi sumbunya, dan alasnya akan mengalami *sliding* tidak seragam. Nilai dari  $C_p$  yang representatif di sajikan dalam tabel 3.6 berikut atau dengan persamaan  $0,75 C_u$  (Srinivasulu, 1976) .

Tabel 3.6 Nilai  $C_p$  dan nilai  $C_g$  untuk Tanah Berbeda dan Jarak Pondasi (Barkan, 1962)

Soil	$d$ (m)	$C_g$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_p$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_p / C_g$
clay plastic saturated	1,5	1,27	2,77	2,14
silty clay with some sand	1,0	1,04	2,33	2,22
sand	0,5	1,38	2,08	1,49
clay fine saturated	1,2	2,51	3,50	1,39
sand	1,0	2,20	2,85	1,29
clay fine saturated	0,8	3,10	2,40	1,16

Tabel 3.4  
 Nilai Rerata untuk Koefisien Elastis Tekanan Seragam ( $C_u$ )  
 (Barkan, 1962)

Description of soil	Tentative value of permissible load on soil, $\text{kg/cm}^2$	Coefficient of elastic uniform compression $C_u$ , $\text{kg/cm}^3$	Contact areas of foundation bases, $\text{m}^2$ ; types of test (D = dynamic; S = Static)
Gray plastic silty clay with sand and organic silt	1,0	1,4	1,5; 1,0; 0,5 (S; D)
Brown saturated silty clay with sand	1,5	2,0	8,0; 4,0; 2,0 (S; D)
Dense silty clay with some sand (above ground water level)	Up to 5	10,7	8,9 (D)
Medium moist sand	2	2,0	1,5 (D)
Dry sand with gravel	2	2,0	0,25 (D)
Fine saturated sand	2,5	3,0-3,5	11,6 (D)
Medium sand	2,5	3,1	8,75 (D)
Gray fine dense saturated sand	2,5	3,4	Up to 15 (S; D)
Loess with natural moisture content	3	4,5	0,81; 1,4; 2,0; 4,0 S; D)
Moist loessial soil	3	4,7	90 (a foundation for compressor), (D)

Tabel 3.5  
 Nilai Koefisien Elastis Tekanan Tidak Seragam untuk Tanah dan Pondasi yang Berbeda (Barkan, 1962)

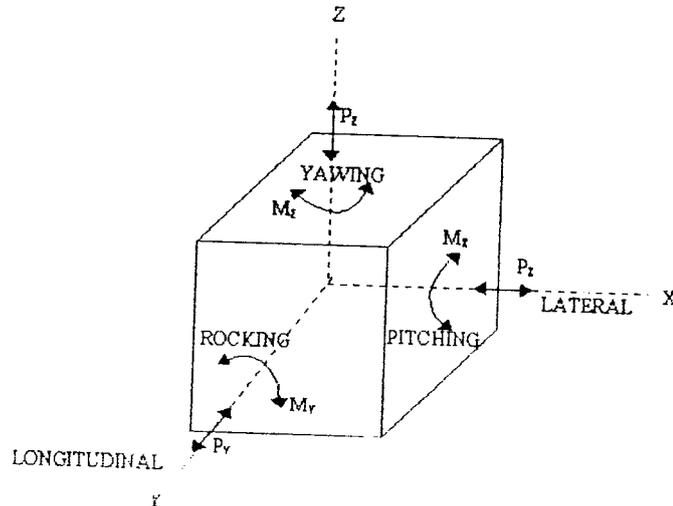
Description of soil	Base contact area of foundation, $\text{m}^2$	$C_u$ , $\text{kg/cm}^3$	$C_\phi$ , $\text{kg/cm}^3$	$C_\phi / C_u$
Saturated brown silty clays with some sand	2,0	4,40	12,0	2,73
	4,0	2,50	4,0	1,60
	8,0	2,05	3,0	1,46
Saturated gray soft silty clays with some sand	0,5	3,5	3,55	1,02
	1,0	2,52	3,61	1,44
	1,5	2,11	3,79	1,80
Loess at natural moisture content	0,81	14,2	25,0	1,76
	1,4	10,8	17,6	1,63
	2,0	10,2	15,5	1,51
	4,0	8,0	12,9	1,61
Saturated gray fine dense sands	4,0	7,5	14,5	1,92
	8,0	5,6	9,5	1,71
	15,0	4,0	9,2	2,30

## BAB IV

### ANALISIS DINAMIS PONDASI MESIN

#### 4.1 Mode Getaran Pondasi Blok

Pondasi blok mempunyai enam derajat kebebasan, oleh karenanya ada enam frekuensi alam. Tiga darinya bertranslasi sepanjang tiga sumbu utama dan tiga lainnya berotasi mengelilingi ketiga sumbuanya (gambar 4.1).



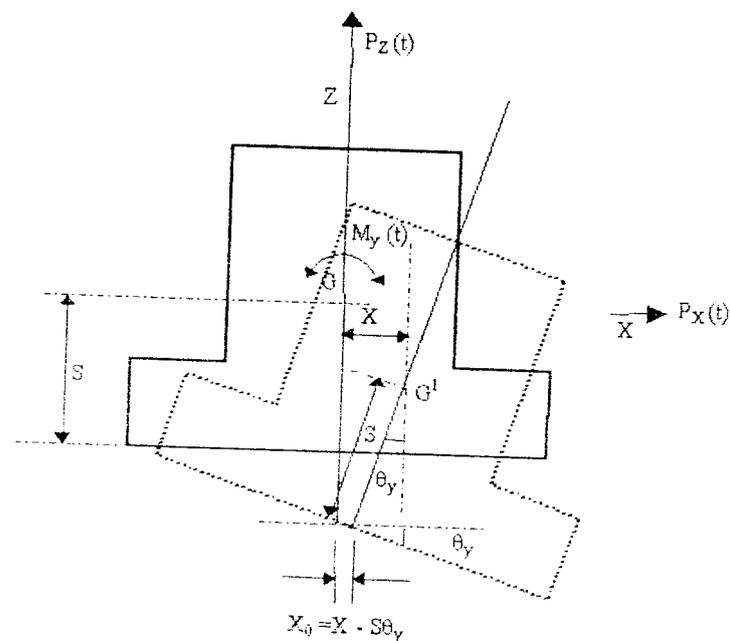
Gambar 4.1: Ragam Getaran pada Pondasi Blok  
(Srinivasulu, 1976).

Mode bergelarnya mungkin "decoupled" atau "intercoupled" tergantung pada posisi relatif pusat gravitasi pondasi mesin dan titik pusat luas alasnya. Frekuensi alam ditentukan dalam mode khusus (*decoupled* atau *intercoupled*) yang dibandingkan dengan frekuensi operasinya (Srinivasulu, 1976).

#### 4.2 Metode Analisis Pondasi Blok

Untuk menganalisis gaya dinamis pada pondasi mesin bertipe blok, digunakan metode Barkan (1952). Adapun teorinya adalah sebagai berikut :

Diasumsikan bahwa kombinasi titik pusat gravitasi mesin dan pondasi terletak pada garis vertikal yang sama sebagai pusat bidang dasar. Dalam kasus ini translasi vertikal dan jenis memutar (*twisting*) adalah *uncoupled*, sedangkan gerakan *sliding* dan *rocking* pada setiap dua bidang vertikal (bidang *xz* dan *yz*) yang melalui pusat gravitasi mesin dan pondasi berpasangan secara terpisah.



Gambar 4.2 : Displacement Pondasi dibawah Gaya Osilasi di Bidang *x-z*  
(Srinivasulu, 1976).

Gambar 4.2 menunjukkan pondasi blok yang mempunyai masa  $m$  ( $w/g$ ) dan luas alas  $A_f$  yang dikenai beban osilasi  $P_z(t)$ ,  $P_x(t)$  dan sebuah momen  $M_y(t)$  dimana  $t$  adalah parameter waktu. Sumbu utama yang melalui pusat gravitasi  $G$ ,

dipilih sebagai koordinat dan  $S$  adalah tinggi  $G$  diatas pusat elastisitas alas pendukungnya.

Persamaan gerakan pondasi untuk kasus tak teredam dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Vertikal} \quad m\ddot{z} + k_z z = P_z(t) \quad (4.1)$$

$$\text{Horizontal} \quad m\ddot{x} + k_x (x - S\theta_y) = P_x(t) \quad (4.2)$$

$$\text{Rocking} \quad \varphi_y \ddot{\theta} - K_x Sx + (K_{\theta_y} - WS + K_x S^2) \theta_y = M_y(t) \quad (4.3)$$

dimana  $K_z, K_x, K_{\theta_y}$  adalah kekakuan elastis dukungan yang digunakan pada tekanan vertikal, geser horizontal dan rotasi balik (terhadap sumbu  $y$ ).

Untuk memperoleh persamaan gerak pada bidang  $yz$ , indeks  $x$  dan  $y$  harus diubah dalam persamaan 4.2 dan 4.3. Persamaan gerak untuk torsi (rotasi terhadap sumbu  $x$ ) dibawah pengaruh osilasi momen torsi  $T_0 \sin \omega t$  yaitu :

$$\varphi_z \ddot{\psi} + K_{\varphi} \psi = T_0 \sin \omega t \quad (4.4)$$

dimana  $\varphi_z$  adalah masa momen inersia terhadap sumbu  $z$ ,  $\psi$  adalah sudut putar dan  $K_{\psi}$  kekakuan dukungan elastis untuk berotasi mengelilingi sumbu vertikal.

Penyelesaian persamaan gerakan 4.1 dan 4.4 merupakan dasar pada rumus berikutnya untuk frekuensi alam dan amplitudo pada berbagai mode (Barkan, 1962).

#### a. Translasi Vertikal

Frekuensi alam *circular* ( $\omega_z$ ) untuk translasi vertikal *uncoupled* sepanjang sumbu  $z$  rumusnya adalah

$$\omega_z = \sqrt{K_z / m} \quad (4.5)$$

untuk pondasi yang langsung bertumpu pada tanah

$$\omega_z = \sqrt{\frac{C_z A_f}{m}} \quad (4.6)$$

Amplitudo vertikal ( $a_z$ ) dibawah aksi gaya pengeksitasi  $P_z \sin \omega_m t$ ,  $\omega_m$  adalah frekuensi operasi *circular* yang dirumuskan oleh :

$$a_z = \frac{P_z}{m (\omega_z^2 - \omega_m^2)} \quad (4.7)$$

#### b. Gerakan *Sliding* dan *Rocking* pada Bidang $x-z$

Frekuensi alam : dua frekuensi alam  $\omega_{n1}$ ,  $\omega_{n2}$  yang mewakili gerak *coupled* (*sliding* sepanjang sumbu  $x$  dan *rocking* sepanjang sumbu  $y$ ) pada bidang  $x-z$  diberikan oleh akar persamaan kuadrat berikut dalam  $\omega_n^2$

$$\omega_n^4 - \left( \frac{\omega_{\phi_y}^2 + \omega_x^2}{\alpha_y} \right) \omega_n^2 + \frac{\omega_{\phi_y}^2 \omega_x^2}{\alpha_y} = 0 \quad (4.8)$$

dimana  $\alpha_y$  adalah rasio masa momen inersia ( $\phi_y$ ) terhadap sumbu  $y$  yang terus melewati pusat gravitasi masa momen inersia ( $\phi_{0y}$ ) terhadap sumbu paralel yang melewati pusat elastisitas daya dukung alas

$$\alpha_y = \phi_y / \phi_{0y} \quad (4.9)$$

dan

$$\omega_{\phi_y}^2 = \left( K_{\phi_y} - WS \right) / \phi_{0y} \quad (4.10)$$

$$\omega_x^2 = K_x / m \quad (4.11)$$

untuk pondasi yang bertumpu pada tanah :

$$\omega_{\theta y}^2 = \frac{C_{\theta} I_y - WS}{\Phi_{\theta y}} \quad (4.12)$$

dan

$$\omega_x^2 = \frac{C_{\tau} A_f}{m} \quad (4.13)$$

Notasi  $\omega_x$  dan  $\omega_{\theta y}$  disebut “*limiting frequencies*” pada gerakan *uncoupled*,  $\omega_x$  mewakili frekuensi alam *circular* untuk “*pure sliding*” sepanjang sumbu  $x$  bila pondasi diasumsikan memiliki ketahanan tak terbatas terhadap *rocking* (terhadap sumbu  $y$ ).

Dan  $\omega_{\theta y}$  menunjukkan frekuensi alam *circular* untuk “*pure rocking*” (terhadap sumbu  $y$ ) bila pondasi diasumsikan memiliki ketahanan tak terbatas terhadap *sliding* (sepanjang sumbu  $x$ ). Dua akar  $\omega_{n1}$  dan  $\omega_{n2}$  dari persamaan 4.8 diberikan oleh :

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2\alpha_y} \left[ \omega_{\theta y}^2 + \omega_x^2 \pm \sqrt{(\omega_{\theta y}^2 + \omega_x^2)^2 - 4\alpha_y \omega_{\theta y}^2 \omega_x^2} \right] \quad (4.14)$$

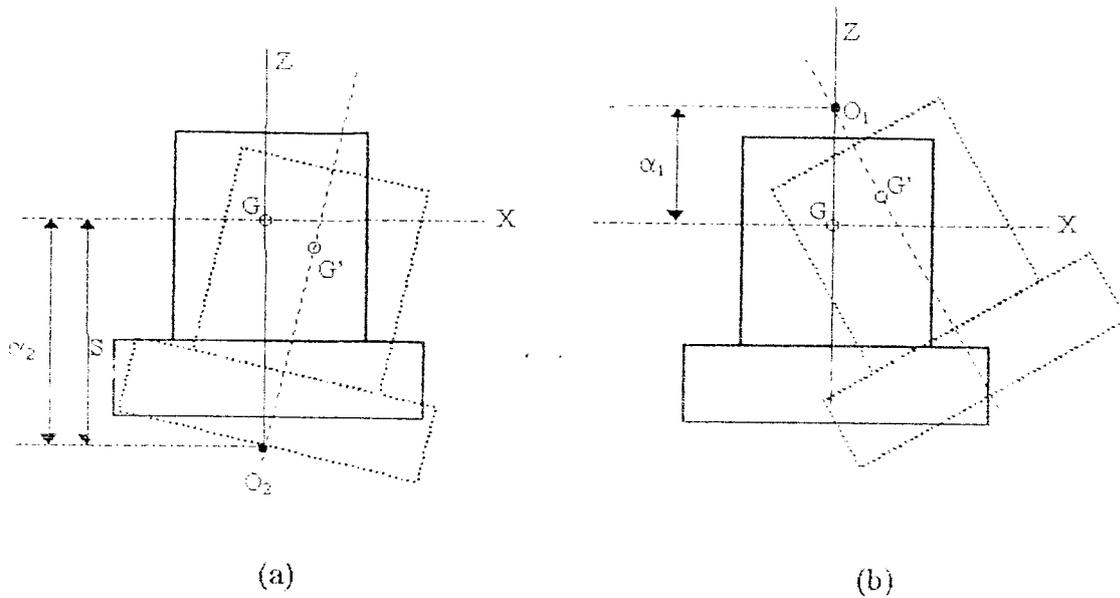
Pondasi yang bergetar dengan frekuensi alam *circular*  $\omega_{n1}$  dan  $\omega_{n2}$  (dimana  $\omega_{n1} > \omega_{n2}$ ) terhadap dua titik pusat rotasi –  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  (gambar 4.3) – yang mana terletak pada jarak  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  dari pusat gravitasi biasa.

dimana

$$\alpha_{1,2} = \frac{\omega_x^2 S}{\omega_x^2 - \omega_{n1,2}^2} \quad (4.15)$$

dan dapat dibuktikan bahwa

$$\alpha_1, \alpha_2 = \Phi_y/m \quad (4.16)$$



Gambar 4.3 : Pusat Rotasi untuk Gerakan *Sliding* dan *Rocking* Bidang  $x$ - $z$

(a) Mode Pertama ,(b) Mode Kedua (Srinivasulu, 1976).

Amplitudo : amplitudo horizontal ( $\alpha_x$ ) dan amplitudo rotasi ( $\alpha_{\theta y}$ ) pada pondasi yang dikenai aksi simultan dari gaya pegeksitasi  $P_o \sin \omega_m t$  dan momen pegeksitasi  $M_y \sin \omega_m t$  adalah

$$z_x = \left[ (K_{\theta y} - WS + K_x S^2 - \omega_y \omega_m^2) P_x + (K_x S) M_y \right] \frac{1}{f(\omega_m^2)} \quad (4.17)$$

$$\text{dan} \quad \alpha_{\theta y} = \left[ (K_x S) P_x + (K_x - m \omega_m^2) M_y \right] \frac{1}{f(\omega_m^2)} \quad (4.18)$$

dimana :

$$f(\omega_m^2) = m \varphi_y (\omega_{n1}^2 - \omega_m^2) (\omega_{n2}^2 - \omega_m^2) \quad (4.19)$$

*Displacement* horizontal (sepanjang sumbu  $x$ ) diatas sisi pondasi sama dengan

$$\alpha_x + (H - S) \alpha_{\theta y} \quad (4.20)$$

dimana  $H$  adalah tinggi pondasi.

**c. Gerakan *Sliding* dan *Rocking* pada Bidang  $y - z$**

Frekuensi alam pada *coupled sliding* (sepanjang sumbu  $y$ ) dan *rocking* (terhadap sumbu  $x$ ) dari gerakan pondasi diberikan oleh persamaan 4.8 yang diperoleh dengan mengubah indeks  $x$  dan  $y$ .

Amplitudo  $a_y$  dan  $a_{\theta z}$  seperti yang diperoleh pada persamaan 4.17 dan 4.18 dengan mengubah indeks  $x$  dan  $y$ . Amplitudo horisontal sepanjang sumbu  $y$  yang berada diatas sisi pondasi adalah

$$a_y + (H - S) a_{\theta x} \quad (4.21)$$

**d. *Yawing* (atau Gerakan *Twisting* Terhadap Sumbu  $z$ )**

Gerakan *yawing* adalah *uncoupled* dan frekuensi alam ( $\omega_\psi$ ) untuk mode *twisting*. Dan amplitudo dibawah aksi momen *twisting*  $T_0 \sin \omega_m t$  diberikan oleh persamaan berikut :

$$\omega_\psi = \sqrt{K_\psi / \varphi_z} \quad (4.22)$$

untuk pondasi yang bertumpu langsung diatas tanah

$$\omega_\psi = \sqrt{C_\psi I_z / \varphi_z} \quad (4.23)$$

$$a_\psi = \frac{1}{(\omega_\psi^2 - \omega_m^2)} \times \left\{ \frac{T_0}{\varphi_z} \right\} T_0 \quad (4.24)$$

Jika kombinasi pusat gravitasi mesin dan pondasi dan titik pusat alas pondasi tidak terletak pada garis vertikal yang sama, getaran vertikal tidak tergantung pada getaran horisontal dan *rocking*. Getaran vertikal, horisontal, *rocking* pada bidang  $x-z$  atau  $y-z$  adalah *intercoupled*. Dan ketiga *coupled*

frekuensi alam  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , dan  $\omega_3$  (ketiganya disetiap bidang  $x-z$  dan  $y-z$ ) diberikan oleh akar persamaan berikut :

$$\omega_n^2 e_x^2 = \frac{\alpha (\omega_z^2 - \omega_n^2) (\omega_{n1}^2 - \omega_n^2) (\omega_{n2}^2 - \omega_n^2)}{\omega_z^2 (\omega_x^2 - \omega_n^2)} \quad (4.25)$$

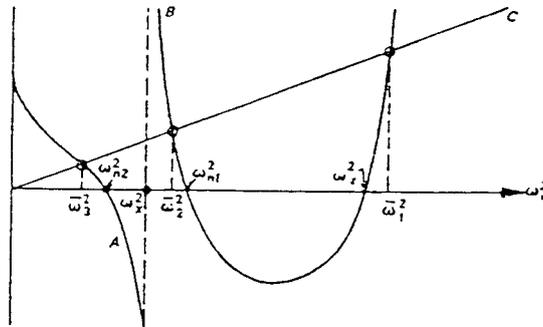
dimana :

$\omega_z$ ,  $\omega_{n1}$  dan  $\omega_{n2}$  diberikan oleh persamaan 4.5 dan 4.14,

$e_x$  adalah eksentrisitas titik pusat luas alas pondasi diukur sepanjang sumbu  $x$  dari pusat gravitasi pondasi mesin dan

$$\alpha = \Phi_y/m \quad (4.26)$$

Untuk memperoleh akar persamaan 4.25, rumus pada sebelah kanan dievaluasi pada berbagai nilai  $\omega_n^2$  yang digambarkan dalam kurva A dan B (gambar 4.4). Garis lurus pada gambar dihubungkan ke sebelah kiri persamaan diatas.



Gambar 4.4: Grafik yang Mengilustrasikan Persamaan 4.25

(Srinivasulu, 1976).

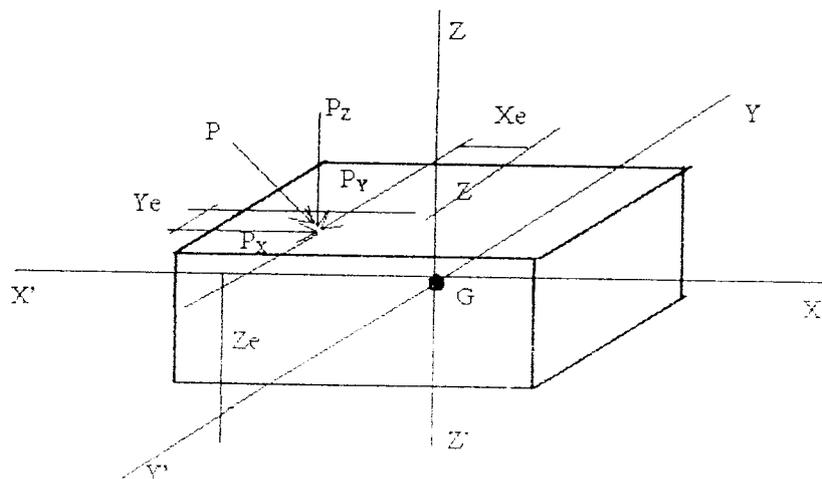
### 4.3 Analisis Momen dan Gaya Induksi

Pada pondasi blok yang dikenai gaya pengeksitasi  $P$ , komponennya akan terurai dalam  $P_x$ ,  $P_y$ , dan  $P_z$  (gambar 4.5). Notasi  $X_e$ ,  $Y_e$ , dan  $Z_e$  menunjukkan koordinat titik aplikasi gaya yang dihubungkan ke sumbu utama terus melewati pusat gravitasi ( $G$ ) sebagai sumbu koordinat. Momen tidak seimbang  $M_x$ ,  $M_y$ , dan  $M_z$  yang respektif terhadap sumbunya dirumuskan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976) :

$$M_x = P_z Y_e + P_y Z_e \quad (4.27a)$$

$$M_y = P_z X_e + P_x Z_e \quad (4.27b)$$

$$M_z = P_x Y_e + P_y X_e \quad (4.27c)$$



Gambar 4.5: Gaya Pengeksitasi pada Pondasi Blok  
(Srinivasulu, 1976).

Metode yang mengevaluasi gaya induksi untuk mekanisme *crank* sederhana telah diterangkan dalam bab ii. Berikut adalah masa torak yang menghasilkan gaya inersia dan juga gaya yang dihubungkan ke beban harmonis lebih tinggi.

### a. Mesin Multi Silinder

Untuk mesin multi silinder yang mempunyai silinder paralel, gaya induksi (mengabaikan gaya harmonis yang lebih tinggi) dirumuskan dalam persamaan (Srinivasulu, 1976) :

i. Paralel ke sumbu silinder ( $P_1$ )

$$P_1 = \sum_{n=1}^m \left[ r_n \omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) \cos (\omega_m t + \beta_n) \right] \quad (4.28)$$

ii. Tegak lurus ke sumbu tangkai ( $P_2$ )

$$P_2 = \sum_{n=1}^m \left[ r_n \omega_m^2 m_{rot} \sin (\omega_m t + \beta_n) \right] \quad (4.29)$$

dimana  $r_n$  adalah radius *crank* untuk silinder ke- $n$ ,  $\omega_m$  adalah kecepatan sudut rotasi,  $m_{rec}$  dan  $m_{rot}$  masa rotasi dan torak total,  $\beta_n$  adalah sudut *wedging* (sudut antara *crank* pada silinder ke- $n$  dan *crank* pertama) dan  $m$  adalah jumlah silinder dalam mesin. Sudut *wedging* untuk berbagai macam setting *crank* diberikan dalam tabel 4.1.

Untuk posisi silinder yang bebas, gaya induksinya dipertimbangkan setiap silinder secara terpisah. Selain gaya induksi, momen induksi juga terjadi, adapun besarnya dirumuskan dalam persamaan 4.27. Untuk mesin multi silinder jumlah aljabar momen induksi setiap silindernya harus diperimbangkan.

Berikutnya adalah bagaimana cara mengkalkulasi momen dan gaya pengeksitasi untuk mesin vertikal dua silinder, yang mempunyai silinder identik dengan *crank set*  $90^\circ$  tersendiri.

Tabel 4.1  
Sudut *Wedging* untuk Mesin Multi Silinder  
(Srinivasulu, 1976)

Tipe mesin dan setting <i>crank</i>	Sudut <i>wedging</i> ( $\beta_n$ )
1. Mesin dua silinder	
(a). <i>Crank</i> s dalam arah yang sama	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = 2\pi$
(b). <i>Crank</i> s bersudut $90^\circ$	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = \pi/2$
(c). <i>Crank</i> s bersudut $180^\circ$	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = \pi$
2. Mesin tiga silinder	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = 2\pi/3 ; \beta_3 = 4\pi/3$
3. Mesin empat silinder	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = \pi ; \beta_3 = \pi ; \beta_4 = 2\pi$
4. Mesin enam silinder	$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = 2\pi/3 ; \beta_3 = 4\pi/3$ $\beta_4 = 4\pi/3 ; \beta_5 = 2\pi ; \beta_6 = 8\pi/3$

Gaya induksi dalam silinder sepanjang sumbu silinder (sumbu vertikal) adalah  $P_{z1}$  dan  $P_{z2}$  yang mana keduanya tegak lurus terhadap arah  $P_{x1}$  dan  $P_{x2}$ . Dengan tinggi *shaft* adalah  $L_z$ . Rumus untuk momen dan gaya induksi pada pondasi seperti ditunjukkan dalam gambar 4.6 adalah sebagai berikut.

- i. Gaya induksi paralel ke sumbu silinder (sumbu  $z$ )

$$P_{z1} = r\omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) \cos \omega_m t \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} P_{z2} &= r\omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) \cos \left( \omega_m t + \frac{\pi}{4} \right) \\ &= -r\omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) \sin \omega_m t \end{aligned} \quad (4.31)$$

Gaya total ( $P_z$ ) =  $P_{z1} + P_{z2}$

$$\begin{aligned} &= r\omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) (\cos \omega_m t - \sin \omega_m t) \\ &= \sqrt{2} r\omega_m^2 (m_{rot} + m_{rec}) \cos \left( \omega_m t + \frac{\pi}{4} \right) \end{aligned} \quad (4.32)$$

ii. Gaya induksi tegak lurus ke sumbu silinder (sumbu  $x$ )

$$P_{x1} = r \omega_m^2 m_{rot} \sin \omega_m t \quad (4.33)$$

$$P_{x2} = r \omega_m^2 m_{rot} \sin \left( \omega_m t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.34)$$

Gaya total ( $P_x$ ) =  $P_{x1} + P_{x2}$

$$= r \omega_m^2 m_{rot} (\sin \omega_m t + \cos \omega_m t) \quad (4.35)$$

$$= \sqrt{2} r \omega_m^2 m_{rot} \sin \left( \omega_m t + \frac{\pi}{4} \right)$$

iii. Momen induksi

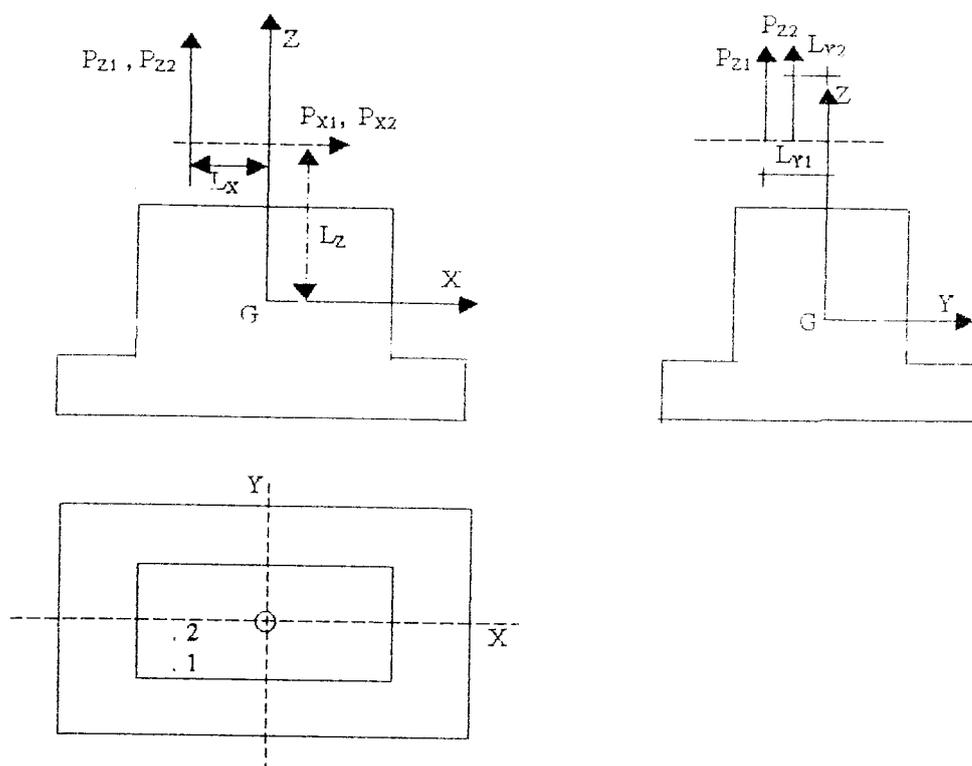
Merujuk ke gambar 4.6, momen induksi yang mengelilingi sumbu koordinat terus melewati pusat gravitasi mesin dan pondasi ( $G$ ) dirumuskan dalam :

$$M_x = P_{z1} L_{y1} + P_{z2} L_{y2} \quad (4.36)$$

$$M_y = (P_{x1} + P_{x2}) L_z + (P_{z1} + P_{z2}) L_x \quad (4.37)$$

$$M_z = P_{x1} L_{y1} + P_{x2} L_{y2} \quad (4.38)$$

Jika mesin mempunyai silinder pembantu, maka dalam perhitungan gaya induksinya, beban yang ditimbulkan olehnya ditambahkan ke penghasil silinder utama. Gaya induksi oleh silinder pembantu umumnya sangat kecil dan bisa diabaikan dalam perhitungan getaran pondasi.



Gambar 4.6 : Gaya Pengeksitasi pada Mesin Torak Dua Silinder  
(Srinivasulu, 1976).

#### b. Prosedur Newcomb's untuk Desain Pondasi Mesin

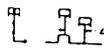
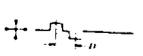
Newcomb (1951) merumuskan gaya inersia ( $P$ ) yang beraksi sepanjang sumbu piston dalam bentuk :

$$P = 0,0000284 W r f_m^2 \left( \cos \theta + \frac{r}{l} \cos 2\theta \right) \quad (4.39)$$

dimana  $P$  adalah gaya inersia dalam *pounds*,  $r$  adalah radius *crank* dalam *inches*,  $W$  adalah berat bagian torak dalam *pounds*,  $f_m$  adalah kecepatan mesin dalam *rpm*, dan  $l$  adalah panjang batang penghubung dalam *inches*, dan  $\theta$  adalah inklinasi dari *crank* terhadap sumbu piston.

Berikut adalah gaya yang tidak seimbang dari mesin multi silinder dengan susunan *crank* yang berbeda (tabel 4.2) :

Tabel 4.2  
Gaya yang Tidak Seimbang untuk Mesin Multi Silinder dalam Susunan *Crank* yang Berbeda (Newcomb, 1957).

Crank Arrangements	Forces		Couples	
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
Single crank 	$F'$ without counterwts. $(0.5)F'$ with counterwts.	$F''$	None	None
Two cranks at 180° In-line cylinders 	0	$2F''$	$F'D$ without counterwts. $\frac{F'}{2}D$ with counterwts.	None
Opposed cylinders 	0	0	Nil	Nil
Two cranks at 90° 	$(1.41)F'$ without counterwts. $(0.707)F'$ with counterwts.	0	$(1.41)F'D$ without counterwts. $(0.707)F'D$ with counterwts.	$F''D$
Two cylinders on one crank Cylinders at 90° 	$F'$ without counterwts. 0 with counterwts.	$(1.41)F''$	Nil	Nil
Two cylinders on one crank Opposed cylinders 	$2F'$ without counterwts. $F'$ with counterwts.	0	None	Nil
Three cranks at 120° 	0	0	$(3.46)F'D$ without counterwts. $(1.73)F'D$ with counterwts.	$(3.46)F''D$
Four cylinders Crank at 180° 	0	0	0	0
Crank at 90° 	0	0	$(1.41)F'D$ without counterwts. $(0.707)F'D$ with counterwts.	$4.0F''D$
Six cylinders 	0	0	0	0

Dari persamaan 4.39 bila gaya maksimum dihubungkan ke  $\theta = 0$ , maka :

$$P_{\max} = 0,0000284 W r f_m^2 \left( 1 + \frac{r}{l} \right) \quad (4.40)$$

$$\text{Gaya primer maksimum } (P_1) = 0,0000284 W r f_m^2 \quad (4.41)$$

$$\text{Gaya sekunder maksimum } (P_2) = P_1 \frac{r}{l} \quad (4.42)$$

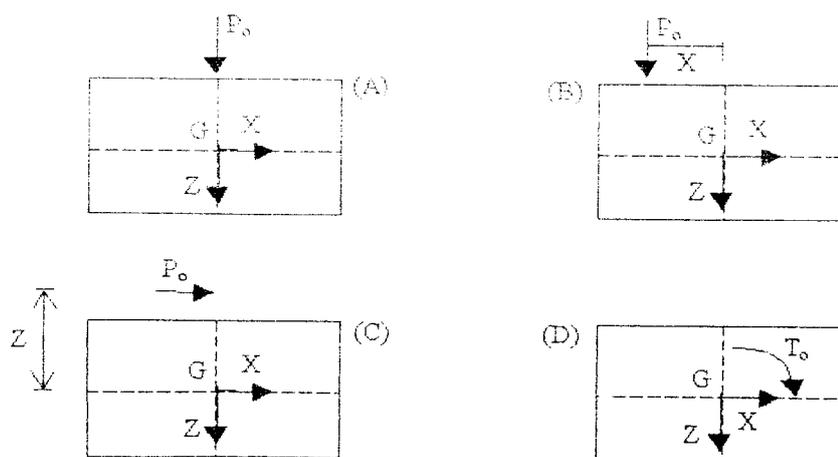
Dari tabel 4.2 disajikan gaya inersia yang dikembangkan oleh mesin multi silinder dengan silinder identik. Jika silinder tidak identik, tabel ini tidak digunakan. Dan gaya tidak seimbangya dihitung untuk setiap silinder secara terpisah dan hasilnya ditempatkan diatasnya.

### c. Gaya yang Beraksi pada Pondasi

Untuk desain struktur, berikut gaya yang mempertahankan pondasi dalam keadaan seimbang (Srinivasulu, 1976) :

- i. Momen dan gaya induksi dikalikan dengan faktor kelelahan ( $\xi = 3$ )
- ii. Gaya inersia
- iii. Gaya dinamis

Rumus untuk gaya inersia, dinamis dan momen untuk berbagai macam kasus gaya pengeksitasi dan momen dalam berbagai arah disajikan dalam gambar 4. 7 dan rumusnya dalam tabel 4.3



Gambar 4.7 : Gaya Pengeksitasi dalam Berbagai Arah  
(Srinivasulu, 1976).

Tabel 4.3  
Gaya yang Beraksi pada Pondasi  
(Srinivasulu, 1976)

Masalah	Gaya inersia ( $F_m$ ) Dan momen ( $M_m$ )	Gaya dinamis ( $F_d$ ) Dan momen ( $M_d$ )
1. Gaya pegeksitasi yang beraksi vertikal dan melewati kombinasi pusat gravitasi mesin dan pondasi (gb. 4.7 A)	$(F_m) = \xi m a \omega_m^2$	$(F_d)_z = \xi K_z a_z$
2. Gaya pegeksitasi yang beraksi vertikal tetapi eksentrisitasnya ke kedua sumbu (gb. 4.7 B)	$(F_m)_z = \xi m a_z \omega_m^2$ $(F_m)_x = \xi m a_x \omega_m^2$ $(F_m)_y = \xi m a_y \omega_m^2$ $(M_m)_x = \xi \varphi_x a_{\theta x} \omega_m^2$ $(M_m)_y = \xi \varphi_y a_{\theta y} \omega_m^2$	$(F_d)_z = \xi K_z a_z$ $(F_d)_x = \xi K_x (a_x - S a_{\theta x})$ $(F_d)_y = \xi K_y (a_y - S a_{\theta y})$ $(M_d)_x = \xi K_{\theta x} a_{\theta x}$ $(M_d)_y = \xi K_{\theta y} a_{\theta y}$
3. Gaya pegeksitasi yang beraksi horisontal dalam arah $x / y$ di ketinggian tertentu diatas pusat gravitasi (gb. 4.7 C)	$(F_m)_z = 0$ $(F_m)_x = \xi m a_x \omega_m^2$ $(F_m)_y = \xi m a_y \omega_m^2$ $(M_m)_x = \xi \varphi_x a_{\theta x} \omega_m^2$ $(M_m)_y = \xi \varphi_y a_{\theta y} \omega_m^2$	$(F_d)_z = 0$ $(F_d)_x = \xi K_x (a_x - S a_{\theta x})$ $(F_d)_y = \xi K_y (a_y - S a_{\theta y})$ $(M_d)_x = \xi K_{\theta x} a_{\theta x}$ $(M_d)_y = \xi K_{\theta y} a_{\theta y}$
4. Momen pegeksitasi mengitari sumbu $z$ yang melewati pusat gravitasi (gb. 4.7 D)	$(F_m)_x = (F_m)_y = (F_m)_z = 0$ $(M_m)_x = (M_m)_y = 0$ $(M_m)_z = \xi \varphi_z a_\varphi \omega_m^2$	$(F_d)_x = (F_d)_y = (F_d)_z = 0$ $(M_d)_x = (M_d)_y = 0$ $(M_d)_z = \xi K_\varphi a_\varphi$

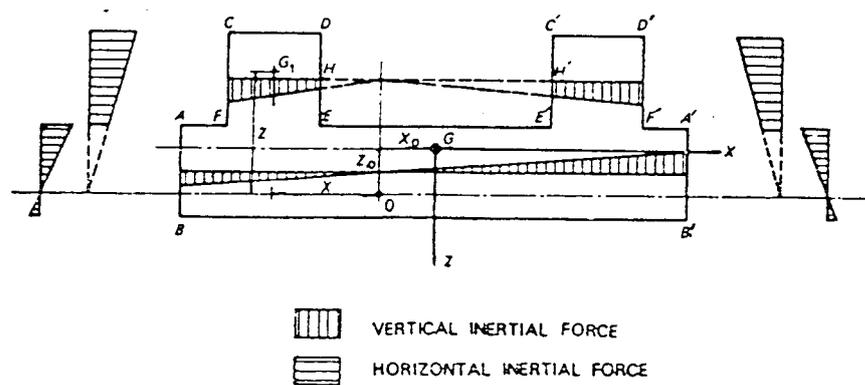
Adapun notasi – notasi yang akan digunakan dalam tabel 4.3 adalah sebagai berikut;

- Masa mesin dan pondasi =  $m$
- Frekuensi operasi *circular* =  $\omega_m$
- Kekakuan dalam arah  $x, y$ , dan  $z = K_x, K_y$ , dan  $K_z$
- Amplitudo translasi dalam arah  $x, y$ , dan  $z = a_y, a_x, a_z$
- Amplitudo rotasi mengelilingi arah  $x, y$ , dan  $z = a_{\theta x}, a_{\theta y}, a_{\theta z}$
- Gaya inersia dalam arah  $x, y$ , dan  $z = (F_m)_x, (F_m)_y, (F_m)_z$
- Gaya dinamis dalam arah  $x, y$ , dan  $z = (F_d)_x, (F_d)_y, (F_d)_z$
- Momen inersia dalam arah  $x, y$ , dan  $z = (M_m)_x, (M_m)_y, (M_m)_z$
- Momen dinamis dalam arah  $x, y$ , dan  $z = (M_d)_x, (M_d)_y, (M_d)_z$

#### d. Distribusi Gaya Inersia

Gaya inersia total (vertikal dan horisontal), demikian juga momen inersia yang beraksi pada pondasi, dapat dievaluasi dengan rumus yang disajikan dalam tabel 4.3.

Dalam gambar 4.8 ditunjukkan sebuah pondasi yang terdiri atas sejumlah bagian segi-empat  $ABB'A'$ ,  $CDEF$ ,  $C'D'E'F'$ . Ambil salah satu bagian ini, misalkan  $CDEF$ . Pertimbangkan gerakan dalam bidang  $xz$ , sedangkan  $a_z$  dan  $a_x$  menunjukkan amplitudo vertikal dan horisontal dan  $a_{\theta y}$  menunjukkan amplitudo rotasional pada pondasi. Pusat rotasi 'o' dibatasi oleh koordinat  $x_0$  dan  $z_0$  merujuk pada sumbu pokok yang melewati pusat gravitasi  $G$  sebagai sumbu koordinat.



Gambar 4.8: Distribusi Gaya Inersia (Srinivasulu, 1976).

dimana :

$$x_0 = -\frac{a_z}{a_{\theta y}} \quad (4.42)$$

$$z_0 = -\frac{a_x}{a_{\theta y}} \quad (4.43)$$

Notasi  $(F_m)_z$ ,  $(F_m)_x$  menunjukkan gaya inersia total dan  $(M_m)_y$  momen inersia total, rumusnya disajikan dalam tabel 4.3. Sedangkan  $W_1$  adalah berat pondasi dari

bagian ini, dan  $(x, z)$  merupakan pusat gravitasinya ( $G_1$ ) yang dirujuk untuk pusat gravitasi  $G$  seperti yang asli. Gaya inersia yang dibagi dalam bagian pondasi ini (mempunyai berat  $W_1$ ) diberikan dalam hubungan berikut :

Gaya inersia vertikal  $(F_m)_z$  :

$$(F_{MZ})_1 = W_1 \left[ \frac{(F_M)_Z}{W} \pm \frac{(M_M)_Y}{\varphi_Y} \frac{x}{g} \right] \quad (4.44)$$

Gaya inersia horisontal  $(F_m)_x$  :

$$(F_{MX})_1 = W_1 \left[ \frac{(F_M)_X}{W} \pm \frac{(M_M)_Y}{\varphi_Y} \frac{z}{g} \right] \quad (4.45)$$

dimana  $W$  adalah berat total mesin dan pondasinya dan  $\varphi_y$  adalah masa momen inersia yang mengelilingi sumbu rotasi.

Diagram distribusi gaya inersia yang berbentuk trapesium atau sepasang *triangles* tergantung pada posisi titik pusat rotasinya (gambar 4.8). Persamaan 4.44 dan 4.45 dapat ditulis lebih ringkas seperti berikut :

$$(F_{MZ})_1 = \frac{W_1}{\varphi_Y} (M_M)_Y \frac{X}{g} \quad (4.46)$$

dan

$$(F_{MX})_1 = \frac{W_1}{\varphi_Y} (M_M)_Y \frac{Z}{g} \quad (4.47)$$

dimana :

$$X = x - x_0 \quad (4.48)$$

$$Z = z - z_0 \quad (4.49)$$

$X$  dan  $Z$  adalah koordinat  $G_1$  yang dirujuk ke pusat rotasi (o) seperti asalnya.

Dalam distribusinya, gaya inersia dianggap seragam dan orđinat akhir dari diagram distribusi gaya inersia untuk setiap bagian segi-empat pondasi dapat di evaluasi dari pertimbangan berikut :

- i. Garis yang menghubungkan ordinat ujung gaya inersia vertikal akan bertemu garis horisontal pada titik digaris vertikal yang melewati pusat rotasi
- ii. Garis yang menghubungkan ordinat ujung dari gaya horisontal akan bertemu garis alasnya (garis vertikal) pada titik garis yang melalui pusat rotasi
- iii. Luas daerah dari diagram distribusi gaya inersia (daerah *full* dalam bentuk trapesium berbeda dengan daerah sepasang *triangles*) – vertikal atau horisontal – akan sama besarnya dievaluasi dengan persamaan 4.46 atau 4.47.

Perhitungan gaya inersia dapat dihilangkan jika frekuensi alam pondasi ( $f_n$ ) dipertimbangkan lebih besar dari frekuensi operasional mesin ( $f_m$ ). Pondasi mungkin bisa dipertimbangkan menjadi dalam keadaan seimbang dibawah pengaruh (i) gaya induksi dikalikan dengan faktor kelelahan ( $\xi$ ), dan (ii) gaya dinamis, dan yang terakhir terjadi dalam bentuk tekanan reaktif tanah, dan gaya pegas.

#### c. Pondasi diatas *Absorbers* Getaran

Dalam kasus yang khusus karena kondisi lingkungan, kemungkinan menjadi perlu untuk membatasi amplitudo getaran lebih rendah daripada yang biasa dipakai. Kemungkinan tidak *practicable* untuk mencapai persyaratan ini dengan memilih masa atau *area* dasar pondasi yang layak. Pada kasus demikian, *absorbers* pegas disarankan untuk digunakan dibawah pondasi. Pegas relatif efektif dalam mengurangi amplitudo getaran paksa.

*Absorbers* biasanya ditempatkan diatas *slab* tipis yang disebut "*sole plate*" yang bertumpu langsung diatas tanah. *Absorbers* mendukung diatas pondasi blok bagian atas, dan diaplikasikan untuk mesin *reciprocating* (Srinivasulu, 1976).

Penggunaan *absorbers* dibawah pondasi blok merupakan hasil dalam sistem dua masa yang didukung dua pegas. Meskipun setiap masa (dipertimbangkan *rigid*) mempunyai enam derajat kebebasan – dengan demikian ada 12 tingkat kebebasan untuk sistem keseluruhan – untuk tujuan praktis kemungkinan dipertimbangkan getaran dalam arah vertikal adalah bebas (*independent*) atau mode lainnya. Sistem demikian tereduksi ke sistem masa pegas tingkat dua seperti ditunjukkan dalam gambar 3.2. Dalam kasus ini  $m_1$  adalah masa pondasi yang diberi pegas,  $m_2$  adalah masa pondasi (termasuk mesin yang ditempatkan diatasnya) diatas pegas,  $K_1$  adalah kekakuan tanah pendukung dibawah masa dan  $K_2$  adalah kekakuan *absobers* pegas.

Amplitudo  $a_1$  dan  $a_2$  pada masa  $m_1$  dan  $m_2$  dibawah pengaruh gaya osilasi induksi  $P_0 \sin \omega_m t$  yang beraksi diatas masa  $m_2$  diberikan dalam bab ii.

$$a_1 = \frac{\omega_{n2}^{-2}}{m_1 f(\omega_m^2)} P_0 \quad (4.50)$$

$$a_2 = \frac{\left[ (1 + \alpha) \omega_{n1}^{-2} + \alpha \omega_{n2}^{-2} - \omega_m^2 \right]}{m_2 f(\omega_m)} P_0 \quad (4.51)$$

dimana :

$$\omega_{n2}^{-2} = \frac{K_2}{m_2}, \quad \omega_{n1}^{-2} = \frac{K_1}{m_1 + m_2}, \quad \alpha = \frac{m_2}{m_1}$$

dan

$$f(\omega_m^2) = \omega_m^2 - (1 + \alpha) \left( \omega_{n1}^{-2} + \omega_{n2}^{-2} \right) \omega_m^2 + (1 + \alpha) \omega_{n1}^{-2} \omega_{n2}^{-2} \quad (4.52)$$

Sejak gaya pengeksitasi adalah proporsional terhadap square frekuensi operasi mesin ( $\omega_m$ )

$$P_0 = \gamma \omega_m^2 \quad (4.53)$$

dimana  $\gamma$  adalah faktor yang tergantung pada karakteristik mesin

Substitusikan persamaan 4.53 sebelah kanan persamaan 4.50 dan solusinya (Srinivasulu, 1976) :

$$\alpha_1 = \frac{\gamma}{m_1} \frac{\eta_2^2}{1 - (1 + \alpha)(\eta_1^2 + \eta_2^2 - \eta_1^2 \eta_2^2)} \quad (4.54)$$

dimana :

$$\eta_1 = \frac{\omega_{n1}}{\omega_m} \quad (4.55)$$

dan

$$\eta_2 = \frac{\omega_{n2}}{\omega_m} \quad (4.56)$$

Jika tidak menggunakan *absorbers*, redaman diabaikan dalam sistem amplitudo  $\alpha_z$  pondasi dirumuskan oleh :

$$\alpha_z = \frac{P_o}{(m_1 + m_2) \left( \omega_{n1}^2 - \omega_m^2 \right)} \quad (4.57)$$

dalam istilah  $\gamma$  dan  $\alpha$ ,

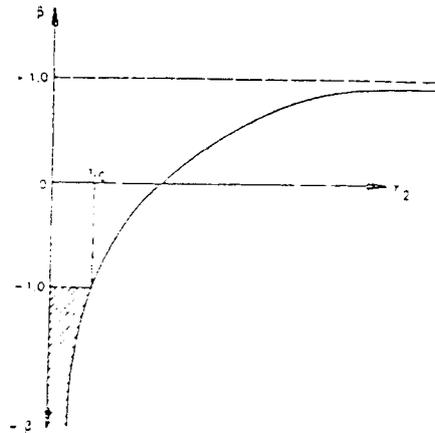
$$\alpha_z = \frac{\gamma}{m_1} \frac{1}{(1 + \alpha) (\eta_1^2 - 1)} \quad (4.58)$$

tingkat *absorption*  $\beta$  dibatasi sebagai :

$$\beta = \frac{\alpha_z}{\alpha_1} = \frac{1 - (1 + \alpha)(\eta_1^2 + \eta_2^2 - \eta_1^2 \eta_2^2)}{(1 + \alpha)(\eta_1^2 - 1)\eta_2^2} \quad (4.59)$$

Dapat diverifikasikan dari persamaan 4.59 bahwa bila  $\eta_2 \rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow \infty$  dan bila  $\eta_2 \rightarrow \infty$ ,  $\beta \rightarrow 1,0$ . Gambar 4.9 menunjukkan variasi nilai  $\eta_2$  dan  $\beta$ . Dapat diketahui dari diagram bahwa *absorbers* akan efektif bila ( $\beta < -1$ ) hanya bila  $\eta_2$  terletak antara nol dan a nilai  $\eta_0$  dimana  $\eta_0$  dapat dirumuskan sebagai :

$$\eta_o = \sqrt{\frac{(1+\alpha)\eta_1^2 - 1}{2(1+\alpha)(\eta_1^2 - 1)}} \quad (4.60)$$



Gambar 4.9 : Zona Efektif *Absorbers* (Barkan, 1962).

Jika tingkat *absorption*  $\beta$  diketahui, maka dari persamaan 4.59,  $\eta_2$  dapat diperoleh sebagai :

$$\eta_2^2 = \frac{1 - (1+\alpha)\eta_1^2}{(1+\alpha)(\beta-1)(\eta_1^2-1)} \quad (4.61)$$

#### 4.4 Properti Geometris Pondasi Mesin

##### a. Pusat Gravitasi

Mesin dan badan pondasi dibagi kedalam sejumlah segmen masa  $m_i$  yang mempunyai bentuk geometri teratur. Rumus untuk menentukan koordinat pusat gravitasi setiap elemen masa  $m_i$  pada mesin dan pondasi adalah :

$$\bar{X} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} \quad (4.62)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i m_i y_i}{\sum_i m_i} \quad (4.63)$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_i m_i z_i}{\sum_i m_i} \quad (4.64)$$

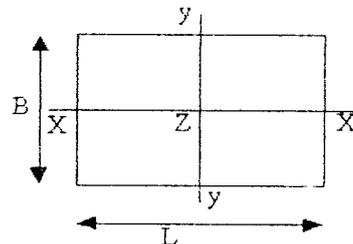
#### b. Momen Inersia Daerah Alas

Jika alas pondasi berbentuk segi-empat yang mempunyai dimensi  $L$  dan  $B$ , maka momen inersianya adalah

$$I_x = LB^3/12$$

$$I_y = BL^3/12$$

$$I_s = I_x + I_y$$



#### c. Masa Momen Inersia

Tabel 4.4 dibawah ini berisi rumus untuk masa momen inersia elemen berbentuk segi empat dan silindris.

Tabel 4.4

Masa momen inersia terhadap sumbu pusat :

(Srinivasulu,1976)

Bentuk Elemen m	$\Phi_x$	$\Phi_y$	$\Phi_z$
Prisma Segi-empat	$\frac{m}{12} (l_y^2 + l_z^2)$	$\frac{m}{12} (l_x^2 + l_z^2)$	$\frac{m}{12} (l_x^2 + l_y^2)$
Silinder Pejal	$\frac{m}{12} \left( \frac{3}{4} D^2 + l^2 \right)$	$\frac{m}{8} D^2$	$\frac{m}{12} \left( \frac{3}{4} D^2 + l^2 \right)$

## BAB V

### ISOLASI GETARAN

Jika mesin dipantek secara kaku ke lantai, maka getaran pergerakan mesin itu sendiri tereduksi. Akan tetapi getaran yang ditransmisikan ke lantai tersebut menjadi besar. Kejadian ini menghasilkan efek membahayakan pada jarak yang besar. Dengan kata lain, jika dukungan yang fleksibel ditempatkan dibawah mesin atau pondasinya, maka getaran yang ditransmisikan ke lantai dapat tereduksi, tetapi ini menyebabkan gerakan yang berarti terhadap mesin itu sendiri selama operasional mesin atau selama periode *start* dan berhenti (*stopping*).

Dalam praktik desain, dipilih frekuensi alam yang cocok untuk pondasi mesin. Untuk mesin yang berjalan dengan kecepatan tetap, tingkat isolasinya ditentukan oleh rasio  $\eta$  (ditandai sebagai rasio frekuensi operasional mesin  $f_m$  terhadap frekuensi alam pondasi  $f_n$ ) dan tergantung pada kondisi lapangan setempat.

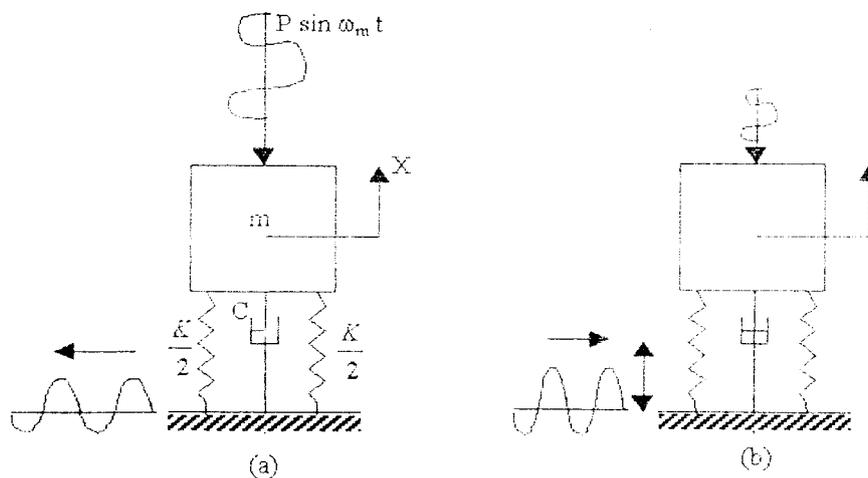
Untuk menghindari getaran yang ekksesif selama mesin bekerja, berikut hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam periode desain (Srinivasulu, 1976).

- a. Pemilihan tempat : mesin yang menyebabkan getaran (*forge presses, hammers, compressors, etc*) sebaiknya ditempatkan sejauh mungkin dari daerah yang membutuhkan ketelitian kerja tinggi.
- b. Keseimbangan beban dinamis : mesin secara dinamis sebaiknya diseimbangkan terhadap batas gaya tak seimbang yang dibangkitkan sewaktu operasional.

- c. Pemakaian pondasi yang cocok : pondasi untuk mesin sebaiknya didesain menggunakan kriteria yang dapat diterima. Keperluan setiap parameter desain seperti konstanta tanah sebaiknya di evaluasi di lapangan dimana pondasi mesin akan ditempatkan.
- d. Pemberian isolasi : pondasi mesin sebaiknya dipisahkan dari *adjoining* lantai dan komponen gedung lain dengan memberikan isolasi (antara) yang cocok.

### 5.1 Tipe Isolasi Aktif dan Pasif – *Transmissibility*

Ada dua tipe isolasi dalam masalah getaran yang di jumpai dalam praktik industri : (a) isolasi aktif, dan (b) isolasi pasif (gambar 5.1). Dalam tipe aktif, isolasi dibutuhkan untuk melawan getaran yang disebabkan oleh mesin itu sendiri. Dan dalam isolasi getaran tipe pasif, amplitudo gerakan pondasi untuk mesin didesain karena getaran lantai (disebabkan oleh sumber sekitar yang terganggu) harus direduksi sampai batas yang dapat diterima.



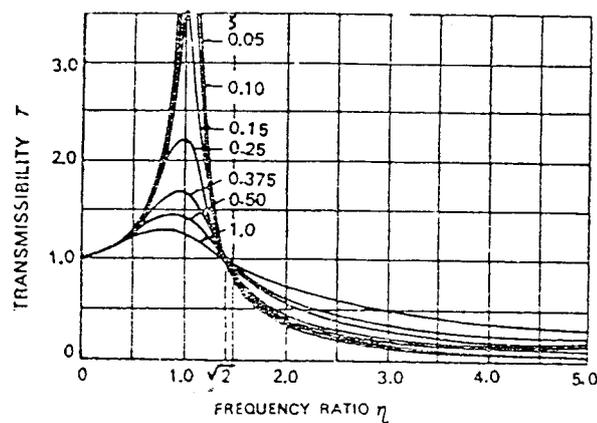
Gambar 5.1: Isolasi Getaran – (a) Tipe Aktif, (b) Tipe Pasif  
(Srinivasulu,1976)

Srinivasulu (1976) bahwa *Transmissibility* ditandai dalam kasus isolasi aktif (gambar 5.1a) sebagai rasio gaya yang ditransmisikan ke pondasi terhadap gaya getaran yang dihasilkan oleh mesin itu sendiri. Sedangkan dalam kasus isolasi tipe pasif (gambar 5.1b), *transmissibility* diartikan sebagai rasio amplitudo instrumen yang sensitif terhadap amplitudo alasnya. Rumus untuk *transmissibility* kedua kasus diatas adalah ;

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\eta^2 \xi^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4\eta^2 \xi^2}} \quad (5.1)$$

dimana  $\eta$  adalah rasio frekuensi, dan  $\xi$  adalah faktor redaman.

Variasi *transmissibility* dengan redaman dan rasio frekuensi ditunjukkan dalam grafik 5.1 berikut ;



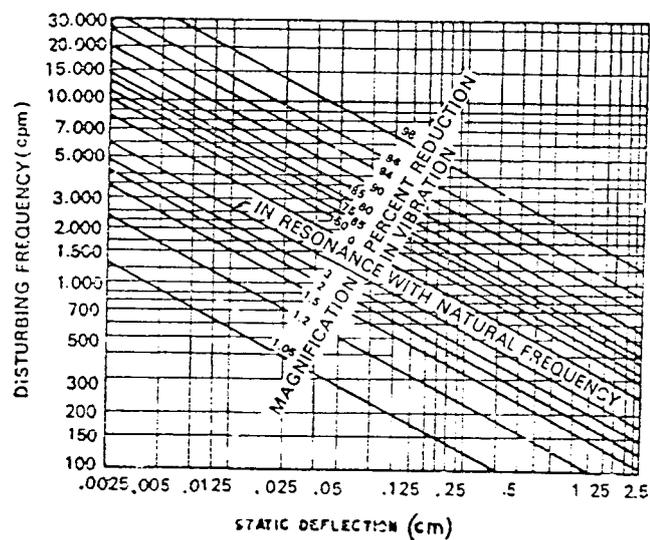
Grafik 5.1: Hubungan *Transmissibility* ( $T$ ) dan Rasio Frekuensi ( $\eta$ )  
(Srinivasulu,1976)

Jika tingkat redaman terlalu kecil bisa diabaikan, maka rumus sederhana untuk *transmissibility* dapat digunakan, yaitu :

$$T = \left| \frac{1}{1 - \eta^2} \right| = \left| \frac{f_n^2}{f_m^2 - f_n^2} \right| \quad (5.2)$$

Dari hubungan diatas bahwa dengan nilai  $\eta$  yang lebih besar ( $\eta > \sqrt{2}$ ), maka *transmissibility*nya akan berkurang. Untuk isolasi yang efektif, nilai  $\eta$  diambil setinggi mungkin. Ini berarti bahwa sistem frekuensi alam terisolasi dibuat serendah mungkin, dalam hubungan ke frekuensi penekan. Dapat juga dilihat dari grafik 5.1 diatas untuk nilai  $\eta < \sqrt{2}$  *transmissibility* akan lebih besar dari satu, yang mana ini tidak layak. Disarankan bahwa rasio frekuensi kurang lebih sama dengan dua dalam semua kasus isolasi getaran (Srinivasulu, 1976)

Grafik 5.2 memberikan data yang berguna untuk masalah isolasi. Data ini diperoleh dari persamaan 5.2 dengan menempatkan  $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}}$ , dimana  $\delta$  adalah sistem defleksi statis.



Grafik 5.2: Efisiensi Isolasi untuk Sistem *Resiliently Mounted*  
(Srinivasulu, 1976)

Kemudian *transmissibility*nya dirumuskan sebagai berikut;

$$T = \frac{1}{(2\pi f_m)^2 \frac{\delta}{g} - 1} \quad (5.3)$$

Solusi untuk  $f_m$  dalam *cpm*, berikut persamaan yang diperoleh :

$$f_m = 300 \sqrt{\frac{1}{\delta} \left( \frac{1}{T} + 1 \right)} \quad (\delta \text{ dalam cm}) \quad (5.4)$$

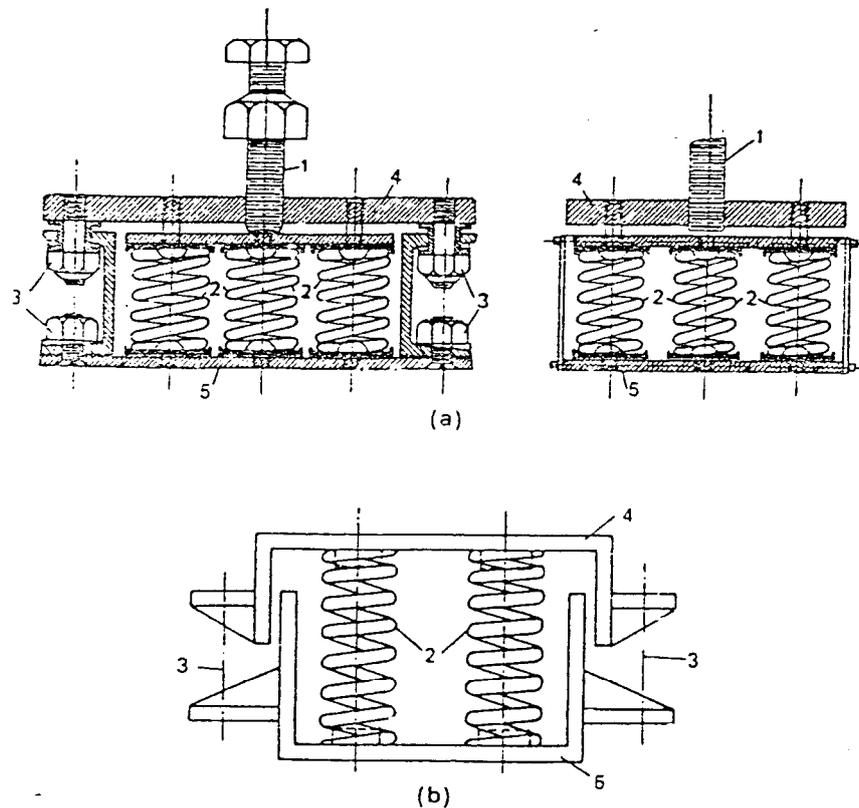
yang mana dapat juga ditulis sebagai berikut :

$$f_m = 300 \sqrt{\frac{1}{\delta} \left( \frac{2-R}{1-R} \right)} \quad (5.5)$$

dimana  $R = (1 - T)$  mewakili reduksi relatif dari getaran yang ditransmisikan.

## 5.2 Metode Isolasi dalam Pondasi Mesin

Srinivasulu (1976) menyatakan bahwa berat dari pondasi blok dipercayai akan memberikan isolasi yang cukup memadai untuk melawan getaran yang dihasilkan oleh beroperasinya mesin yang berada di atasnya. Konsep ini menyarankan formula empiris untuk berat dari pondasi blok dalam hubungannya terhadap kapasitas atau berat mesin itu sendiri. Kemudian *felt* layak untuk tempat mesin di atas pondasi blok yang ditempatkan dalam kolam perkuatan beton yang diisi dengan bahan isolasi. Untuk memberikan isolasi yang efektif, mesin atau pondasinya di pasang pada medium isolasi yang cocok. Bentuk berbeda dari media isolasi tersedia dalam praktik komersial. *Rubber carpet* di pasang dari pola berbeda yang tersedia. Pegas *Steel helical* secara luas dipakai dalam praktik. Dua bentuk pemasangan lilitan pegas yang digunakan untuk mendukung pondasi mesin ditunjukkan dalam gambar 5.2 berikut (isolasi ini ditempatkan langsung antara alas mesin dan lantai) :



Gambar 5.2: Dua Bentuk Pemasangan Lilitan Pegas – (1) *Restraining Anchor Bolt*,  
(2) *Springs*, (3) *Assembly Bolts*, (4) *Upper Casing*, (5) *Lower Casing*.

(Srinivasulu, 1976)

### 5.3 Isolasi dalam Pondasi Mesin

Terjadinya resonansi dan efek akibat meningkatnya amplitudo getaran merupakan salah satu sumber *trouble* dalam pondasi mesin. Kenyataan kesalahan selama desain berdasarkan pada perkiraan yang kurang teliti dari parameter desain seperti kekakuan media pendukung dan gaya tak seimbang dalam mesin. Ketinggian susunan air tanah terkadang bertanggung jawab juga pada penyebaran getaran yang ekseesif. Jika level susunan air muncul diatas level dasar pondasi, getarannya terasa semakin besar. Berikut adalah beberapa metode isolasi getaran dalam pondasi mesin (Srinivasulu, 1976) :

### **a. Perimbangan Beban *Exciting***

Cara terbaik untuk mereduksi getaran adalah dengan menjaga (memperbaiki) sumber getaran itu sendiri. Dalam mesin tipe rotari, kemungkinan untuk perimbangan secara lengkap gaya pengeksitasi dalam arah tegak lurus terhadap gerakan piston dan sebagian searah dengan gerakan piston. Efisiensi tertentu metode perimbangan tergantung pada tipe mesin dan getaran alamnya. Sebagai contoh, pada kasus mesin torak horisontal, bahaya getaran itu terjadi dalam arah *sliding* (searah sumbu piston) dan *rocking* di bidang vertikal. Metode perimbangan tidak membutuhkan penyelangan yang panjang dalam operasional mesin. Penyelangan hanya terhadap waktu yang diperlukan untuk tahanan berat pondasi.

### **b. Stabilisasi Tanah**

Stabilisasi tanah menambah kekakuan alas dan karena itu, meningkatkan frekuensi alam pondasi yang bertumpu langsung diatas tanah. Tetapi, mungkin hanya untuk kasus tanah berpasir yang memakai stabilisasi *chemical* atau semen. Lebih jauh, metode ini tidak melibatkan penyelangan yang diperpanjang dari bekerjanya mesin.

Getaran alam menentukan batas daerah stabilisasi tanah. Untuk pondasi yang di kenai getaran *rocking*, hanya bagian tanah yang dekat dengan sisi pondasi membutuhkan distabilisasi pada kedalaman tidak kurang dari 2 m.

### **c. Menggunakan Ukuran Struktur**

Ukuran struktur yang sesuai juga dipakai untuk mengubah frekuensi alam pondasi dan untuk menjamin dikehendaknya batas keamanan dari frekuensi operasional mesin. Pemilihan ukuran struktur tergantung pada getaran alam dan

rasio frekuensi alam pondasi terhadap frekuensi operasional mesin. Berikut adalah kemungkinan ukuran struktur yang dapat dipakai (Srinivasulu, 1976).

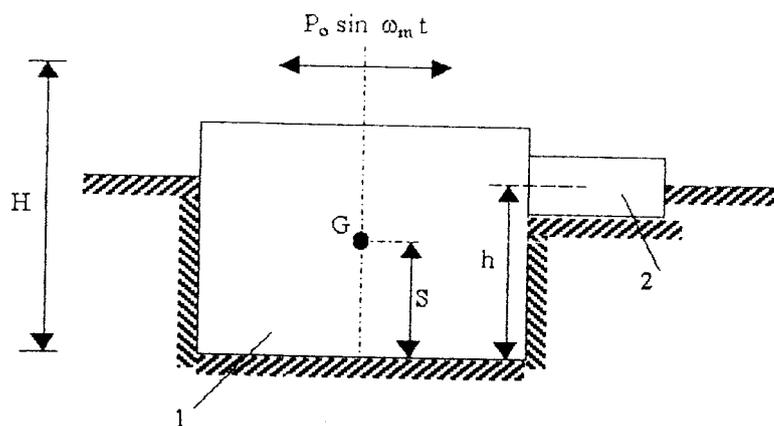
i. Meningkatkan Area Dasar atau Masa Pondasi

Jika frekuensi operasional mesin kurang dari frekuensi alam, ukuran struktur langsung untuk meningkatkan frekuensi alam pondasi. Tujuan ini dapat dicapai dengan memperbesar luas alas pondasi.

Untuk pondasi yang dibawah ukuran (*under-tuned*) yang frekuensi alamnya lebih rendah daripada frekuensi operasional, tujuan dimaksud diselesaikan dengan meningkatkan masa pondasi tanpa kelihatan peningkatan *area* yang kontak dengan tanah.

ii. Menggunakan *Slab* yang Ditahan ke Pondasi

Gambar 5.3 menunjukkan pondasi dengan *slab* penahan. Ukuran *slab* ini dipilih berdasarkan amplitudo getaran dalam mode *rocking* sistem pondasi-*slab* yang mampu mereduksi sampai batas yang dikehendaki.



Gambar 5.3: Menggunakan *Slab* Penahan – (1) pondasi, (2) *Slab* Penahan

(Srinivasulu, 1976)

Merujuk ke gambar 5.3, persamaan yang terjadi untuk gerakan getaran paksa dalam mode *rocking* adalah ;

$$\left(\varphi_o + m_1 h^2\right) \ddot{\theta} + \left(C_\theta I - WS + h^2 C_\tau A_1\right) \theta = P_o H \sin \omega_m t \quad (5.6)$$

dimana  $m_1$  adalah masa yang ditahan *slab* dan  $A_1$  luas alasnya.

Untuk amplitudo dan frekuensi getaran *rocking* dirumuskan sebagai berikut:

$$c_\theta = \frac{P_o H}{\left(\varphi_o + m_1 h^2\right) \left(\omega_\theta^2 - \omega_m^2\right)} \quad (5.7a)$$

dan

$$\omega_\theta^2 = \frac{\left(C_\theta I - WS + h^2 C_\tau A_1\right)}{\left(\varphi_o + m_1 h^2\right)} \quad (5.7b)$$

*Slab* yang efektif untuk mengubah frekuensi alam dan mereduksi amplitudo asal sistem, berikut *inequalities* yang dipakai :

$$\omega_x \neq \omega_\theta^o \quad (5.8a)$$

$$\alpha_\theta < \alpha_\theta^o \quad (5.8b)$$

Pangkat '<sup>o</sup>' menunjukkan nilai yang berhubungan dengan situasi ketika *slab* tidak berada sebagai bagian sistem.

Nilai  $\alpha_\theta^o$  dan  $\omega_\theta^o$  diperoleh dari persamaan 5.7, dengan menghilangkan batas termasuk ke *slab*. Berikut hasil hubungan persamaan 5.8a dan 5.8b setelah substitusi.

$$\frac{C_\tau A_1}{m_1} \neq \frac{C_\theta I}{\varphi_o} \quad (5.9a)$$

dan

$$\frac{\alpha_\theta}{\alpha_\theta^o} = \frac{1}{1 + \frac{h^2 C_\tau A_1}{C_\theta I}} < 1 \quad (5.9b)$$

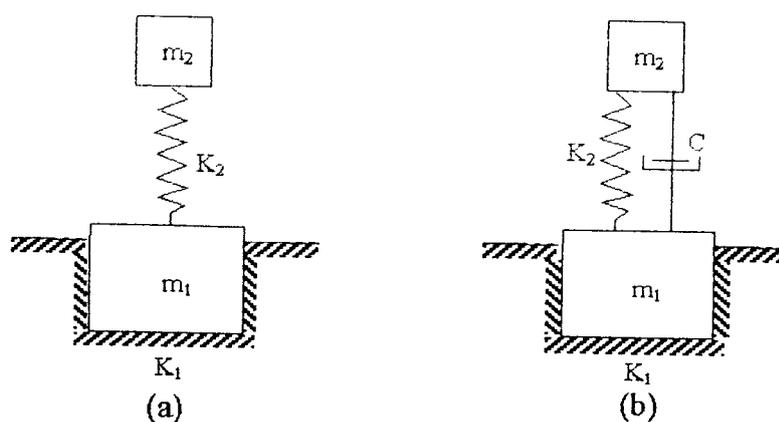
Dari persamaan (5.9a) disarankan ukuran *slab* sebaiknya dipilih frekuensi alam pada translasi horisontal tidak sama dengan frekuensi *rocking* getaran pondasi. Untuk desain yang memuaskan dari persamaan (5.9b),  $h$  dan  $C_t A_1$  sebaiknya dibuat sebesar mungkin. Dan *slab* sebaiknya ditempatkan sedekat mungkin ke level dasar (*ground level*) serta frekuensi alam getaran horisontal.

### iii. Menggunakan Bantuan Sistem Masa Pegas

#### a. Penetrasi getaran

Salah satu metode untuk mereduksi getaran eksessif pondasi yang ditahan berdasarkan desain masa bantu  $m_2$  oleh pegas dengan kekakuan  $K_2$  dalam mode termaksud (gambar 5.4a). Anggapan bahwa sistem utama – termasuk masa pondasi  $m_1$  yang bertumpu pada tanah (atau tumpuan elastis lainnya) dengan kekakuan  $k_1$  – berlaku sebagai sistem kebebasan berderajat tunggal, dan adalah dalam resonansi

dengan kecepatan mesin yang didukung, yaitu :  $\omega_m = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}}$



Gambar 5.4: Menggunakan Sistem Masa Bantu untuk Isolasi Getaran

(a) Tanpa Redaman, (b) Dengan Redaman (Srinivasulu, 1976)

Parameter sistem bantu, yaitu masa  $m_2$  dan kekakuan  $K_2$ , kemungkinan dipilih getaran dari sistem utama yang secara lengkap di eliminir. Sistem ini sangat menolong, namun demikian, kemungkinannya hanya jika frekuensi *exciting* ( $\omega_m$ ) adalah bernilai konstan.

Bila sistem bantu ditambahkan ke sistem utama, hasilnya sistem akan memiliki dua derajat kebebasan, dan *displacement* pada sistem utama adalah nol

bila :

$$\omega_{n2} = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}} = \omega_m \quad (5.10)$$

Dan amplitudo masa  $m_2$  dirumuskan sebagai berikut :

$$a_2 = \frac{P_o}{m_2 \omega_m^2} \quad (5.11)$$

dari persamaan 5.10 didapat ;

$$K_2 = m_2 \omega_m^2 \quad (5.12)$$

Untuk desain sistem bantu, berikut langkah-langkah yang dipakai (Srinivasulu, 1976) :

1. Pilih  $m_2$  sedemikian bahwa  $a_2$  masih dalam batas yang patut mempertimbangkan ruang yang tersedia untuk gerakannya (gunakan rumus 5.11).
2. Menentukan  $K_2$  dari persamaan 5.12.
3. Dengan mengetahui  $K_2$ ,  $m_2$  dan  $\omega_m$ , bisa direncanakan sistem masa pegas bantu yang sesuai.

Prosedur diatas diaplikasikan untuk setiap mode getaran *uncoupled* (translasi sepanjang atau rotasi mengelilingi sumbu vertikal). Kebutuhan untuk memakai sistem masa bantu muncul hanya bila sistem utama beresonansi, yaitu bila

$\frac{K_1}{m_1} = \omega_m$ , dan dari pertimbangan untuk melengkapi persamaan 5.10, untuk kasus

khusus, yaitu bila  $\frac{K_1}{m_1} = \frac{K_2}{m_2}$ .

Jika frekuensi operasional mesin tidak konstan atau bervariasi dalam batas yang lebar, kemungkinan tidak bisa mendesain “masa bantu penetral getaran” jika tidak mungkin untuk mendesain yang sistem demikian, maka frekuensi alam ( $\bar{\omega}_{n2}$ ) diubah bersesuaian dengan frekuensi operasional mesin ( $\omega_m$ ).

#### b. Peredam Getaran

Jika frekuensi *exciting* tidak konstan, tidak mungkin untuk mereduksi getaran dengan menggunakan prinsip penetral getaran. Tetapi, dengan dikenalkannya peredam ( $C$ ) dalam sistem bantu, kemungkinan untuk menjaga gerakan sistem utama dalam batas yang ditoleransi (gambar 5.4b)

i. Frekuensi sistem bantunya ( $\bar{\omega}_{n2}$ ) dirumuskan sebagai berikut :

$$\bar{\omega}_{n2} = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}} = \frac{1}{1 + \alpha} \sqrt{\frac{K_1}{m_1}} \quad (5.13)$$

ii. Redaman optimum yang dapat diberikan untuk sistem bantu adalah :

$$\xi = \frac{C}{C_c} = \sqrt{\frac{3\alpha}{8(1+\alpha)^3}} \quad (5.14)$$

dimana  $\alpha = m_2 / m_1$  dan  $C_c = 2 \sqrt{K_2 m_2}$

iii. *Displacement* maksimum  $a_{\max}$  pada sistem utama dirumuskan oleh :

$$a_{\max} = a_{st} \sqrt{\frac{1+2}{\alpha}} \quad (5.15)$$

dimana  $a_{st} = P_o / K_1$

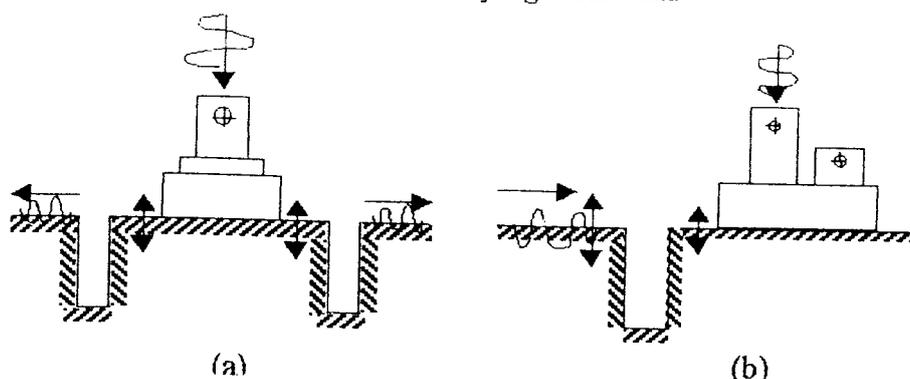
Prosedur untuk desain peredamnya adalah sebagai berikut ( Srinivasulu, 1976) :

- i. Pilih masa bantu  $m_2$  dari persamaan 5.15 dengan demikian *displacement* maksimum ( $a_{max}$ ) masih dalam batas yang ditoleransi. Persamaan 5.13 dan 5.14 memberikan kekakuan pegas  $K_2$  dan peredam  $\xi$ .
- ii. Redaman diberikan dengan desain *dash-pot* liat yang cocok untuk hasil koefisien  $C$  yang diperoleh dari persamaan 5.14.

#### d. Isolasi dengan *Trench Barriers*.

Telah disarankan penggunaan parit (*trench*) sebagai cara untuk mereduksi lajunya transmisi getaran (gambar 5.5). Pengalaman menunjukkan bahwa *trenches* tidak sesuai untuk aplikasi umum dan kurang efektif, khususnya untuk isolasi getaran berfrekuensi rendah. Menurut Barkan (1962) untuk isolasi yang efektif, kedalaman *trench* sebaiknya kurang dari sepertiga panjang gelombang getaran.

Dengan demikian, jika kecepatan getaran dalam tanah tertentu adalah 200 *m/sec* dan frekuensinya 10 *cps*, panjang gelombangnya menjadi 20 m dan kedalaman *trench*nya paling tidak 7 m. *Trenches* yang diisi campuran air dengan *bentonite* menunjukkan karakteristik isolasi yang lebih baik.



Gambar 5.5 Isolasi Getaran dengan *Trenches* – (a) Aktif, (b) Pasif

(Srinivasulu, 1976)

#### e. Isolasi dalam Gedung

Pemisahan vertikal antara bagian gedung akan menolong dalam mencegah getaran karena penempatan mesin di salah satu ruangan gedung dari yang menyebabkan *trouble* di lain tempat. Penambahan kekakuan diberikan ke lantai yang mampu mereduksi getaran setempat. Tetapi metode ini digunakan bila frekuensi alam lantai lebih tinggi frekuensi operasional mesin yang ditempatkan di atasnya.

### 5.4 Properti Bahan Isolasi

#### a. Gabus (*cork*)

Srinivasulu (1976) bahwa *cork* adalah media isolasi yang cocok untuk melawan getaran, kejutan, dan suara. *Cork* mempunyai densitas yang rendah, kompresibilitas dan impermeabilitas yang tinggi. Umumnya digunakan dalam bentuk *slab* yang dibuat dengan mempressing partikel *cork* dibawah tekanan tinggi dan selanjutnya dipanggang dengan uap. *Slab gabus (cork)* ditempatkan langsung dibawah alas mesin atau dibawah pondasi beton. Kekakuan *cork* relatif besar dan luas permukaan yang diperlukan dalam banyak aplikasi sangat kecil. Konsekuensinya, *cork* diaplikasikan dalam bentuk bantalan berjarak (*spaced pads*). *Cork* relatif sempit *range* kekakuannya dan tersedia dalam bentuk *slab* yang mampu menahan beban kompresi.

Nilai rendahnya densitas *Cork* bervariasi dari 2 sampai 4  $g/cm^3$ . Maksimum beban yang direkomendasikan adalah ekuivalen dengan tekanan 2  $kg/cm^2$  untuk densitas rendah dan 4  $kg/cm^2$  untuk *cork* berdensitas tinggi.

*Logarithmic decrement* ( $\Delta$ ) *cork* akibat kompresi diperkirakan 0,4 dan ini dihubungkan ke rasio redaman ( $\xi$ ) sampai 6 persen. *Cork* kehilangan efisiensinya

jika dibiarkan berekspansi ke semua arah. Oleh karenanya lembaran *cork* perlu dijaga dalam bingkai baja untuk mencegah *lateral expansion*. Properti lenting (*resilient*) dari *cork* menjadi makin buruk bila terjadi kontak dengan air atau bahan pelumas (*oil*).

#### b. *Felt*

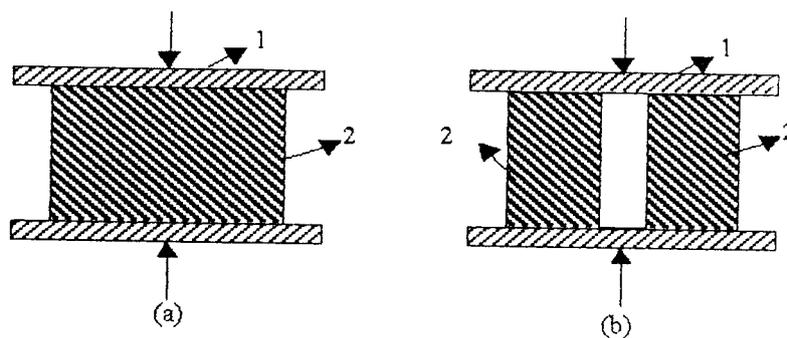
*Felt* dihasilkan pabrik dengan material fiber melalui proses mekanis dan aksi kimia. *Felt* terdiri atas *wool* atau fiber sintetis lain. *Felt* digunakan dalam bentuk bantalan kecil yang dipotong sesuai *area* dan ditempatkan dibawah mesin untuk mendukungnya. Bahan ini umumnya dilekatkan antara mesin dan lantai. Frekuensi alam sebagai fungsi intensitas beban untuk bermacam densitas *felt* disediakan oleh pabrik *felt*. Kurva gaya defleksi bantalan felt akibat kompresi adalah linier dengan besarnya sampai 25 persen ketebalannya. Kekuatan kompresif *felt* sekitar  $80 \text{ kg/cm}^2$  dan modulus elastisitasnya  $800 \text{ kg/cm}^2$ . Bila digunakan dalam waktu yang panjang dan dibawah kondisi berganti-ganti antara basah dan kering, *felt* akan kehilangan properti elastisnya (Srinivasulu, 1976).

#### c. Karet (*Rubber*)

Srinivasulu (1976) bahwa pegas karet mempunyai keuntungan tahanan kompresi sebaik geser. Karakteristik karet akibat kompresi tergantung pada rasio beban yang dipikul *area* terhadap ekspansi lateral *area*. Rasio ini ditandai sebagai "area rasio" ( $A_r$ ). Untuk blok segi empat panjang dengan ukuran  $l$ ,  $b$ , dan  $h$ , dirumuskan sebagai berikut :

$$A_r = \frac{lb}{2h(l+b)} \quad (5.16)$$

Rasio *area* bantalan karet sama dengan persentasi defleksi ketebalannya bila mendukung beban yang berintensitas tekanan sama (beban per *unit area*). Dua bentuk bantalan karet yang digunakan dalam kompresi ditunjukkan gambar 5.6. Gambar 5.6b rasio *area* dapat tereduksi oleh peningkatan *area* ekspansi lateral dengan lubang di tengah. Konsekuensinya, bantalan karet yang ditunjukkan dalam gambar 5.6b kekakuannya berkurang dibandingkan gambar 5.6a.



Gambar 5.6 : Bantalan Karet dalam Tekanan – (1) *Metal Plate*, (2) *Rubber Prism*  
(Srinivasulu, 1976)

Deformasi maksimum ( $\delta$ ) terhadap tinggi blok karet ( $h$ ) diambil 0,2 untuk kompresi dan 0,4 untuk geser. Tegangan yang diijinkan untuk kompresi  $8 \text{ kg/cm}^2$  dan untuk geser  $3 \text{ kg/cm}^2$  pada karet yang mempunyai kekuatan geser  $40^\circ$ . Pada karet dengan kekuatan geser (*shore hardness*)  $70^\circ$  kekuatannya untuk kompresi meningkat sampai  $16 \text{ kg/cm}^2$  dan untuk geser sampai  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

Tabel 5.1 berisi properti (*shore hardness*) campuran karet alam. Kekakuan geser ( $K_s$ ) blok karet dengan ketebalan  $h$  dan luas tampang melintang  $A$  dapat diperoleh dari modulus geser  $G$  menggunakan hubungan :

$$K_s = \frac{GA}{h} \quad (5.17)$$

Formula di atas (pers. 5.7) diasumsikan rasio tinggi terhadap lebar adalah cukup kecil untuk mengabaikan deformasi selama *bending*.

Tabel 5.1  
Properti Campuran Karet Alam (Lindley, 1970)

Kuat Geser (S) <sup>o</sup>	Modulus Geser (G) kg/cm <sup>2</sup>	Modulus Young's (E) kg/cm <sup>2</sup>	Modulus Bulk (B) kg/cm <sup>2</sup>	$\alpha$
40	4,59	15,29	10193,63	0,85
45	5,50	18,35	10193,68	0,80
50	6,52	22,43	10499,49	0,73
55	8,26	33,13	11111,11	0,64
60	10,81	45,36	11722,73	0,57
65	13,97	59,63	12334,35	0,54
70	17,64	74,92	12945,97	0,53

Kekakuan bantalan karet akibat kompresi ( $K_c$ ) dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{1}{K_c} = \frac{h}{A} \left[ \frac{1}{E (1 + 2 \alpha A_r^2)} + \frac{1}{B} \right] \quad (5.18)$$

dimana E, B dan  $\alpha$  diberikan dalam tabel 5.1

#### d. Pegas Baja (*Steel Springs*)

Pegas baja mempunyai keuntungan lebih teliti dari material lain yang disebutkan sebelumnya. Ini memungkinkan desain yang lebih akurat pada isolator pegas dan oleh karena itu lebih disukai dalam praktik. Pegas sering digunakan secara berkelompok (lihat gambar 5.2). Adapun properti pegas sebagai berikut :  $d$  adalah diameter kawat pegas,  $D$  adalah diameter lilitan pegas, dan  $G$  adalah modulus geser material kawat (untuk baja,  $G = 8 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ). Faktor kekakuan lilitan pegas dirumuskan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976) :

i. Kekakuan vertikal ( $K_s$ ) pada satu pegas :

$$K_s = \frac{1}{n} \frac{G d^4}{8 D^3} \quad (5.19)$$

Jika ada  $N$  pegas dalam lilitan, maka hasil kekakuan vertikal dirumuskan dengan  $N.K_s$ . Beban yang diijinkan ( $P$ ) pada lilitan pegas dirumuskan :

$$P = \frac{\tau \pi d^3}{8 \alpha D} \quad (5.20)$$

dimana  $\alpha$  adalah faktor yang dirumuskan dalam :

$$\alpha = 1 + 1,25 \left( \frac{d}{D} \right) + 0,875 \left( \frac{d}{D} \right)^2 + \left( \frac{d}{D} \right)^3 \quad (5.21)$$

dan  $\tau$  adalah tegangan geser yang diijinkan dalam material pegas.

ii. Kekakuan horisontal ( $K_x$ ) pada satu pegas

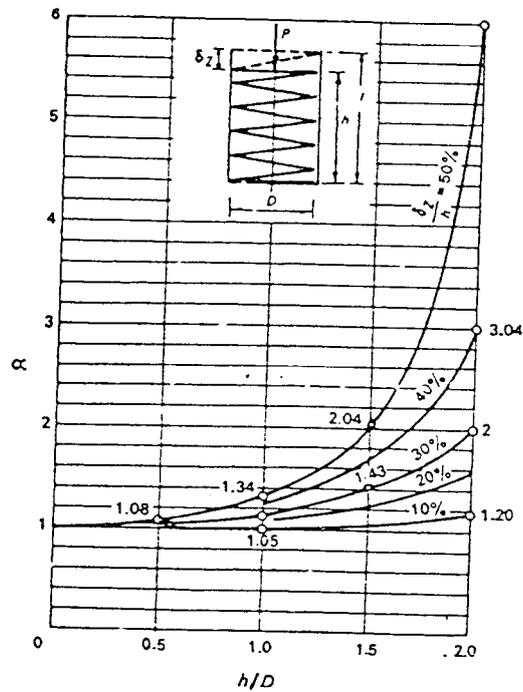
$$K_x = K_s \left[ \frac{1}{0,385 \alpha \left\{ 1 + \frac{0,77}{D^2} h^2 \right\}} \right] \quad (5.22)$$

dimana  $\alpha$  adalah koefisien yang diperoleh dari grafik 5.3 untuk nilai yang diketahui dari  $h/D$  dan  $\delta_2/h$ ,  $h$  adalah tinggi lilitan pegas, dan  $\delta_2$  adalah kompresi statis dari lilitan pegas dibawah beban vertikal. Jika ada  $N$  pegas dalam lilitan (*coil*) maka hasil kekakuan horisontal adalah  $N.K_x$ .

iii. Kekakuan ( $K_\theta$ ) melawan rotasi dalam bidang vertikal untuk kelompok pegas

$$K_\theta = \frac{I' G d^4}{n 8 D^3} = I'_{X \text{ atau } Y} K_s \quad (5.23)$$

dimana  $I'$  adalah momen inersia kelompok isolasi pegas yang mendukung sumbu putar  $x$  atau  $y$ .



Grafik 5.3 : Faktor  $\alpha$  sebagai fungsi  $h/d$  dan  $\delta_2/h$  untuk pegas baja (Major,1962)

iv. Kekakuan torsional ( $K_\psi$ ) kelompok pegas

$$K_\psi = \frac{I_z' G d^4}{n 8 D^3} \left[ \frac{1}{0,385 \alpha \left\{ 1 + \frac{0,77}{D^2} h^2 \right\}} \right] \quad (5.24)$$

dimana  $I_z'$  adalah momen inersia kelompok pegas.

## BAB VI

### DESAIN PONDASI MESIN

#### 6.1 Desain Nilai Amplitudo yang Diijinkan untuk Getaran Pondasi

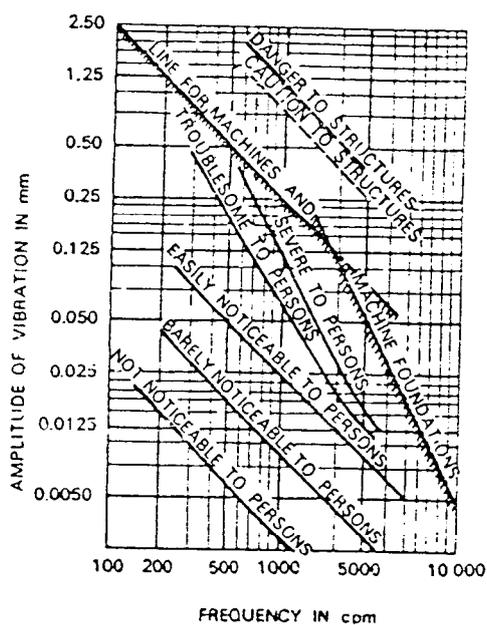
Banyak tipe mesin torak termasuk kedalam kelompok mesin tak seimbang yang berbahaya respeknya terhadap getaran. Mesin ini biasanya dioperasikan relatif rendah peningkatan kecepatannya yang memungkinkan getaran berkembang dalam *adjoining* struktur.

Amplitudo getaran pondasi yang besar, akan membahayakan pada *adjoining* struktur. Jika amplitudo getaran besar, kemungkinan pondasi akan kehilangan stabilitas dan mengalami penurunan yang tidak seragam, yang akibatnya membahayakan normalitas kerja mesin (Barkan, 1962).

Penetapan batas nilai amplitudo getaran pondasi yang diijinkan, biasanya di spesifikasikan oleh pabrik pembuat mesin. Amplitudo yang diijinkan pada pondasi mesin ditentukan oleh relativitas pentingnya mesin dan sensitifitas struktur di sekitarnya terhadap getaran. Bila pabrik mesin tidak menyediakan data amplitudo yang *permissible*, dapat menggunakan data dalam grafik 6.1 yang disarankan oleh Richart (1970) dan yang diajukan oleh Barkan (1962) dalam tabel 6.1 sebagai desain awal.

Untuk *equipment* pondasi yang sensitif, kriteria desainnya ditetapkan oleh pabrik mesin. Sedangkan untuk instalasi yang *equipmentnya* itu sendiri bukan sumber getaran, perlu untuk mengevaluasi getaran sekeliling di lapangan dan

memberikan isolasi yang cocok dalam petunjuk yang berisi pergerakan amplitudo dengan batas yang akseptabel.



Grafik 6.1: Batas yang Diijinkan untuk Amplitudo Getaran Vertikal  
(Richart, 1970)

Tabel 6.1

Nilai yang Diijinkan untuk Amplitudo Getaran

(Barkan, 1962)

Tipe Mesin	Amplitudo Yang Diijinkan (cm)
1. Mesin berkecepatan rendah (500 rpm)	0,02 – 0,025
2. Pondasi <i>hammer</i>	0,1 – 0,12
3. Mesin berkecepatan tinggi:	
a. 300 rpm	
i. Getaran vertikal	0,002 – 0,003
ii. Getaran horisontal	0,004 – 0,005
b. 1500 rpm	
i. Getaran Vertikal	0,004 – 0,006
ii. Getaran horisontal	0,007 – 0,009

## 6.2 Hal-hal yang Perlu Diperhatikan dalam Desain

Pondasi dibawah mesin torak biasanya didesain sebagai blok masif. Pada bentuk pondasi yang masif tersebut, maka dalam analisis getarannya dipertimbangkan sebagai bodi kaku dan untuk digunakan dalam perhitungan frekuensi serta amplitudo.

Kondisi utama yang diobservasi bila mendesain pondasi mesin adalah seperti berikut : dimensi pondasi yang di pilih semimum mungkin dan diusahakan agar amplitudo getaran pakasanya tidak melampaui batas yang diijinkan.

Jika pondasi dibangun diatas tanah dasar asli, maka kedalamannya tidak boleh kurang dari *frost penetration*. Sedangkan untuk mengurangi transmisi getaran yang ditimbulkannya, maka kedalaman pondasi mesin tidak boleh kurang daripada kedalaman *adjoining* dinding dan kolom.

Untuk mencapai penurunan yang seragam pada pondasi, direkomendasikan menempatkan titik pusat gravitasi sistem (pondasi dan mesin) pada garis vertikal yang sama dengan titik pusat *area* pondasi yang kontak dengan tanah. Setiap kasus tentang eksentrisitas distribusi masa, maka tidak boleh melampaui 5 persen dari panjang samping *area* kontaknya (Barkan, 1962).

Sedangkan untuk mengurangi transmisi getaran terhadap bagian *adjoining* gedung, perlu untuk meniadakan *gap* antara pondasi pada mesin tidak seimbang dan *adjoining* struktur (*footings*, dinding, lantai). Dalam peraturannya, pondasi mesin tidak diijinkan untuk mendukung bagian lain gedung atau mekanisme yang tidak ada hubungannya dengan *equipment* mesin. Jika kondisinya tidak memungkinkan untuk menghindari bagian yang tidak perlu dari gedung pada pondasi mesin, aturan dalam

menghubungkannya adalah dengan memberikan *gaskets* (isolasi) yang terbuat dari karet, gabus, *felt* atau bahan isolasi lainnya.

Jika beberapa mesin di instal dalam tempat yang sama dan bila jarak antara mesin-mesin ini *comparable* terhadap dimensi pondasi, maka dalam tanah lunak, direkomendasikan untuk menempatkan pondasi dibawah mesin sejenis diatas alas yang cukup tebal. Kekakuan alas yang dipilih ini, sebisa mungkin deformasinya kecil jika dibandingkan dengan amplitudo getarannya. Hanya bila kelompok pondasi mesin diinstal pada alas yang sama, maka diperlakukan sebagai blok kaku yang bertumpu pada tanah elastis. Untuk nilai desain amplitudo getaran yang diijinkan berkisar antara 25 – 30 % (Barkan, 1962).

Untuk menghindari miringnya poros induk mesin, maka tahanan eksternalnya ditempatkan pada pondasi mesin yang sama. Petunjuk ini merujuk juga pada instalasi motor *coupled* langsung pada mesin torak seperti elektromotor atau generator.

Bila *area* kontak pondasi lebih besar, maka tekanan tanah yang direduksi menjadi lebih kecil dan frekuensi alam pondasinya semakin tinggi. Pentingnya pertimbangan ini untuk mesin berfrekuensi tinggi, termasuk paling banyak untuk mesin torak. Kesimpulannya, pondasi dibawah mesin berfrekuensi tinggi didesain dengan frekuensi alam yang lebih tinggi daripada frekuensi operasional mesin.

Frekuensi alam pondasi dipengaruhi oleh nilai absolut dari masa pondasi dan ruang distribusinya. Untuk masalah distribusi masa, didesain sekecil mungkin nilai momen inersianya yang ditentukan dengan respek ke sumbu utama terus melewati *area* kontak pondasi, sehingga dicapai tinggi pondasi yang seminimum mungkin.

### 6.3 Data untuk Desain Pondasi Mesin

#### a. Parameter Mesin

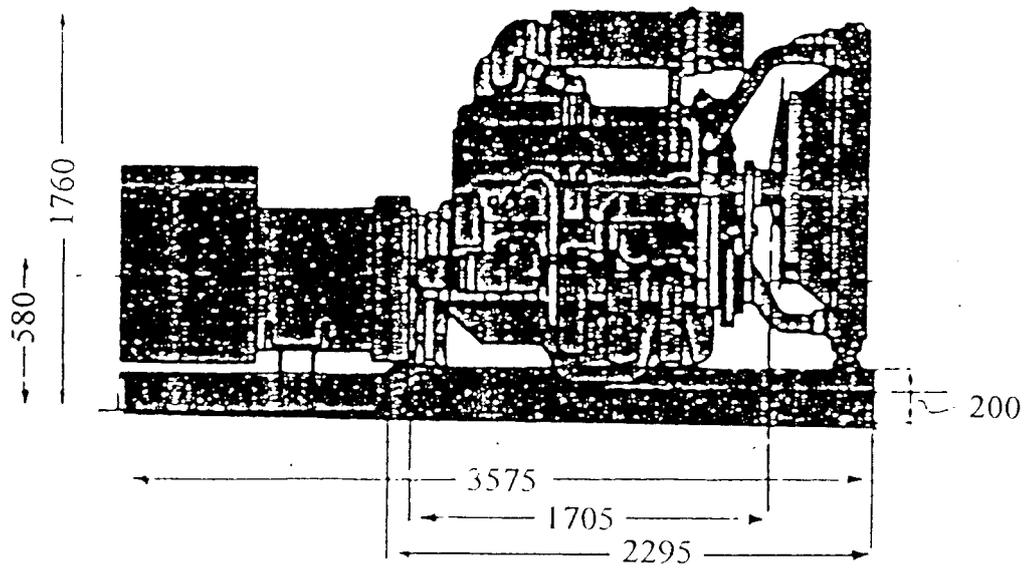
Mesin yang digunakan dalam desain, spesifikasinya diambil dari mesin Gen-set Hotel Radisson, Yogyakarta, dengan data-data sebagai berikut :

i. Model mesin	TAD 1630 G
ii. Merk	VOLVO PENTA
iii. Kecepatan operasional mesin ( $f_m$ )	1500 rpm
iv. Daya mesin	107 kw
v. Gaya pengaksinal ( $P_s$ )	20.4 T
vi. Berat Gen-set dan mesin ( $B$ )	3.325 T
vii. Gaya pengeksitali berakal setinggi 0,58 m diatas permukaan pondasi	
viii. Amplitudo yang diijinkan	0.007 cm (tabel 6.1)

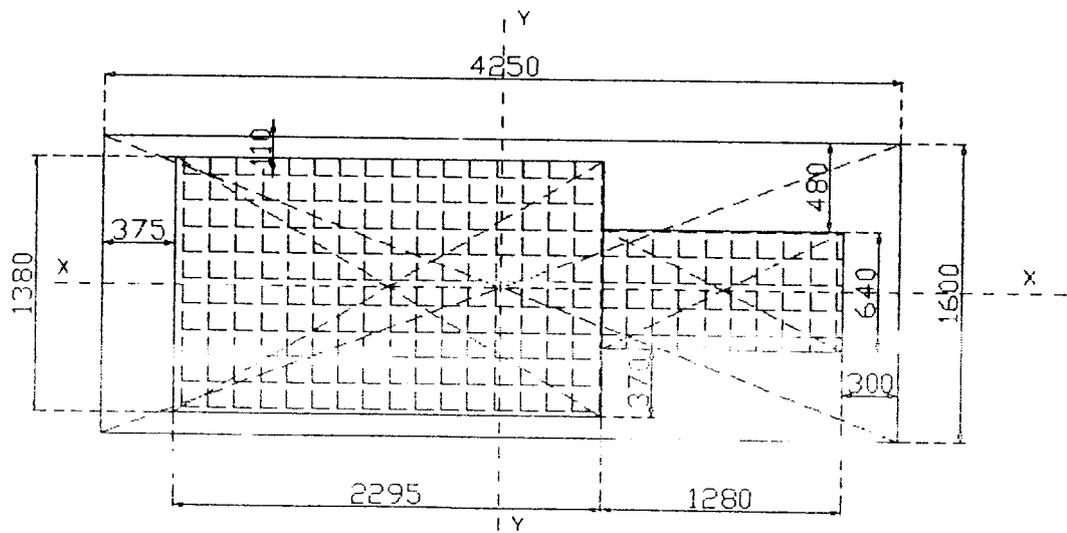
#### b. Parameter Tanah

Lokasi penempatan Gen-set direncanakan di Gedung Laboratorium Fakultas Teknologi Industri, UII, Yogyakarta, dengan data-data tanah sebagai berikut :

i. Jenis tanah	Lempung berpasir
ii. Kapasitas daya dukung tanah	$2,97 \text{ kg/cm}^2$
iii. Koefisien elastis tekaman seragam ( $C_v$ )	$5,6 \text{ kg/cm}^2$ (tabel 3.5)
iv. Koef. elastis tekaman tidak seragam ( $C_v$ )	$9,2 \text{ kg/cm}^2$ (tabel 3.5)
v. Koefisien elastis geser seragam ( $C_h$ )	$1,9 \text{ kg/cm}^2$ (tabel 3.6)
vi. Koef. elastis geser tak seragam ( $C_h$ )	$2,2 \text{ kg/cm}^2$ (tabel 3.6)



(a)



(b)

Gambar 6.1 : Pondasi untuk Mesin Gen-set

(a) Konfigurasi Mesin dan Pondasi, (b) Rencana Penempatan Mesin

(Semua Dimensi dalam mm)

Tabel 6.2 : Perhitungan Pusat Gravitasi dan Masa Momen Inersia

Elemen (i) Sistem Cb.6.1	Dimensi Elemen			Berat $W_i (t)$	Masa $m_i$ (t.sec/m)	Koordinat Pusat Gravitasi Mesin			Masa Momen Statis			Momen Inersia Elemen Sumbu y Yang Melewati Pusat Gravitasi Elemen			
	$l_{xi} (m)$	$l_{yi} (m)$	$l_{zi} (m)$			$x_i (m)$	$y_i (m)$	$z_i (m)$	$m_i x_i$	$m_i y_i$	$m_i z_i$	A	B	C	D
1	4,25	1,6	0,2	3,264	0,333	2,125	0,8	0,1	0,708	0,266	0,033	0,502	-0,119	0,362	0,048
2	2,295	1,38	1,76	2,6415	0,269	1,523	0,8	0,88	0,410	0,215	0,237	0,188	0,483	-0,081	0,065
3	1,280	0,64	1,16	0,6835	0,069	3,31	0,8	0,58	0,228	0,055	0,040	0,017	-1,304	-0,118	0,118
				6,589	0,671				1,364	0,536	0,310	0,707			0,231

Keterangan :

$$A = \frac{m_i}{12} (l_{xi}^2 + l_{zi}^2),$$

$$B = x_{oi} = (\bar{X} - x_i),$$

$$C = z_{oi} = (\bar{Z} - z_i),$$

$$D = m_i (x_{oi}^2 + z_{oi}^2)$$

## 6.4 PERHITUNGAN

Dari dimensi pondasi awal yang diajukan, stabilitas dinamisnya dicek dengan tahap perhitungan sebagai berikut :

### a. Pusat gravitasi

Merujuk pada tabel 6.2 dan gambar 6.1, koordinat  $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$  pusat gravitasi mesin dan pondasinya adalah :

$$\bar{X} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{1,346}{0,671} = 2,006 \text{ m}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} = \frac{0,536}{0,671} = 0,799 \text{ m}$$

$$\bar{Z} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = \frac{0,310}{0,671} = 0,462 \text{ m}$$

Eksentrisitas pusat gravitasi dengan respek ke titik pusat daerah alas:

$$\text{Eksentrisitas arah } x = \frac{(2,125 - 2,006)}{4,25} \times 100\% = 2,8\%$$

$$\text{Eksentrisitas arah } y = \frac{(0,8 - 0,799)}{1,6} \times 100\% = 0,0625\%$$

Eksentrisitas yang masih dalam batas diijinkan adalah 5% dari panjang pondasi (Srinivasulu, 1976).

### b. Parameter desain

$$\begin{aligned} \text{i. Masa pondasi } (m) &= \sum m_i \text{ (dari tabel 6.2)} \\ &= 0,671 \text{ t} \cdot \text{sec}^2/\text{m} \end{aligned}$$

- ii. Momen ( $M_y$ ) akibat gaya pengeksitasi ( $P_x$ ) yang bekerja pada ketinggian  $0,58m$

diatas pondasi :

$$\begin{aligned} M_y &= 20,4 \cdot (0,58 - 0,462) \\ &= 2,407 \text{ t.m} \end{aligned}$$

- iii. Frekuensi operasional mesin ( $f_m$ ) = 1500 rpm

$$\begin{aligned} \text{Frekuensi circular } (\omega_m) &= 2 \pi (f_m/60) \text{ sec}^{-1} \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 2 \pi (1500/60) \\ &= 157 \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

- iv. Momen inersia ( $I_y$ )

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{1}{12} \cdot l_{yi} \cdot l_{xi}^3 \\ &= \frac{1}{12} \cdot 1,6 \cdot 4,25^3 = 10,235 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- v. Masa momen inersia ( $\varphi_y$ ) seluruh sistem

$$\begin{aligned} \varphi_y &= \frac{1}{12} \sum m_i (l_{xi}^2 + l_{zi}^2) + \sum m_i (x_{oi}^2 + z_{oi}^2) \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 0,707 + 0,231 \quad (\text{dari tabel 6.2}) \\ &= 0,938 \text{ t.m.sec}^2 \end{aligned}$$

- vi. Masa momen inersia ( $\varphi_{oy}$ ) yang melewati titik pusat daerah alas

$$\begin{aligned} \varphi_{oy} &= \varphi_y + m \bar{z}^2 \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 0,938 + 0,671 \cdot (0,462)^2 \\ &= 1,081 \text{ t.m.sec}^2 \end{aligned}$$

- vii. Rasio ( $\alpha_y$ ), dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Rasio } \alpha_y &= \frac{\varphi_y}{\varphi_{oy}} \quad (\text{persamaan 4.9}) \\ &= \frac{0,938}{1,081} = 0,868 \end{aligned}$$

d. Amplitudo

Koefisien  $f(\omega_m^2)$  dari persamaan 4.19

$$\begin{aligned} f(\omega_m^2) &= m \varphi_y (\omega_{n1}^2 - \omega_m^2)(\omega_{n2}^2 - \omega_m^2) \\ &= 0,671 \cdot 0,938 (323,063 \cdot 10^3 - (157)^2)(56,1 \cdot 10^3 - (157)^2) \\ &= 59,03 \cdot 10^8 \end{aligned}$$

Amplitudo horisontal ( $a_x$ ) dirumuskan dalam persamaan 4.17

$$a_x = \left[ (C_\theta I_y - WS + C_\tau A_f S^2 - \varphi_y \omega_m^2) P_x + (C_\tau A_f S) M_y \right] \frac{1}{f(\omega_m^2)}$$

Substitusikan  $S = \bar{Z} = 0,462 \text{ m}$

$$\begin{aligned} a_x &= \left[ \begin{array}{l} (9,5 \cdot 10^3 \cdot 10,235 - 6,589 \cdot 0,462 \\ + 1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,462^2 - 0,938 \cdot 157^2) \cdot 20,4 \\ + (1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,462) \cdot 2,407 \end{array} \right] \frac{1}{59,03 \cdot 10^8} \\ &= 0,000268 \text{ mm} \end{aligned}$$

Amplitudo rotasional ( $a_{\theta y}$ ) dirumuskan dalam persamaan 4.18

$$\begin{aligned} a_{\theta} &= \frac{C_\tau A_f S}{f(\omega_m^2)} P_x + \frac{C_\tau A_f - m \omega_m^2}{f(\omega_m^2)} M_y \\ a_{\theta} &= \frac{1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,462}{59,03 \cdot 10^8} \cdot 20,4 + \frac{1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 - 0,671 \cdot (157)^2}{59,03 \cdot 10^8} \cdot 2,407 \\ &= 0,0000192 \text{ mm} \end{aligned}$$

Amplitudo pada level dasar

$$\begin{aligned} &= a_x - S \cdot a_{\theta y} && \text{(Srinivasulu, 1976)} \\ &= 0,000268 - 0,462 \cdot 0,0000192 \\ &= 0,000259 \text{ mm} \end{aligned}$$

Amplitudo horisontal pada pondasi bagian atas:

$$= a_x + (H - S) a_{ay} \quad (\text{persamaan 1.29})$$

$$= 0,000268 + (0,2 - 0,462) \cdot 0,0000192$$

$$= 0,0003 \text{ mm} = 0,07 \text{ mm (permissible)}$$

e. Gaya Dinamis (tabel 4.3)

Dianambil faktor kelelahan  $\xi = 3$  (Srinivasulu, 1976), maka gaya dinamis horisontalnya :

$$\begin{aligned} F_d &= \xi \cdot C_v \cdot A_f \cdot (a_x + S \cdot a_{ay}) \\ &= 3 \cdot 1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,000259 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,011 \end{aligned}$$

Momen dinamis

$$\begin{aligned} M_d &= \xi \cdot C_b \cdot I_y \cdot a_{ay} \\ &= 3 \cdot 9,5 \cdot 10^5 \cdot 10,235 \cdot 0,0000192 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,0056 \text{ tm} \end{aligned}$$

f. Cek tegangan tanah

Berat statis pondasi dan mesin ( $W$ ) = 6,589 t

Tegangan max. dan min. pada tanah dirumuskan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976):

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{W}{A'} + \frac{M_d}{I_y} (x - \bar{x}) \\ \sigma_{\max} &= \frac{6,589}{4,25 \cdot 1,6} + \frac{0,0056 (4,25 - 2,016)}{10,235} \\ \sigma_{\min} &= 0,97 \text{ tm}^2 < 29,7 \text{ tm}^2 \\ \sigma_{\min} &= 0,96 \text{ tm}^2 \end{aligned}$$

g. Desain struktur arah longitudinal

i. Beban statis :

$$\text{Intensitas reaksi tanah (pers. 2.22)} = \frac{W}{A_f} = \frac{6,585}{4,25 \cdot 1,6} = 0,97 \text{ t/m}^2$$

Tabel 6.3 berisi berat dari berbagai bagian pondasi blok (gambar 6.1). Berikut momen lengkung yang disebabkan beban statis dan tekanan tanah

$$(M_{st})_{xx} = \left[ \frac{W_m \pm F_d}{8} \right] [L - l] \quad (\text{Srinivasulu, 1976})$$

$$(M_{st})_{xx} = \left[ \frac{3,325 \pm 0,01}{8} \right] [4,25 - 3,575]$$

$$(M_{st})_{xx1} = 0,2814 \text{ t.m}$$

$$(M_{st})_{xx2} = 0,279 \text{ t.m}$$

$$(M_{st})_{yy} = \left[ \frac{W_m \pm F_d}{8} \right] [B - b] \quad (\text{Srinivasulu, 1976})$$

$$(M_{st})_{yy} = \left[ \frac{3,325 \pm 0,01}{8} \right] [1,6 - 1,380]$$

$$(M_{st})_{yy1} = 0,092 \text{ t.m}$$

$$(M_{st})_{yy2} = 0,091 \text{ t.m}$$

Tabel 6.3  
Evaluasi Gaya Inersia

Elemen (i) Sistem	Berat Elemen (Wi) t	Xi (m)	Zi (m)	Xi=(xi-xo) (m)	Zi=(zi-zo) (m)	Gaya Inersia	
						Vertikal (t)	Horisontal (t)
1	3,264	0,119	-0,362	0,119	13,596	0,000056	0,006424
2	2,6415	-0,483	0,418	-0,483	14,376	-0,000185	0,005697
3	0,6835	1,304	0,118	1,304	14,076	0,000129	0,001393
						≡ 0	0,0135

## ii. Beban dinamis

- Momen *exciting* dikalikan faktor kelelahan =  $2,407 \cdot 3 = 7,221 \text{ t.m}$

hasilnya dikalikan jumlah beban terdistribusi paling besar (Sinivasulu, 1976):

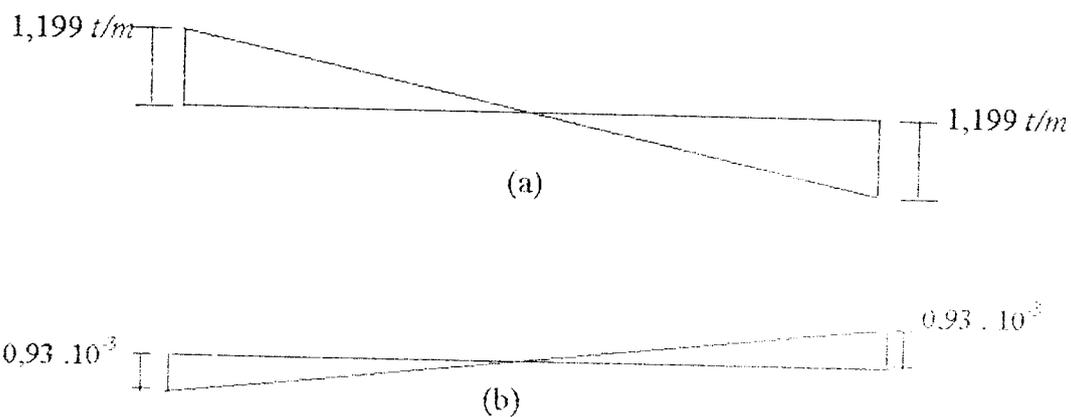
$$= \frac{7,221 \cdot 3}{(4,25)^2}$$

$$= 1,199 \text{ t/m} \quad (\text{gambar 6.2a})$$

- Momen dinamis ( $0,0056 \text{ t.m}$ ) yang beraksi dalam bentuk variasi beban distribusi paling besar (Srinivasulu, 1976):

$$= \frac{0,0056 \cdot 3}{(4,25)^2}$$

$$= 0,93 \cdot 10^{-3} \text{ t/m} \quad (\text{gambar 6.2b})$$



Gambar 6.2 : Variasi Distribusi Beban Akibat

(a) Momen *Exciting*, (b) Momen Dinamis

- Gaya Inersia :

$$\text{Gaya inersia } (F_m)_x = \xi \cdot m \cdot a_x \cdot \omega_m^2 \quad (\text{tabel rumus 4.3})$$

$$= 3 \cdot 0,671 \cdot 0,000268 \cdot 10^{-3} \cdot 157^2$$

$$= 0,0133 \text{ t}$$

$$\text{Momen inersia } (M_{in})_y = \xi \cdot \Phi_y \cdot a_{ey} \cdot \omega_{in}^2 \quad (\text{tabel rumus 4.3})$$

$$= 3 \cdot 0,938 \cdot 0,0000192 \cdot 10^{-3} \cdot 157^2$$

$$= 0,00133 \text{ t.m}$$

koordinat pusat rotasi o ( $X_o$ ,  $Z_o$ ) ditentukan dari persamaan 4.42 dan 4.43, substitusikan  $a_z = 0$

$$X_o = 0$$

$$Z_o = \frac{-a_x}{a_{ey}} = \frac{-0,000268}{0,0000192} = -13,958 \text{ m}$$

- Momen Jaringan ( $M_{st} + M_d$ ) (Srinivasulu, 1976)

$$(M_{xx})_1 = 0,2814 \pm 0,00093 = 0,2823 ; 0,2805 \text{ t.m}$$

$$(M_{yy})_1 = 0,092 \pm 0,00093 = 0,0929 ; 0,0911 \text{ t.m}$$

- Penulangan

Digunakan mutu baja tulangan  $f_y = 300 \text{ MPa}$

Arah x – memanjang – (gambar 6.3, pot. B - B)

$$\text{luas tulangan yang dibutuhkan} = \frac{0,2823 \cdot 10^6}{0,865 \cdot 417 \cdot 12} = 65,22 \text{ cm}^2$$

digunakan tulangan  $D_{20}$ ,  $A = 3,14 \text{ cm}^2$

$$\text{tulangan yang dipakai} = \frac{65,22}{3,14} = 20 \text{ buah}$$

dengan spasi  $20 \text{ cm}$

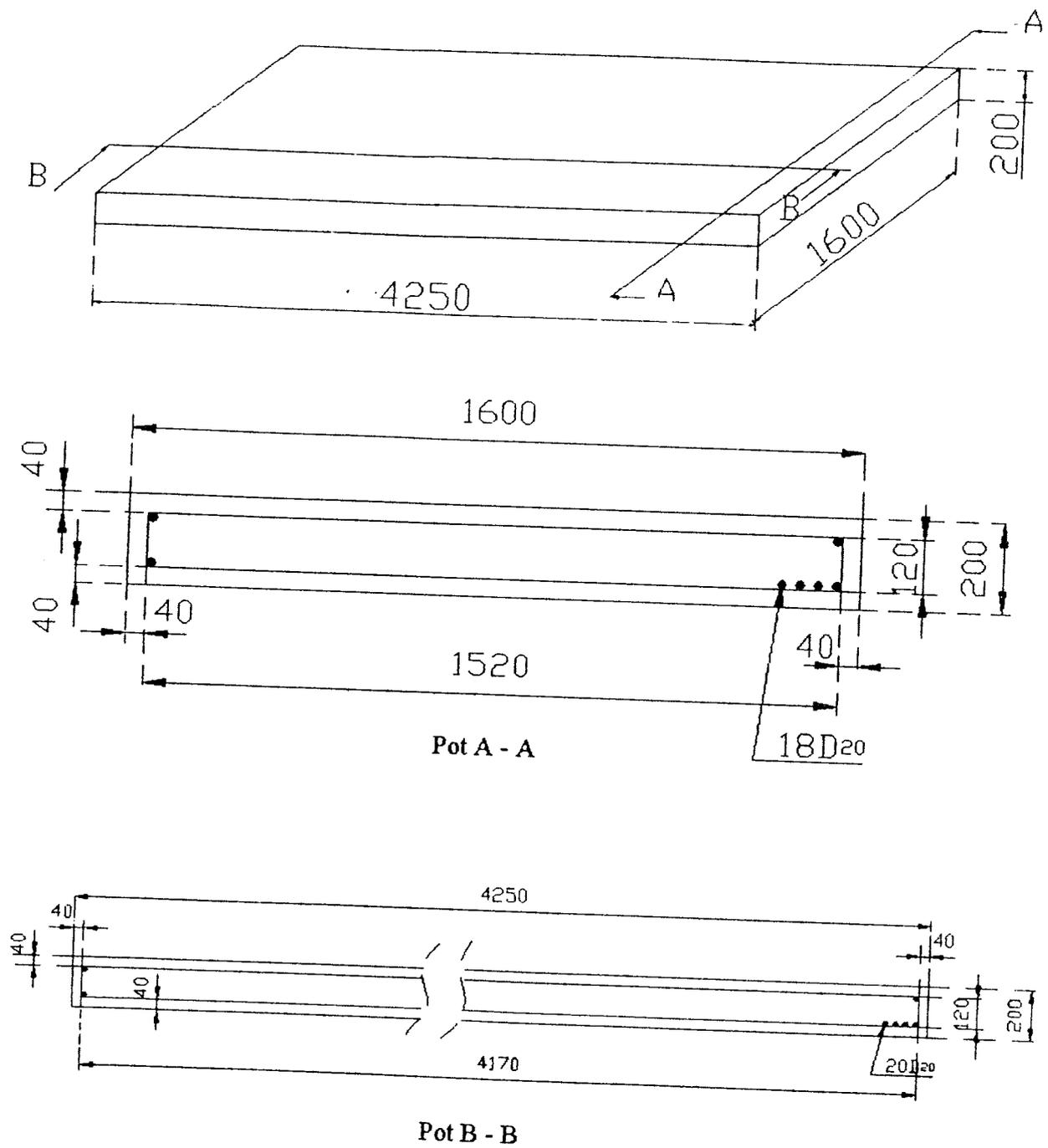
- Arah y – melebar – (gambar 6.3, pot. A - A)

$$\text{luas tulangan yang dibutuhkan} = \frac{0,0929 \cdot 10^6}{0,865 \cdot 152 \cdot 12} = 58,90 \text{ cm}^2$$

digunakan tulangan  $D_{20}$ ,  $A = 3,14 \text{ cm}^2$

$$\text{jumlah tulangan yang dipakai} = \frac{58,90}{3,14} = 18 \text{ buah}$$

dengan spasi  $20 \text{ cm}$



Gambar 6.3 : Dimensi Pondasi Rancangan dan Detail Penulangan (dimensi dalam mm)

- Hubungan dengan struktur utama

Ruangan untuk Gen-set terpisah dengan bangunan utamanya (laboratorium), ditempatkan sejauh  $\pm 6$  m dari pondasi bangunan utama. Dalam ruangan Gen-set digunakan isolasi dengan *Trench Barriers* yang diisi dengan *Bentonite Slurry* (Srinivasulu, 1976)

- Menentukan kedalaman *Trench Barriers*

diketahui frekuensi getaran yang terjadi =  $\frac{1500 \text{ rpm}}{60} = 25 \text{ cps}$

kecepatan gelombang geser dalam tanah  $150 \text{ m/sec}$  (tabel 6.4)

panjang gelombangnya =  $\frac{150 \text{ m/sec}}{25 \text{ cps}} = 6 \text{ m}$  (Srinivasulu, 1976)

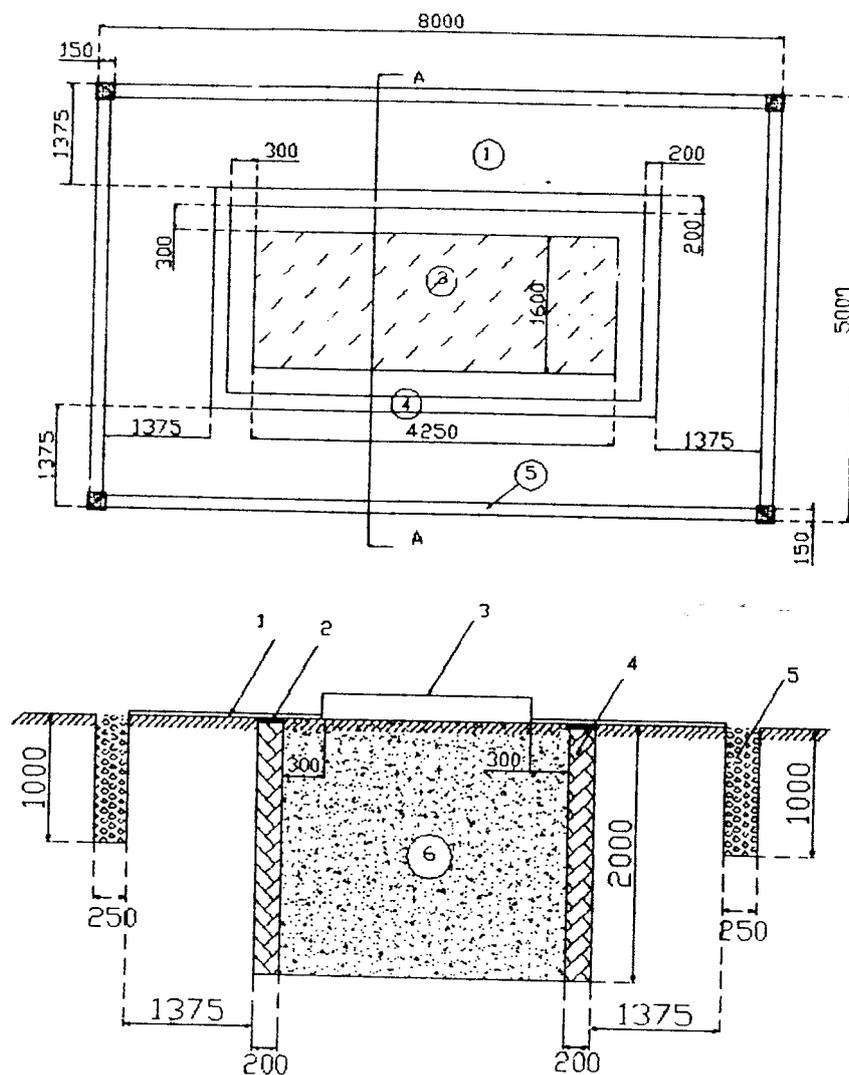
jadi kedalaman *Trench*nya =  $\frac{6 \text{ m}}{3} = 2 \text{ m}$  (Srinivasulu, 1976)

Tabel 6.4

Kecepatan Gelombang Kompresi (a) dan Gelombang Geser (b)

(Barkan, 1962)

Soil	$\rho, \text{ kg} \times \text{sec}^2/\text{cm}^4$	a, m/sec	b, m/sec
<i>Moist clay</i>	$1,8 \cdot 10^{-4}$	1500	150
<i>Loess at natural moisture</i>	$1,67 \cdot 10^{-4}$	800	260
<i>Dense sand and gravel</i>	$1,70 \cdot 10^{-4}$	480	250
<i>Fine grained sand</i>	$1,65 \cdot 10^{-4}$	300	110
<i>Medium grained sand</i>	$1,65 \cdot 10^{-4}$	550	160
<i>Medium sized gravel</i>	$1,8 \cdot 10^{-4}$	750	180



Pot. A - A

(semua dimensi dalam mm)

Keterangan:

1. Lantai
2. Plat baja tebal 5 mm
3. Pondasi mesin
4. Trench barriers
5. Pondasi bangunan ruangan Gen-set
6. Tanah terstabilisasi dengan semen tebal 2000 mm

Gambar 6.4 : Penampang Pondasi dan Hubungannya dengan Bangunan Sekitarnya

Tambahan Cek Perhitungan untuk Bidang y - z  
 Tabel 6.5 : Perhitungan Pusat Gravitasi dan Masa Momen Inersia

Elemen (i)	Dimensi Elemen			Berat $W_i (t)$	Masa $\frac{m_i}{(t \cdot sec^2 \cdot m)}$	Koordinat Pusat Gravitasi Mesin			Masa Momen Statis			Momen Inersia Elemen Surabai Yang Melewati Pusat Gravitasi Elemen			
	$I_{x1} (m)$	$I_{y1} (m)$	$I_{z1} (m)$			$x_i (m)$	$y_i (m)$	$z_i (m)$	$m_{x1}$	$m_{y1}$	$m_{z1}$	A	B	C	D
1	4,25	1,6	0,2	3,264	0,333	2,125	0,8	0,1	0,708	0,266	0,033	0,072	-0,001	0,362	0,100
2	2,295	1,38	1,76	2,6115	0,269	1,523	0,8	0,88	0,410	0,215	0,237	0,112	-0,001	-0,081	-0,082
3	1,280	0,64	1,16	0,6835	0,069	3,31	0,8	0,58	0,228	0,055	0,040	0,010	-0,001	-0,118	-0,119
				6,559	0,671				1,364	0,536	0,310	0,193			-0,081

Keterangan :

$$A = \frac{m_i}{12} (I_{x1}^2 + I_{y1}^2)$$

$$B = y_{ca} = (Y - y_i)$$

$$C = z_{ca} = (Z - z_i)$$

$$D = m_i (y_{ca}^2 + z_{ca}^2)$$

Tambahan perhitungan untuk cek dinamis bidang  $y - z$

## 6.5 PERHITUNGAN

Dari dimensi pondasi awal yang diajukan stabilitas dinamisnya dicek dengan tahap perhitungan sebagai berikut (bidang  $y - z$ ):

a. Pusat gravitasi

Merujuk pada tabel 6.5 dan gambar 6.1, koordinat  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  pusat gravitasi mesin dan pondasinya adalah :

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{1,346}{0,671} = 2,006 \text{ m} \quad \bar{y} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} = \frac{0,536}{0,671} = 0,799 \text{ m}$$

$$\bar{z} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = \frac{0,510}{0,671} = 0,762 \text{ m}$$

Eksentrisitas pusat gravitasi dengan respek ke titik pusat daerah alas:

$$\text{Eksentrisitas arah } x = \frac{(2,125 - 2,006)}{4,25} \times 100\% = 2,8\%$$

$$\text{Eksentrisitas arah } y = \frac{(0,8 - 0,799)}{1,6} \times 100\% = 0,0625\%$$

Eksentrisitas yang masih dalam batas diijinkan adalah 3% dari panjang pondasi (Srinivasulu, 1976).

b. Parameter desam

i. Masa pondasi ( $m$ ) =  $\sum m_i$  (dari tabel 6.5)

$$= 0,671 \text{ t} \approx 671 \text{ kg}$$

- ii. Momen ( $Mx$ ) akibat gaya pengeksitasi ( $P$ ) yang bekerja pada ketinggian  $0,58m$  diatas pondasi dianggap nol (tidak ada momen arah  $x$ )

$$Mx = 0$$

- iii. Frekuensi operasional mesin ( $n_m$ ) = 1500 rpm.

$$\begin{aligned} \text{Frekuensi angular } (\omega_m) &= 2 \pi (n_m/60) \text{ sec}^{-1} \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 2 \pi (1500/60) \\ &= 157 \text{ rad}^{-1} \end{aligned}$$

- iv. Momen inersia ( $I_x$ )

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{1}{12} \cdot l_m^3 \cdot l_m \\ &= \frac{1}{12} \cdot 1,6^3 \cdot 4,25 = 1,1507 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- v. Masa momen inersia ( $q_x$ ) seluruh sistem

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{1}{12} \sum m_i (l_m^2 + l_{cm}^2) + \sum m_i (x_{cm}^2 + z_{cm}^2) \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 0,194 + 0,081 \\ &= 0,113 \text{ t.m.sec}^2 \end{aligned} \quad (\text{dari tabel 6.5})$$

- vi. Masa momen inersia ( $q_{mz}$ ) yang melewati titik pusat daerah alas

$$\begin{aligned} q_{mz} &= q_x + m \cdot z^2 \quad (\text{Srinivasulu, 1976}) \\ &= 0,113 + 0,671 \cdot (0,162)^2 \\ &= 0,256 \text{ t.m.sec}^2 \end{aligned}$$

- vii. Rasio ( $\alpha_x$ ), dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Rasio } \alpha_x &= \frac{q_x}{q_{mz}} \quad (\text{persamaan 4.9}) \\ &= \frac{0,113}{0,256} = 0,441 \end{aligned}$$

viii. Amplitudo getaran akibat *sliding* dan *rocking*

$$\omega_{sl}^2 = \frac{C_{sl} \cdot I_A - W \cdot Z}{\Psi \cdot \alpha} \quad (\text{persamaan 4.12})$$

$$= \frac{2,5 \cdot 10^3 \cdot 1,4597 - 6,5 \times 10^4}{0,256}$$

$$= 53,823 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$$

$$\omega_{ro}^2 = \frac{C_{ro} \cdot A \cdot e}{m} \quad (\text{persamaan 4.13})$$

$$= \frac{1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6}{0,671} = 19,255 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$$

c. Frekuensi alam *coupled*

$$\omega_n^4 - \left( \frac{\omega_{sl}^2 + \omega_{ro}^2}{\alpha_1} \right) \omega_n^2 + \frac{\omega_{sl}^2 \cdot \omega_{ro}^2}{\alpha_1} = 0 \quad (\text{pers. 4.8})$$

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2 \cdot \alpha_1} \left[ \omega_{sl}^2 + \omega_{ro}^2 \pm \sqrt{(\omega_{sl}^2 + \omega_{ro}^2)^2 - 4 \cdot \alpha_1 \cdot \omega_{sl}^2 \cdot \omega_{ro}^2} \right] \quad (\text{pers. 4.14})$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,441} \left[ 53823 + 19255 \pm \sqrt{(53823 + 19255)^2 - 4 \cdot 0,441 \cdot 53823 \cdot 19255} \right]$$

$$\omega_{n1}^2 = 150,048 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$$

$$\omega_{n2}^2 = 18,662 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$$

dihubungkan ke frekuensi alam

$$f_n = \frac{\omega_n}{2 \pi} \quad (\text{tabel rumus 3.1})$$

$$f_{n1} = \frac{\sqrt{\frac{\omega_{n1}^2}{2}}}{2 \pi} = 61,06 \text{ cps}$$

$$f_{n2} = \frac{\sqrt{\frac{\omega_{n2}^2}{2}}}{2 \pi} = 18,928 \text{ cps}$$

d. Amplitudo

Koefisien  $f(\omega_m^2)$  dari persamaan 4.19

$$\begin{aligned} f(\omega_m^2) &= \sigma_{11} A_f (\omega_{n1}^2 - \omega_m^2) (\omega_{n2}^2 - \omega_m^2) \\ &= 0,671 \cdot 0,113 (150,048 \cdot 10^3 - (157)^2) (15,002 \cdot 10^3 - (157)^2) \\ &= -8,54 \cdot 10^7 \end{aligned}$$

Amplitudo horisontal ( $a_y$ ) dirumuskan dalam persamaan 4.17

$$a_y = \left[ (\sigma_{11} A_f S + 4N + \sigma_{11} A_f S^2 + \omega_m^2) S^2 + (\sigma_{11} A_f S) M \right] \frac{1}{f(\omega_m^2)}$$

Substitusikan  $S = \frac{z}{Z} = 0,462$

$$\begin{aligned} a_y &= \left[ \left( 9,5 \cdot 10^4 \cdot 1,4507 + 0,588 \cdot 10^4 \cdot 0,2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 11,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,462^2 + 0,113 \cdot 157^2 \right) \cdot 20 \cdot 4 \cdot 0 \right] \frac{1}{-8,54 \cdot 10^7} \\ &= -0,00328 \text{ mm} \end{aligned}$$

Amplitudo rotasional ( $a_{\omega}$ ) dirumuskan dalam persamaan 4.18

$$\begin{aligned} a_{\omega} &= \frac{\sigma_{11} A_f S}{f(\omega_m^2)} + \frac{(\sigma_{11} A_f + m \omega_m^2)}{f(\omega_m^2)} M S \\ a_{\omega} &= \frac{1,0 \cdot 10^4 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot 0,462}{-8,54 \cdot 10^7} + \frac{1,20 \cdot 4 \cdot 0}{-8,54 \cdot 10^7} \\ &= -0,00143 \text{ mm} \end{aligned}$$

Amplitudo pada level dasar

$$\begin{aligned} &= a_y - S \cdot a_{\omega} \\ &= -0,00328 - (0,462 \cdot (-0,00143)) \\ &= -0,00262 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{Srinivasulu, 1976})$$

Amplitudo horisontal pada pondasi bagian atas

$$\begin{aligned} &= a_y + (H - S) a_{\omega} \\ &= -0,00328 + (0,2 - 0,462) \cdot (-0,00143) \\ &= -0,00291 \text{ mm} = 0,07 \text{ mm aman} \end{aligned} \quad (\text{persamaan 4.20})$$

e. Gaya Dinamis (tabel 1.3)

Dimambil faktor kelelahan  $\xi = 3$  (Srinivasulu, 1976), maka gaya dinamis horisontalnya :

$$\begin{aligned} F_d &= \xi \cdot C_v \cdot A_f \cdot (a_y - S \cdot a_{0,d}) \\ &= 3 \cdot 1,9 \cdot 10^3 \cdot 4,25 \cdot 1,6 \cdot (-0,00262 \cdot 10^{-3}) \\ &= -0,1011 \text{ t} \end{aligned}$$

Momen dinamis

$$\begin{aligned} M_d &= \xi \cdot C_m \cdot I_x \cdot a_{0,d} \\ &= 3 \cdot 9,5 \cdot 10^3 \cdot 1,4507 \cdot (-0,00143 \cdot 10^{-3}) \\ &= -0,0591 \text{ t.m} \end{aligned}$$

f. Cek tegangan tanah

Berat statis pondasi dan mesin ( $W$ ) = 6,589 t

Tegangan max. dan min. pada tanah dirumuskan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976):

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{W}{A_f} \pm \frac{M_d \left( \frac{y}{I_x} \right)}{I_x} \\ \sigma_{\max} &= \frac{6,589}{4 \cdot 25 \cdot 1,6} \pm \frac{(-0,0591) \left( \frac{1 \cdot C_m \cdot 7,9}{1,4507} \right)}{1,4507} \\ \sigma_{\max} &= 1,0162 \text{ t/m}^2 < 29,1 \text{ t/m}^2 \\ \sigma_{\min} &= 0,922 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Pada perhitungan dinamis bidang  $y - z$  ini, ternyata gaya dan momen dinamis yang terjadi lebih kecil dari perhitungan dinamis bidang  $x - z$ , maka untuk hitungan selanjutnya memakai gaya dan momen dinamis dari bidang  $x - z$  (telah disajikan dalam hitungan sebelumnya, pada bidang  $x - z$ )

## BAB VII

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 7.1 Kesimpulan

Sebagai akhir dari penyusunan Tugas Akhir ini, berikut rangkuman hasil perancangan pondasi untuk mesin *reciprocating* berfrekuensi tinggi :

1. Parameter yang dibutuhkan untuk desain pondasi yang mendukung mesin *reciprocating* berfrekuensi tinggi adalah sebagai berikut :

##### a. Parameter mesin

- ◆ Kecepatan operasional mesin ( $n$ ) = 1500 rpm
- ◆ Besar dan tinggi gaya pengalihan yang bekerja = 20,44 : 0,58 m
- ◆ Berat mesin = 3,325 t
- ◆ Amplitudo yang diijukan = 0,007 cm

##### b. Parameter tanah

- ◆ Jenis tanah asli = lempung berpasir
- ◆ Daya dukung tanah = 2,97 kg/cm<sup>2</sup>
- ◆ Koef. elastis tekanan seragam ( $C_u$ ) = 5,6 kg/cm<sup>2</sup>
- ◆ Koef. elastis tekanan tak seragam ( $C'_0$ ) = 9,5 kg/cm<sup>2</sup>
- ◆ Koef. elastis geser seragam ( $C'_s$ ) = 1,9 kg/cm<sup>2</sup>
- ◆ Koef. elastis geser tak seragam ( $C'_q$ ) = 2,2 kg/cm<sup>2</sup>

2. Pondasi hasil rancangan mempunyai dimensi sebagai berikut : panjang = 4250 mm, lebar = 1600 mm, dan tebal = 200 mm, yang berbentuk blok masif

3. Dari dimensi yang diijukan, kemudian stabilitasnya di cek, yang berupa :
  - a. Amplitudo getaran yang terjadi dalam batas yang diijukan =  $0,0003 \text{ mm} = 0,07 \text{ mm}$
  - b. Tegangan max pada tanah yang terjadi dalam batas yang diijukan =  $0,97 \text{ t/m}^2 = 29,7 \text{ t/m}^2$
4. Dari perhitungan momen jaringan arah memanjang dan melebar, didapat jumlah tulangan arah memanjang 20 buah dengan diameter 20 mm dan jumlah tulangan arah melebar 18 buah dengan diameter 20 mm (mutu baja tul.  $f_y = 300 \text{ Mpa}$ ), spasi tul. kedua arah 20 cm
5. Dari panjang gelombang getaran yang terjadi (6 m) dan frekuensi getarannya (25 cps), didapatkan kedalaman *trache barriers* (sebagai isolasi) dengan dikalikan 1/3 (faktor pengali) yang berfungsi untuk meredakan panjang gelombang getaran yang melebihi tanah disekitar pondasi mesin, dengan dimensi sbh : kedalaman = 2000 mm, lebar 200 mm
6. Jarak yang diambil antara ruangan pondasi mesin dan bangunan utamanya berdasarkan pada panjang gelombang yang terjadi, yaitu : 6 m

## 7.2. Saran

Untuk penambahann yang lebih jauh lagi tentang pondasi mesin, diajukan beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu dicoba untuk menggunakan pondasi bentuk *Pile* pada kecepatan dan daya mesin serta karakteristik tanah pendukung yang sama
2. Pondasi mesin sebaiknya ditenmpatkan langsung diatas tanah dasar dengan isolasi yang sesuai

## DAFTAR PUSTAKA

1. Barkan, D. D. (1962) : *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
2. Bowles, Joseph, E. (1988) : *Foundation Analysis and Design*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
3. Davies, T. G. (1991) : *Machine Foundations*, Trans. Cyclic Loading of Soils - From Theory to Design, Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York.
4. Richart, F. E. Jr. (1962) : *Foundation Vibrations*, Trans. Foundation Engineering Handbook (1975), Van Nostrand Reinhold Co., New York.
5. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. Jr. and Woods, R. D. (1970) : *Vibration of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A
6. Srinivasulu, P., Vaidyanathan, C. V. (1976) : *Handbook of Machine Foundations*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi.
7. Suresh, Arya, C., O'Neill Michael, W., Pincus, George. (1979) : *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*, Gulf Publishing Co. Houston, Texas, U.S.A
8. Tschebotarioff (1951) : *Effects of Vibratory and of Slow Repetitional Loading of Soils, Machinery Foundations*, Trans. Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, McGraw-Hill Book Co. Inc.

# LAMPIRAN

Propom 1 ac  
TA. 3 bl  
M.

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95 330 Yogyakarta

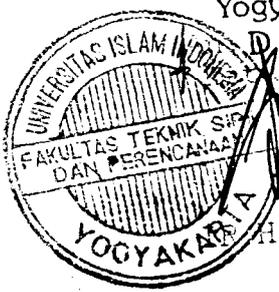


**KARTU PESERTA TUGAS AKHIR**

No.	Nama	No. Mhs.	N.I.R.M.	Bidang Studi
1.	HERY PRANTO	92 310 319		STRUKTUR
2.	SUWITO AGUS SETIAWAN	93 310 276		STRUKTUR

JUDUL TUGAS AKHIR : PERENCANAAN FUNDASI PADA BEMBEKARAN DINAMIS PADA FREKUENSI MENYERAH TIANGTINE FUNDATIONS

Dosen Pembimbing I : DR. IR. EDY PURWANTO, CEF. DEK  
Dosen Pembimbing II : IR. AHMAD MARZURO, MT



Yogyakarta, 04 JUNI 1999  
Dekan,  
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
H. TADJUDDIN BM ARIS, MS

Di dalam perhitungan dipakai jenis pondasi la  
 dipakai lebar pondasi 1.2 m. Perhitungan  
 dangkal dengan data laboratorium diperoleh :

Nomer Bor	Kedalaman Pondasi (m)	Daya Dukung Ijin (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1,00	0,93
	1,50	1,15
	2,0	1,34
4	1,00	1,20
	1,50	1,43
	2,00	1,65

Perhitungan dengan mempergunakan dat

Beberapa metode empiris telah dipak  
 daya dukung tanah. Pada tanah tidak  
 diijinkan) telah dikemukakan oleh  
 adanya penurunan tanah sebesar ±  
 Meyerhof mempergunakan data  
 sondir sehingga diperoleh persamaa

$$q_a = \frac{q_c}{30} \quad B < 1$$

$$q_a = \frac{q_c}{40} B (1 + D/B) \quad B > 1$$

dimana :  $q_a$  : daya dukung yang diijiri  
 $q_c$  : tekanan konus dalam

### 2.3.1. Daya Dukung Tanah Untuk Pondasi Dangkal

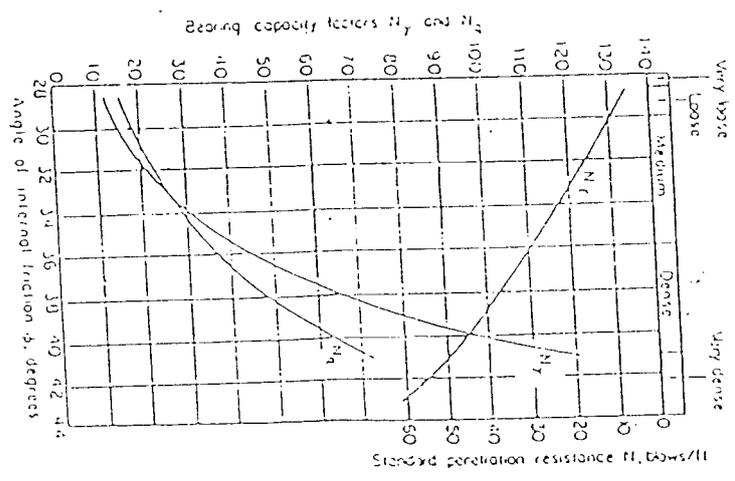
Perhitungan dengan menggunakan data laboratorium

Daya dukung batas ("ultimate bearing capacity") suatu tanah di bawah beban pondasi terutama tergantung pada kuat geser tanah. Sebagian besar teori daya dukung yang sekarang digunakan didasarkan pada teori plastisitas. Terzaghi (1943) mengembangkan persamaan daya dukung tanah dengan persamaan Terzaghi yang umum adalah sebagai berikut

$$q_u = c N_c + \gamma D N_\gamma + 0.5 \gamma B N_q$$

dimana

- $q_u$  : daya dukung batas
- $c$  : kohesi
- $D$  : kedalaman pondasi
- $\gamma$  : berat isi tanah
- $B$  : lebar pondasi
- $N_c, N_\gamma, N_q$  : faktor daya dukung (merupakan fungsi  $\phi$ , lihat gambar 3)



Gambar 3 : Kurva hubungan antara bearing capacity factor dan sudut geser untuk pondasi dangkal.

Di dalam perhitungan dipakai jenis pondasi lajur/strip dengan faktor keamanan 3 dipakai lebar pondasi 1.2 m. Perhitungan daya dukung tanah untuk pondasi dangkal dengan data laboratorium diperoleh sebagai berikut :

Nomer Bor	Kedalaman Pondasi (m)	Daya Dukung Ijin (kg/cm <sup>2</sup> )	Nomer Bor	Kedalaman Pondasi (m)	Daya Dukung Ijin (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1,00	0,93	5	1,00	1,26
	1,50	1,16		1,50	1,30
	2,00	1,34		2,00	1,75
4	1,00	1,20	6	1,00	1,41
	1,50	1,43		1,50	1,70
	2,00	1,65		2,00	1,93

#### Perhitungan dengan mempergunakan data sondir

Beberapa metode empiris telah dipakai untuk secara langsung mendapatkan daya dukung tanah. Pada tanah tidak kohesif, nilai  $q_a$  (daya dukung yang diijinkan) telah dikemukakan oleh Meyerhof (1974) dengan membatasi adanya penurunan tanah sebesar  $\pm 25$  mm (1 inch). Dalam pendekatannya Meyerhof mempergunakan data S.P.T yang dikorelasikan dengan data sondir sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$q_a = \frac{q_c}{30} \quad B < 1,2 \text{ m}$$

$$q_a = \frac{q_c}{40} B (1 + D/B) \quad B > \underline{1,2 \text{ m}}$$

dimana :  $q_a$  : daya dukung yang diijinkan dalam kg/cm<sup>2</sup>

$q_c$  : tekanan konus dalam kg/cm<sup>2</sup>

B = lebar pondasi dalam meter  
D = kedalaman pondasi dalam meter

Dengan mempergunakan rumus di atas serta dipakai lebar pondasi 1,20 m, maka akan diperoleh daya dukung tanah yang diijinkan untuk pondasi dangkal sebagai berikut :

Nomer sondir	Kedalaman Pondasi (m)	Daya Dukung tjin (kg/cm <sup>2</sup> )	Nomer sondir	Kedalaman Pondasi (m)	Daya Dukung tjin (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1,00	0,825	11	1,00	1,76
	1,60	7		1,60	24,5
2	1,00	0,99	12	1,00	4,18
	1,60	0,98		1,60	22,05
3	1,00	4,62	13	1,00	2,97
	1,60	1,96		1,60	14,0
4	1,00	2,97	14	1,00	8,25
	1,60	0,86		1,60	15,4
5	1,00	1,65	15	1,00	3,30
	1,60	0,41		1,60	5,60
6	1,00	3,85	16	1,00	0,44
	1,60	0,54		1,60	8,40
7	1,00	4,95	17	1,00	2,86
	1,60	1,08		1,60	5,60
8	1,00	1,10	18	1,00	4,40
	1,60	11,9		1,60	8,40
9	1,00	4,12	19	1,00	2,48
	1,60	21,0		1,60	3,50
10	1,00	8,25	20	1,00	2,75
	1,60	22,4		1,60	3,50