

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pondasi tiang merupakan contoh pondasi yang sering digunakan pada struktur bangunan yang membutuhkan daya dukung yang sangat besar, seperti gedung bertingkat, jembatan, dan lain-lain.

Pondasi mesin merupakan elemen struktur yang digunakan untuk meneruskan beban dari mesin di atas pondasi ke dalam tanah. Perencanaan pondasi mesin lebih kompleks daripada pondasi yang hanya menerima beban statis. Selain memperhitungkan beban statis yang berasal dari berat mesin dan berat pondasi, perencanaan pondasi mesin juga harus memperhitungkan gaya dinamis yang dihasilkan oleh mesin. Meskipun gaya dinamis yang membebani pondasi mesin pada umumnya relatif lebih kecil dibandingkan gaya statisnya, gaya dinamis tidak bisa diabaikan dalam perhitungan karena gaya tersebut bekerja berulang dan beroperasi dalam jangka waktu yang cukup lama.

Perencanaan pondasi mesin merupakan salah satu bidang geoteknik yang berkaitan erat dengan dinamika tanah. Pondasi jenis ini banyak digunakan untuk mesin industri, mesin bolak-balik, mesin rotasi, dan mesin lainnya. Hal ini menunjukkan pentingnya pondasi mesin dalam dunia industri dan konstruksi.

Dalam perencanaan pondasi mesin membutuhkan tahap desain yang lebih khusus. Untuk memperoleh desain pondasi yang baik secara teknis dibutuhkan kerjasama yang baik antara perancang pondasi dan perancang mesin. Dalam mendesain pondasi mesin, selain dapat menerima beban statis, pondasi mesin juga

harus memenuhi persyaratan amplitudo dan frekuensi izin. Akan tetapi, kenyataannya masih banyak perencana yang kurang memahami tahap dan cara yang tepat dalam perencanaan pondasi mesin.

Dalam mendesain pondasi mesin yang berkaitan dengan getaran periodik ada beberapa masalah yang perlu menjadi pertimbangan, yaitu penurunan. Vibrasi atau getaran lebih mengarah pada pemadatan tanah yang non plastis sehingga terjadi penurunan. Pengaruh maksimal terjadi pada material berbutir kasar yang bersih. Setiap sistim fisik memiliki frekuensi karakteristiknya masing-masing yang sering dikenal sebagai frekuensi natural. Frekuensi natural didefinisikan sebagai frekuensi pada saat sistem akan bergetar ketika mengalami getaran bebas.

Timbulnya resonansi dan efek lanjutan dapat meningkatkan amplitudo getaran yang merupakan salah satu masalah paling umum pada pondasi mesin. Pada resonansi ditemukan bahwa sebagai tambahan pada amplitudo yang berlebihan/lebih besar terjadi juga settlemen yang besar. Frekuensi yang terjadi ketika nilai amplitudo mencapai nilai maksimum disebut frekuensi resonansi. Dalam desain pondasi mesin, kriteria yang penting adalah menghindari resonansi dengan maksud bahwa amplitudo getaran tidak akan besar.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat diambil berdasarkan latar belakang untuk studi ini antara lain:

1. Bagaimana hasil respon dinamis yang terjadi berupa frekuensi alami, frekuensi resonansi dan amplitudo pada sistem pondasi pada lapisan tanah lunak-sedang-keras.

2. Bagaimana distribusi gaya yang terjadi pada sistem pondasi selama peristiwa dinamis.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penulisan ini permasalahan yang ditinjau dibatasi hanya pada:

1. Kasus dan parameter tanah atau properti yang digunakan ditinjau dari jurnal atau buku-buku terkait dengan penelitian pondasi mesin.
2. Jenis tanah yang ditinjau yaitu tanah lunak (Loess), sedang (Pasir tidak padat), dan keras (Pasir padat).
3. Pondasi mesin yang dibahas yaitu pondasi tiang pancang kelompok yang di satukan dalam satu *pile cap*.
4. Jumlah tiang terdiri dari 2 tiang.
5. *Pile cap* (blok pondasi) dalam kondisi tertanam sedalam 1meter.
6. Mesin yang dipakai yaitu pompa jenis *submersible pumps*.
7. Perhitungan konstanta kekakuan dan redaman tiang-tanah terhadap beban dinamis ditentukan dari Analisis Novak.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari Skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui hasil konstanta kekakuan dan redaman serta respon dinamis sistem pondasi berupa frekuensi alami, frekuensi resonansi, dan amplitudo pada masing-masing kondisi tanah (lunak-sedang-keras).
2. Untuk mendapatkan nilai perkiraan perbandingan gaya dinamis yang bekerja pada kondisi tanah lunak, sedang, dan keras.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penulisan Skripsi ini antara lain :

1. Bagi penulis, menambah wawasan dan mendalami ilmu bidang Teknik sipil khususnya ilmu pada bidang pondasi dalam dan pondasi mesin.
2. Sebagai bahan referensi terhadap penelitian yang mempunyai masalah yang sama atau berhubungan dengan skripsi ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada Skripsi ini dapat diuraikan antara lain :

1. **BAB I : PENDAHULUAN**, Bab ini berisi tentang penjelasan umum latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat, dan sistematika penulisan.
2. **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**, Bab ini berisi tentang uraian penjelasan atau dasar teori serta metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah yang ada.
3. **METODOLOGI PENELITIAN**, Bab ini berisi tentang teknik pengumpulan data dan teknik analisa data yang digunakan pada penelitian
4. **BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**, Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan yang akan dari penelitian.
5. **BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN**, Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Umum Pondasi Tiang Pancang

2.1.1 Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang merupakan suatu konstruksi pondasi yang mampu menahan gaya-gaya yang bersifat orthogonal ke sumbu tiang dengan cara menyerap lentur pada tiang itu sendiri. Pondasi tiang dibuat menjadi satu kesatuan yang monolit dengan menyatukan pangkal tiang yang terdapat di bawah konstruksi, dengan tumpuan pondasi (K. Nakazawa, 1983).

Pondasi tiang digunakan untuk menopang bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam di bawah permukaan. Pondasi sejenis ini dapat juga digunakan untuk menopang bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat yang dipengaruhi oleh gaya guling akibat beban angin. Tiang-tiang juga digunakan untuk menahan bangunan dermaga. Tiang-tiang ini juga rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh tekanan benturan kapal dan gelombang air (H. C. Hardiyatmo, 2002)

Pondasi Tiang dapat mengarah pada beberapa maksud lain, antara lain :

1. Memadatkan tanah berpasir untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah.
2. Untuk meneruskan beban ke tanah yang relatif lunak hingga pada kedalaman tertentu sehingga bangunan dapat memberikan dukungan yang cukup untuk mendukung beban tersebut melalui gesekan dinding Bored pile dengan tanah disekitarnya.
3. Untuk menahan gaya-gaya horizontal dan miring.

4. Untuk mengangkur bangunan yang dipengaruhi beban angkat ke atas akibat tekanan hidrostatik atau momen guling.
5. Untuk meneruskan beban struktural di atas air atau tanah lunak, ke tanah pendukung yang kuat.
6. Untuk melindungi pondasi bangunan yang permukaan tanahnya rentan tergerus air (H. C. Hardiyatmo, 2002).

2.1.2 Tiang Pancang dalam Tanah Non-Kohesif

Pengaruh pemancangan dalam tanah non-kohesif (tanah pasir) sangat berbeda dengan apa yang terjadi pada tanah non kohesif (tanah lempung). Pemancangan di dalam tanah non kohesif, biasanya lebih mudah karena tanah tanah tidak menempel pada tiang. Dalam tanah non-kohesif tiang pancang cenderung mengalami sedikit gesekan karena kurangnya kohesi disebabkan partikel-partikelnya tidak memiliki daya tarik yang signifikan satu sama lain sehingga lebih mudah untuk dimasukkan.

2.1.3 Klasifikasi Pondasi Tiang terhadap Beban Statis

Dalam perencanaan pondasi mesin, selain meninjau daya dukung dinamis (saat mesin beroperasi) juga harus meninjau daya dukung statis (saat mesin tidak beroperasi dan beban struktur yang berada diatas tiang). Perimbangan beban statis tidak melebihi dari daya dukung ijin tiang dan penurunan yang terjadi masih dalam batas yang diijinkan.

Dalam skripsi ini, beban statis yang diterima tiang meliputi berat mesin beserta peralatannya dan berat *pile cap* (blok pondasi).

Dalam menentukan kapasitas dukung tiang diperlukan klasifikasi tiang dalam menahan beban yang beroperasi. Adapun klasifikasi menurut Terzaghi, yaitu sebagai berikut.

- a) Tiang gesek (friction pile), jika tiang pada tanah berbutir. Akibat pemancangan tiang, tanah disekitar tiang menjadi padat.
- b) Tiang lekat (cohesion pile), jika tiang tiang dipancang pada tanah lunak atau tanah yang mempunyai kohesi yang tinggi
- c) Tiang menahan dibagian ujung tiang (end bearing pile), jika tiang dipancang dengan ujung tiang mencapai tanah keras sehingga keseluruhan beban yang dipikul oleh tiang diteruskan ke tanah keras melalui uung tiang.
- d) Tiang tekan, jika tiang mencapai tanah keras dan mendapat tekanan vertikal dari beban mati maupun beban hidup.
- e) Tiang tarik, jika tiang dalam tanah berbutir mendapat gaya yang bekerja dari lendutan momen yang mengakibatkan tiang mengalami gaya tarik.

2.2 Daya Dukung Pondasi Tiang pada Tanah Non-Kohesif

2.2.1 Daya Dukung Tiang Tunggal

Daya dukung ujung pondasi tiang pada tanah non- kohesif dapat ditentukan dengan data SPT dengan metode meyerhoff sebagai berikut.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.1)$$

- a. Daya dukung ujung tiang

$$Q_p = 40.N-SPT. A_p \quad (2.2)$$

Dimana: Q_p = Tahanan ujung ultimit (kN)

A_p = Luas penampang tiang pancang (m^2)

b. Daya dukung selimut tiang (Q_s)

$$Q_s = 0,2 \cdot N \cdot SPT \cdot p \cdot L_i \quad (2.3)$$

Dimana: L_i = Panjang lapisan tanah (m)

p = keliling tiang (m)

Maka, daya dukung ijin tiang tunggal (Q_{all}) dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2.4)$$

Dimana: Q_{all} = daya dukung ijin tiang tunggal

Q_u = daya dukung tiang tunggal

SF = Faktor keamanan

2.2.2 Daya Dukung Tiang Kelompok

Beberapa tiang pancang yang digabungkan pad pile cap disebut sungkup tiang sehingga menjadi satu kelompok. *AASHTO Bridge Specification* menyarankan untuk memakai persamaan efisiensi sebagai berikut.

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \quad (2.5)$$

dimana: m = jumlah kolom

n = jumlah baris

$\theta = \tan^{-1} (D/s)$

D = diameter tiang

s = jarak antar tiang

E_g = efisiensi tiang pancang kelompok (Puoulos, 1980)

Maka, daya dukung tiang kelompok (Q_{ult}) dapat ditentukan sebagai berikut.

$$Q_{ult} = n \cdot Q_{all} \cdot E_g \quad (2.6)$$

Dimana: Q_{ult} = daya dukung kelompok tiang

n = jumlah tiang

Q_{all} = daya dukung untuk tiang tunggal

2.2.3 Penurunan Seketika (Immediate Settlement)

Penurunan seketika yaitu penurunan yang terjadi segera setelah beban diberikan pada tanah. Hal ini biasa terjadi pada jenis tanah berbutir kasar dan berbutir halus yang tak jenuh. Penurunan ini dipengaruhi oleh elastisitas tanah yang berada dibawah atau disekitar pondasi.

Adapun persamaan penurunan seketika dikembangkan berdasarkan teori elastic dari Thimosenko dan Goodier (1951), yaitu dibawah berikut.

$$S_i = \Delta\sigma \cdot B \cdot \frac{1-\nu^2}{E_s} I_p \quad (2.7)$$

dimana: S_i = immediate settlement pada pusat dari pondasi tiang grup

$\Delta\sigma = \frac{w}{A}$ [tekanan netto yang bekerja pada pondasi tiang (kN/m^2)]

B = Lebar parameter pondasi tiang (m)

ν = angka poisson ratio

I_p = faktor pengaruh tak berdimensi untuk pondasi tergantung dari

Bentuk dan kekakuan pondasi

E_s = Modulus elastisitas tanah

2.3 Teori Umum Getaran

Getaran ialah suatu gerak bolak-balik disekitar kesetimbangan. Yaitu keadaan dimana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran mempunyai amplitudo (jarak simpangan terjauh dengan titik tengah) yang sama.

2.3.1 Getaran Sebagai Beban Dinamis

Beban dinamis merupakan setiap beban yang besarnya dan arahnya atau posisinya berubah sesuai fungsi waktu. Perubahannya cepat sehingga menimbulkan transformasi.

Pada umumnya beban dinamis yang bekerja pada pondasi meliputi:

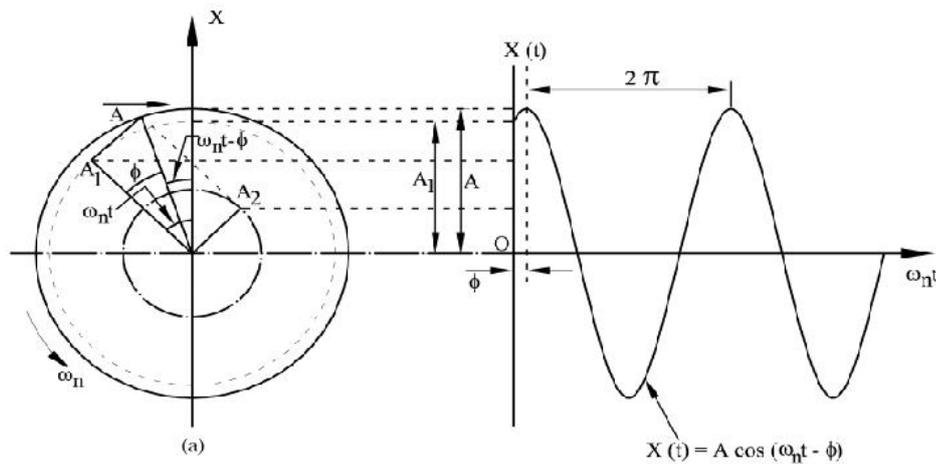
1. Gaya tak seimbang pada mesin (*unbalanced rotating and reciprocating of the machine*).
2. Beban tumbukan (*impact*).
3. Beban vibrasi/getaran dan sejenisnya.
4. Gempa bumi.
5. Gaya Angin
6. Beban yang bergerak/berpindah

Didalam analisis dinamis, getaran sebagai beban dinamis secara umum dibedakan menjadi dua kategori, yaitu:

- a. Beban tak periodik, beban yang timbul hanya sesaat sebagai akibat shaking force seperti beban tiba-tiba (impuls) pada ledakan bom yang terjadi dalam sesaat atau serangkaian impuls akibat gempa bumi.
- b. Beban periodik, yaitu beban berulang yang memperlihatkan variasi waktu

yang sama berturut-turut untuk jumlah siklus yang besar seperti beban mesin yang sedang hidup. Fungsinya dapat berbentuk sinusoida yang disebut sebagai gerak harmonis sederhana.

Pondasi mesin akan menerima beban dinamis yang bersifat periodik dan teratur, sehingga gaya luar yang bekerja akibat getaran mesin akan berupa gerak harmonis sederhana. Sehingga gerak harmonis sederhana didefinisikan sebagai gerak yang merupakan fungsi waktu yang bisa berbentuk fungsi sinus atau kosinus (Prakash dan puri , 1988).



Gambar 2.1 Gerak harmonis sederhana

Sumber: Prakash dan Puri, 1988

Dari gambar 2.1, maka simpangan dapat dinyatakan dalam bentuk

$$X(t) = A \cdot \cos(\omega_n t - \phi) \quad (2.8)$$

Dimana: $X(t)$ = simpangan

A = amplitudo osilasi

ω_n = kecepatan sudut

ϕ = beda fasa simpangan terhadap gaya eksitasi

Kecepatan gerakan harmonik:

$$V = \frac{dX(t)}{dt} = -A.\omega_n \sin(\omega_n t - \phi) \quad (2.9)$$

Percepatan:

$$a = \frac{d^2X(t)}{dt^2} = A.\omega_n^2 \sin(\omega_n t - \phi) \quad (2.10)$$

Frekuensi getaran dan putaran persatuan waktu dinyatakan sebagai:

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ (hertz)} \quad (2.11)$$

Periode getaran (waktu yang diperlukan) yang dinyatakan sebagai:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.12)$$

2.3.2 Resonansi

Frekuensi resonansi atau frekuensi alami merupakan frekuensi dimana sistem akan bergetar saat dibebani oleh suatu getaran bebas. Saat frekuensi operasi dari suatu mesin mendekati (hampir menyamai) frekuensi alami dari dari suatu pondasi, maka amplitudonya cenderung lebih besar dan tidak menutup kemungkinan menyebabkan penurunan (*settlement*) yang besar pada pondasi.

2.4 Pondasi Mesin

Pondasi mesin adalah pondasi yang direncanakan selain untuk menahan beban statik juga dapat menahan beban dinamik yang dihasilkan dari pengoperasian mesin (Braja M. Das, 1993).

Berdasarkan pada kriteria perencanaan pondasi mesin, maka mesin dapat digolongkan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976):

1. Mesin-mesin yang menghasilkan gaya-gaya tumbukan, misalnya palu-palu pancang tempa, mesin-mesin press.

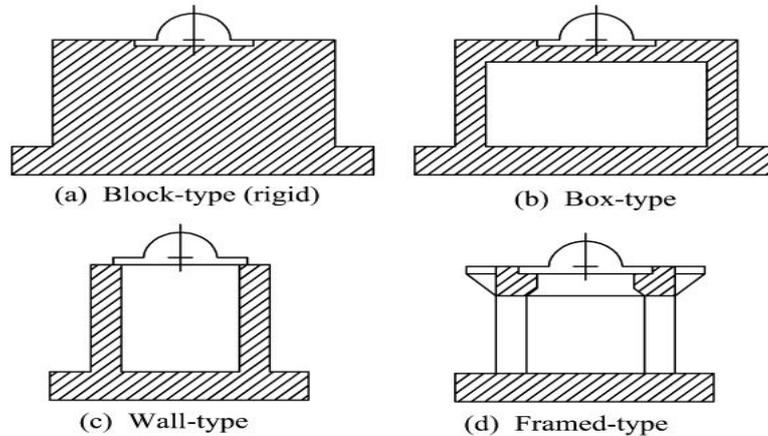
2. Mesin-mesin yang menghasilkan gaya-gaya berkala atau putaran bolak-balik.
3. Mesin mesin kecepatan tinggi yang menghasilkan putaran rotasi tetap seperti turbin gas dan kompresor rotasi.
4. Beberapa jenis mesin lainnya.

Berdasarkan frekuensi operasinya, mesin terbagi menjadi 3 jenis diantaranya sebagai berikut (Srinivasulu, 1976):

1. Frekuensi rendah sampai sedang (0-500 rpm), misalnya mesin-mesin torak dan pengempa.
2. Frekuensi sedang sampai tinggi (300-1000 rpm), terdiri dari mesin-mesin gas atau mesin diesel.
3. Frekuensi sangat tinggi (>1000 rpm), mencakup mesin-mesin ruang pembakaran dalam, motormotor listrik dan rangkaian generator hidro.

Berdasarkan bentuk strukturnya, pondasi mesin dapat digolongkan sebagai berikut (Srinivasulu, 1976):

1. Pondasi blok, yang berupa landasan kaki dari beton (Gambar 2.2(a)).
2. Pondasi kotak atau jenis sumuran, berbentuk pondasi blok beton berongga yang menunjang mesin pada puncaknya (Gambar 2.2(b)).
3. Pondasi dinding, berbentuk sepasang dinding sebagai dudukan mesin (Gambar 2.2(c)).
4. Pondasi kerangka, bangunan kerangka yang membentuk landasan dudukan dari mesin-mesin yang terdiri dari kolom penopang vertikal dan rangka horizontal (Gambar 2.2(d)).



Gambar 2.2 Tipe Pondasi Mesin

Sumber: Srinivasulu, 1976

2.4.1 Persyaratan Pondasi Mesin

- a. Pondasi harus dapat menerima beban statis dan dinamis tanpa mengalami keruntuhan geser.
- b. Penurunan tanah harus berada dalam batas yang diizinkan.
- c. Resonansi mesin tidak boleh terjadi. Yaitu frekuensi alami alami sistem dari pondasi-mesin-tanah harus lebih tinggi ataupun lebih rendah dibandingkan frekuensi operasi mesin. Untuk mesin berfrekuensi rendah maka frekuensi alami sistem pondasi-mesin-tanah harus cukup tinggi dan berlaku sebaliknya.
- d. Amplitudo yang terjadi pada saat mesin bekerja harus didalam batas izin. Batas izin pada umumnya ditentukan oleh pembuat mesin.
- e. Setiap bagian mesin yang mengalami gerak rotasi maupun bolak-balik harus dalam keadaan seimbang untuk meminimalkan gaya dan momen yang tidak seimbang. Hal ini menjadi kewajiban pembuat mesin.

- f. Muka air tanah diusahakan setidaknya seperempat kali lebar pondasi dibawah dasar pondasi untuk mencegah perambatan gelombang, khususnya gelombang tekan.

Pondasi mesin harus memenuhi kriteria desain berdasarkan beban statis maupun beban dinamis. Kriteria desain fondasi mesin berdasarkan beban statis sebagai berikut (Prakash, 1981):

- a. Pondasi harus aman terhadap keruntuhan geser.
- b. Pondasi tidak boleh mengalami penurunan tanah yang berlebihan.

Adapun kriteria desain pondasi mesin berdasarkan beban dinamis sebagai berikut (prakash, 1981):

- a. Pondasi tidak boleh mengalami resonansi.
- b. Amplitudo getaran yang terjadi tidak boleh melebihi nilai yang diizinkan. Nilai izin tersebut umumnya disyaratkan oleh pihak pembuat mesin.
- c. Frekuensi alami dari sistem pondasi-mesin-tanah tidak boleh merupakan kelipatan bulat dari frekuensi operasi mesin. Hal ini ditujukan untuk menghindari resonansi harmonik yang lebih tinggi.
- d. Getararan yang diakibatkan oleh mesin tidak boleh mengganggu ataupun memberi efekburuk terhadap orang dan peralatan disekitarnya.

2.4.2 Nilai Amplitudo Izin

Amplitudo izin pada umumnya ditentukan oleh pihak pembuat mesin dimana nilainya bergantung pada mesin yang terpasang, manusia, peralatan industri, dan struktur di sekitarnya. Amplitudo izin dari pondasi mesin ditentukan

pada kepentingan relatif dari mesin dan kepekaan dari struktur sekitar terhadap getaran.

Tabel 2.1 Nilai Amplitudo Izin

No	Jenis	Amplitudo Izin (cm)
1	Mesin frekuensi rendah	0,02-0,025
2	Mesin hammer	0,1-0,12
3	Mesin frekuensi tinggi	
	1. 3000 Rpm	
	a. Getaran vertikal	0,002-0,003
	b. Getaran horisontal	0,004-0,005
	2. 1500 Rpm	
	a. Getaran vertikal	0,004-0,006
	b. Getaran horisontal	0,007-0,009

Sumber: *Handbook of machine foundation, P. Srinivasulu, 1976*

2.4.3 Parameter Tanah

Dalam merencanakan parameter-parameter dari lapisan-lapisan tanah untuk analisis dinamis mesin, ditinjau dari literatur-literatur yang ada. Hal ini dilakukan karena parameter-parameter tanah seperti modulus elastisitas(E_s), Modulus geser(G), dan angka poisson(μ) yang diperlukan untuk perhitungan dalam analisis beban dinamis mesin tidak diberikan.

a. Modulus Elastisitas Tanah

Nilai modulus young (E_s) menunjukkan besar sebuah nilai elastisitas tanah merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan.

Tabel 2.2 Modulus Elastisitas

Jenis Tanah	Moduls elastisitas (kg/cm ²)
Lempung	
Sangat lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Keras	70 – 200
Berpasir	300 – 425
Pasir	
Berlanau	50 – 200
Tidak Padat	100 – 250
Padat	500 – 1000
Pasir dan krikil	
Padat	800 – 2000
Tidak Padat	500 – 1400
Lanau	20 – 200
<i>Loess</i>	150 – 600
Serpih	1400 – 14000
Kayu	80.000 – 100.000
Beton	200.000 – 300.000
Baja	2.150.000

Sumber: Bowles, 1977

b. Angka Poisson

Nilai poisson ratio ditentukan sebagai kompresi poros terhadap regangan permukaan lateral. Nilai poisson ratio dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah seperti terlihat pada Tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3 Angka Poisson

Jenis Tanah	Angka Poisson
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	0,2 – 0,4
Pasir kasar ($e = 0,4 - 0,7$)	0,15
Pasir halus ($e = 0,4^{,15} - 0,7$)	0,25
Batu	0,1 – 0,4
<i>Loess</i>	0,1 – 0,3

Sumber: Bowles, 1968

2.4.4 Propertis Tiang

Dimensi pondasi mesin biasanya ditentukan sehubungan dengan kebutuhan pengoperasian mesin. Adapun menurut Richart (1962), propertis tiang yang sesuai untuk digunakan dalam merencanakan pondasi tiang dijelaskan pada tabel dibawah berikut:

Tabel 2.4 Propertis pondasi tiang

Material tiang	Modulus elastsitas Material tiang, E (kN/m ²)	Berat volume tiang, γ_p (kN/ m ³)
Baja	200 x 10 ⁶	75,5
Beton	21 x 10 ⁶	23,6
Kayu	8,25 x 10 ⁶	6,3

Sumber: Braja M. Das & G. V ramana, 2011

2.5 Modulus Geser Tanah

Parameter geser tanah yang berupa modulus geser berguna untuk menghitung frekuensi resonansi dan amplitudo getaran pada pondasi, interaksi tanah struktur akibat beban dinamik menentukan koefisien kekakuan tanah di bawah pondasi dan analisis perambatan gelombang (Braja M. Das, 1993).

Pada umumnya, gambaran modulus geser dilakukan dengan menggunakan hubungan antara tegangan geser dengan regangan geser tanah. Berdasarkan hubungan tersebut maka diperoleh besaran modulus geser tanah yang biasanya dinotasikan dengan huruf G.

Modulus geser tanah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$G = \frac{Es}{2(1+\mu)} \quad (2.13)$$

Dimana: G= Modulus geser tanah

Es= Modulus elastisitas tanah

μ = Angka poisson

2.6 Pondasi Pada Tiang Pancang

Pada umumnya pondasi mesin akan dibenamkan pada suatu kedalaman tertentu. Jika pondasi mesin tertanam di kedalaman tertentu maka amplitudo getaran yang dihasilkan akan berbeda dengan pondasi mesin yang berada di atas tanah, hal ini dikarenakan konstanta pegas dan redaman tanah akan bertambah besar. Pondasi tiang pancang adalah jenis pondasi tertanam yang digunakan untuk mendukung beban dinamis mesin (Balamba, 2013).

Pondasi tiang yang dibenamkan ke dalam tanah dibawah sebuah mesin yang bergetar bisa digunakan untuk mempengaruhi perubahan-perubahan dalam amplitudo getaran. Efek tersebut ekuivalen dengan penambahan kekakuan tanah. Pengkajian persamaan-persamaan massa tergroupal menunjukkan, penggunaan tiang pancang dapat memperkecil amplitudo karena nilai kekakuan (k) yang lebih besar serta dapat memperbesar frekuensi alami dan nilai redaman. Dalam penggunaan pondasi yang menerima getaran dan guncangan, maka penggunaan pondasi tiang harus memperhatikan keadaan berikut (Prakash, 1988):

1. Beban yang diberikan pada pondasi berupa gaya statis dan gaya dinamis melebihi nilai-nilai tekanan tanah yang diizinkan dan penggunaan pondasi dangkal (telapak) tidaklah cukup memungkinkan untuk menerima gaya- gaya tersebut.
2. Kondisi tanah dan muka air tanah tidak memungkinkan sehingga getaran mesin dapat mengurangi kekuatan tanah dan mengakibatkan deformasi yang besar, keadaan seperti ini mengharuskan beban dari pondasi baik statis maupun dinamis ditransferkan ke lapisan tanah yang lebih dalam.
3. Diperlukan untuk meningkatkan frekuensi natural dari pondasi dan mengurangi amplitudo getaran.
4. Pertimbangan terhadap gaya gempa dan keadaan mesin.

2.7 Analisis Dinamis

2.7.1 Analisis Tiang Terhadap Getaran Vertikal

Metode novak merupakan metode yang dikembangkan untuk memperoleh respon tiang terhadap beban bergetar. Beberapa asumsi yang dikembangkan dalam metode novak yaitu sebagai berikut (Novak, 1974,1977):

1. Tiang yang digunakan yaitu tiang vertikal, berpenampang bulat, dan elastis.
2. Tiang mengapung (*floating pile*).
3. Tiang berhubungan dengan tanah.

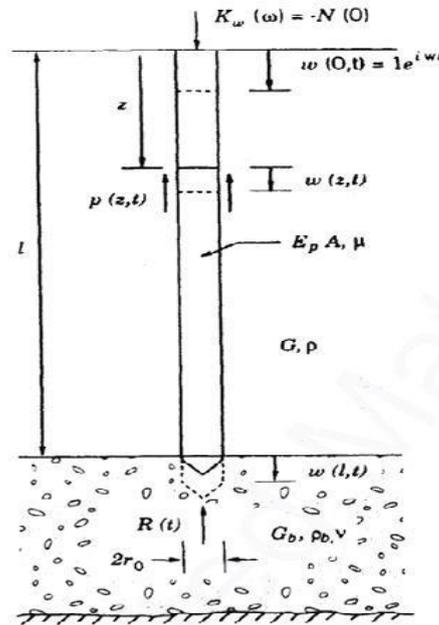
Pada umumnya tiang dikelompokkan menjadi dua bagian besar, yaitu :

1. Tiang dengan tahanan ujung, yaitu tiang yang menembus lapisan tanah lunak sampai lapisan keras atau batuan. Lapisan keras atau batuan dapat dianggap kaku.
2. Tiang dengan tahanan gesek, yaitu ujung tiang yang tidak berada pada lapisan keras. Tiang menahan beban yang diberikan dengan cara tahanan gesek yang terjadi antara tanah dan permukaan tiang.

Tanah diatas ujung tiang dimodelkan sebagai lapisan elastis yang tersusun atas lapisan tipis yang bebas, artinya gelombang merambat pada arah horizontal. Reaksi tanah yang bekerja pada ujung tiang diasumsikan seperti pada teori elastis half- space. Pergerakan kecil dan gaya yang bekerja adalah harmonik, dimana konstanta kekakuan dan redaman ekuivalen dapat digunakan sebagai analisa struktur.

Gambar dibawah ini menunjukkan sebuah tiang vertikal elastis dibawah

vibrasi vertikal, $w(z,t)$ (Novak,1977).



Gambar 2.3 Tiang dibawah vibrasi vertikal dengan notasi

Sumber: Prakash, 1988

$$w(z,t) = w(z)e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

Dimana: $w(z)$ = amplitudo kompleks pada kedalaman z

ω = frekuensi sudut

t = waktu

Gerakan tiang ditahan oleh reaksi tanah yang terdistribusi sepanjang panjang tiang dan oleh reaksi terpusat yang bekerja pada ujung tiang. Dibawah ini adalah reaksi tanah yang terdistribusi, dalam persamaan gerak untuk elemen dz , dan reaksi terpusat memberikan kondisi batas di ujung tiang.

Reaksi tanah yang bekerja sepanjang elemen tiang, dz pada kedalaman z dapatditulis sebagai berikut (Baranov,1977; Prakash dan Puri, 1988).

$$P(z,t) dz = G (S_{w1} + iS_{w2}) w(z,t) dz \quad (2.14)$$

Dimana: G= Modulus geser tanah disekitar tiang

$$S_{w1} = 2\pi(a_0) \frac{J_1(a_0)J_0(a_0) + Y_1(a_0)Y_0(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} \quad (2.15)$$

$$S_{w2} = \frac{4}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} \quad (2.16)$$

Dimana:

$J_0^2(a_0), J_1^2(a_0)$ = fungsi besel untuk jenis pertama tingkat 0 dan Tingkat 1

$Y_0^2(a_0), Y_1^2(a_0)$ = fungsi besel untuk jenis pertama tingkat 0 dan Tingkat 1

S_{w1}, S_{w2} = parameter yang merupakan fungsi tak berdimensi,

parameter Sw dapat diperoleh dari Gambar 2.4

a_0 = nilai frekuensi tak berdimensi, $\frac{r_0 \cdot \omega}{V_s}$

r_0 = jari-jari tiang

V_s = kecepatan gelombang pada tiang = $\sqrt{\frac{G}{\rho}}$

G = modulus geser tanah

ρ = densitas masaa tanah

Dengan reaksi tanah yang disebutkan dalam Persamaan (2.14), persamaan differensial dari vibrasi aksial yang teredam pada sebuah tiang adalah;

$$m_l \frac{\partial w(z,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} - E_p \cdot A \frac{\partial w(z,t)}{\partial z^2} + G (S_{w1} + S_{w2}) w(z,t) = 0 \quad (2.13)$$

dimana: m_l = massa tiang

c = koefisien redaman dalam tiang

E = Young modulus tiang

A = Luas area tiang

Pada kepala tiang, gerakan harmonik dengan amplitudo satu satuan diasumsikan menjadi $w(0,t) = le^{i\omega t}$, sebab bentuk eksitasi ini menentukan kekakuan dan redaman sistem tanah tiang pada kepala tiang. Maka dari itu batas kondisi awal adalah:

$$w(0,t) = 1$$

Gerakan tiang menimbulkan reaksi terpusat, $R(t)$ pada lapisan tanah dibawah ujung tiang. Ini dapat digambarkan sebagai reaksi dari sebuah elastis-half-space terhadap gerakan vertikal pada pondasi bulat dan kaku. Reaksi ini dapat ditulis $R(t) = R e^{i\omega t}$, dimana amplitudonya adalah:

$$R = -Gb \cdot r_0 \cdot (Cw1 + Cw2) \cdot w(1) \quad (2.14)$$

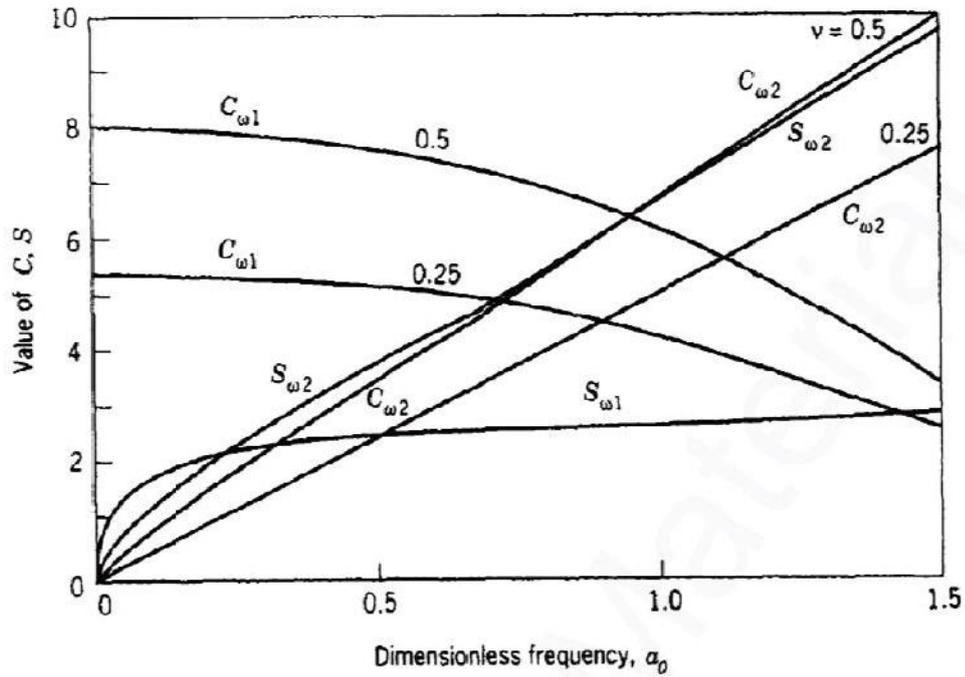
dimana: Gb = modulus geser tanah
 $w(1)$ = amplitudo kompleks pada ujung
 $Cw1, Cw2$ = parameter tak berdimensi tergantung pada frekuensi tak berdimensi, a_0 dan angka rasio poisson, ν

Kecepatan gelombang geser pada tanah dibawah ujung tiang, $v_b = \sqrt{\frac{Gb}{\rho b}}$

dimana: Gb = modulus geser tanah didekat ujung tiang
 ρb = densitas massa tanah didekat ujung tiang

Jika $G = \infty$, maka tidak terjadi gerakan pada ujung tiang sehingga bisa dikategorikan sebagai *end bearing pile* dan jika $Gb = G$ maka menjadi tiang floating.

Parameter Cw telah tercantum pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.4 S_{w1} , S_{w2} , C_{w1} , C_{w2} terhadap nilai a_0 (Novak, 1977)
 Sumber: Prakash, 1988

Berdasarkan penurunan rumus (Novak 1977) diperoleh konstanta kekakuan k_z dari satu tiang dapat ditulis sebagai berikut:

$$k_z = \frac{Ep \cdot A}{r_0} f_{w1} \quad (2.17)$$

$$f_{w1} = \frac{F_w(\Lambda)_1}{L/r_0} \quad (2.18)$$

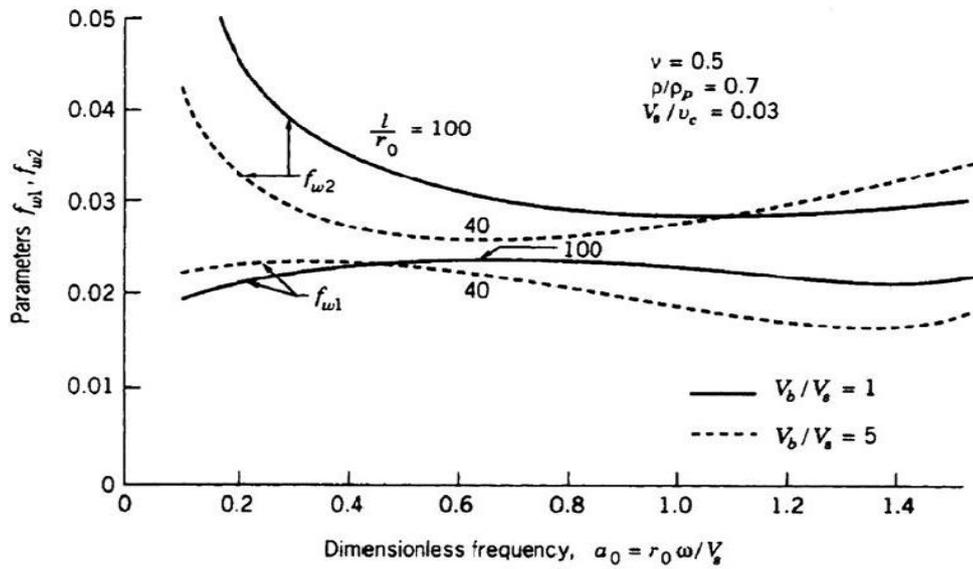
Konstanta redaman viscous ekivalen dari satu tiang adalah:

$$c_z = \frac{Ep \cdot A}{V_s} f_{w2} \quad (2.19)$$

$$f_{w2} = \frac{F_w(\Lambda)_2}{a_0 L/r_0} \quad (2.20)$$

dimana: Λ = parameter frekuensi

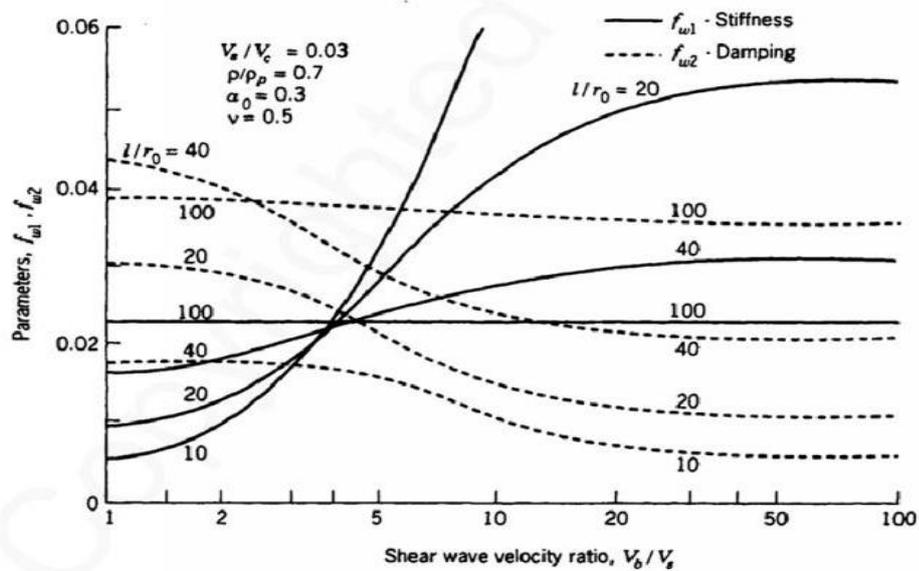
Dan nilai f_{w1} dan f_{w2} terhadap frekuensi dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Variasi parameter kekakuan (f_{w1}) dan redaman (f_{w2}) tiang terhadap frekuensi

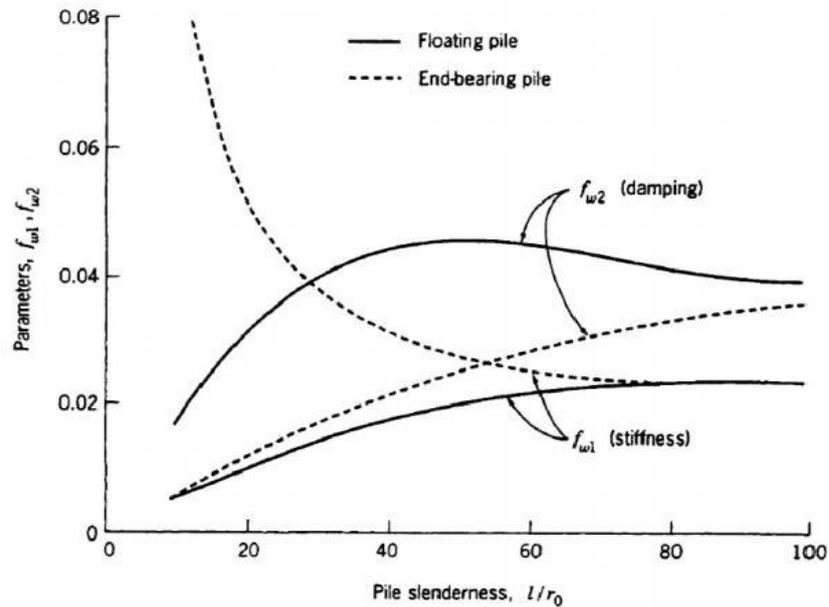
Sumber: Prakash, 1988

Setelah diketahui kekakuan dan redaman tidak terlalu besar dipengaruhi oleh frekuensi, Novak menyarankan parameter f_{w1} dan f_{w2} seperti pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Variasi kekakuan dan redaman terhadap rasio kecepatan gelombang geser tanah dibawah dan diatas ujung tiang

Sumber: Prakash, 1988



Gambar 2.7 Perbandingan *floating piles* and *bearing piles* ($\rho/\rho_p=0,7$; $\nu=0,5$;
 $\alpha_0 = 0,3$; $V_s/V_c=0,003$ (Novak,1977)
 Sumber: Prakash, 1988

Dari Gambar 2.5 diatas konstanta kekakuan dan redaman tiang terhadap rasio kecepatan gelombang geser tanah dibawah dan diatas ujung tiang. Dan rasio kelangsingan tiang (L/r_0) berkisar 10-100, dan $V_s/V_c = 0,03$. Berdasarkan Novak hal tersebut menunjukkan:

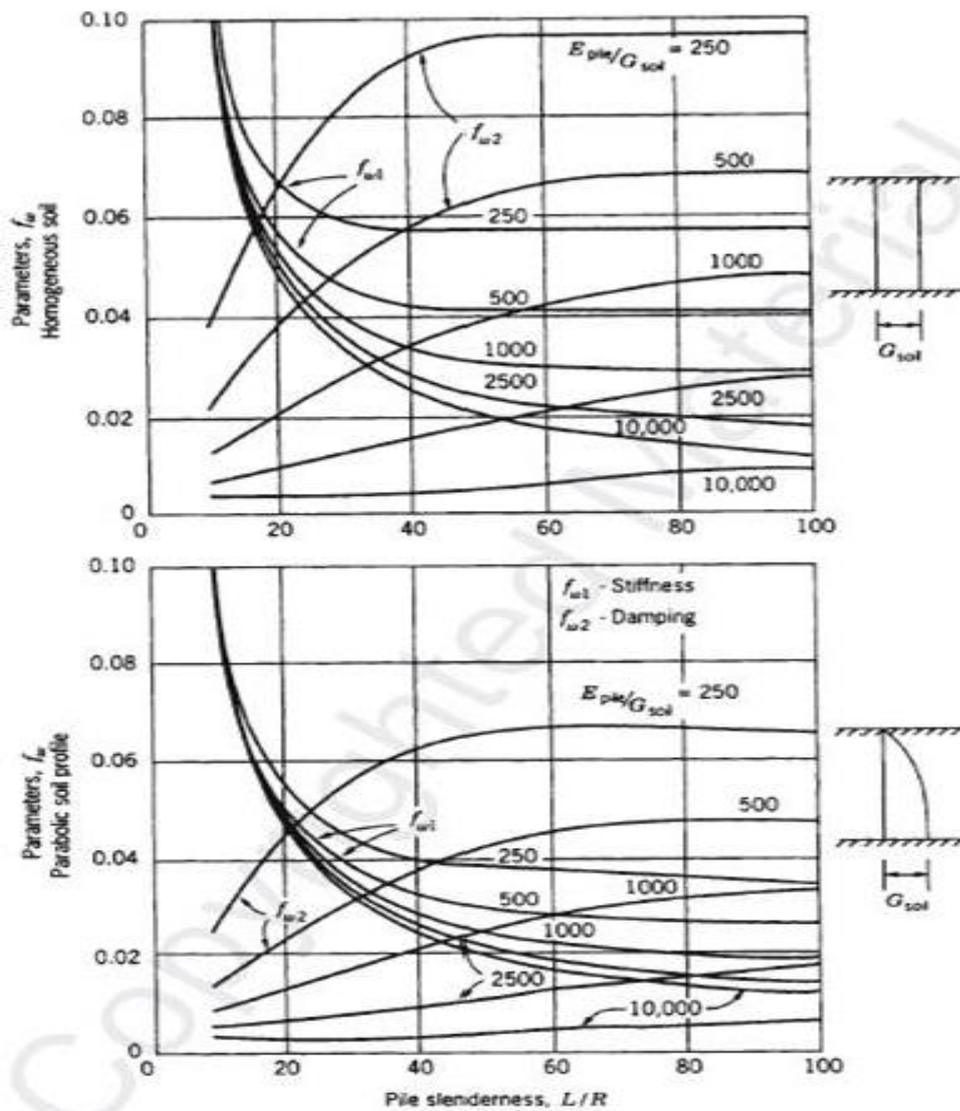
1. Dengan bertambahnya kekakuan tanah dibawah tiang, maka kekakuan tiang ikut bertambah sedangkan redaman berkurang.
2. Dengan bertambahnya panjang tiang, kekakuan untuk tiang *end – bearing* berkurang sedangkan kekakuan untuk tiang *floating* bertambah.
3. Pada umumnya redaman bertambah seiring dengan panjang tiang .

Sedangkan yang dilihat dari Gambar 2.7, konstanta kekakuan dan redaman berlawanan dengan rasio kelangsingan (L/r_0) baik untuk tiang *end-bearing* maupun *floating*.

Untuk perencanaan keduanya baik untuk tiang *end-bearing* maupun tiang

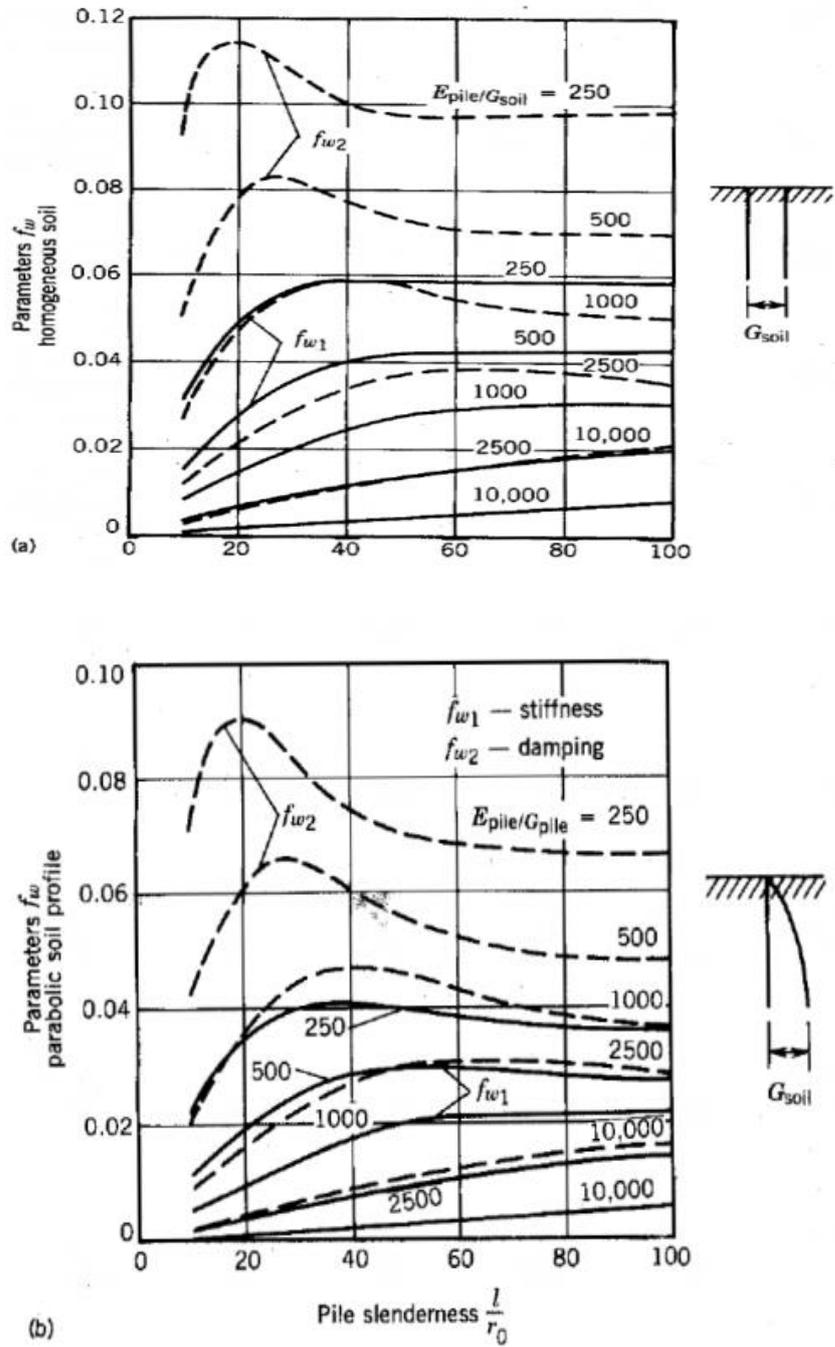
floating konstanta f_{w1} dan f_{w2} pada Persamaan 2.16 dan 2.18 telah dipecahkan Novak (1974,1977) untuk modulus geser tanah konstan.

Novak dan El-Sharnouby (1983) menurunkan konstanta kekakuan dan redaman untuk tiang *end-bearing* (Gambar 2.8) dan untuk tiang *floating* (Gambar 2.9) seperti terlihat dibawah ini.



Gambar 2.8 Parameter kekakuan dan redaman untuk tiang tiang kondisi ujung jepit terhadap vibrasi vertikal

Sumber: Prakash, 1988



Gambar 2.9 Parameter kekakuan dan redaman untuk tiang *floating* terhadap getaran vertikal

Sumber : Prakash, 1988

2.7.2 Getaran Vertikal Pada Tiang Kelompok

Umumnya pondasi tiang dib angun sebagai pondasi tiang kelompok. Kekakuan dan redaman dari tiang kelompok tidak sesederhana pada pondasi tiang tunggal. Novak (1977) berpendapat bahwa ketika jarak antar tiang berdekatan, besar lendutan dari satu tiang meningkat karena lendutan tiang lain disekitarnya dan sebaliknya kekakuan dan redaman dari tiang kelompok berkurang.

Kekakuan dari tiang kelompok dapat diperoleh dengan persamaan (2.21) dan persamaan (2.22) dibawah berikut:

$$K_z(g) = \frac{\sum_1^n K_z}{\sum_1^n \alpha\alpha} \quad (2.21)$$

$$C_z(g) = \frac{\sum_1^n C_z}{\sum_1^n \alpha\alpha} \quad (2.22)$$

Dimana:

$k_z(g)$ = Konstanta kekakuan untuk tiang kelompok

$C_z(g)$ = Konstanta redaman untuk tiang kelompok

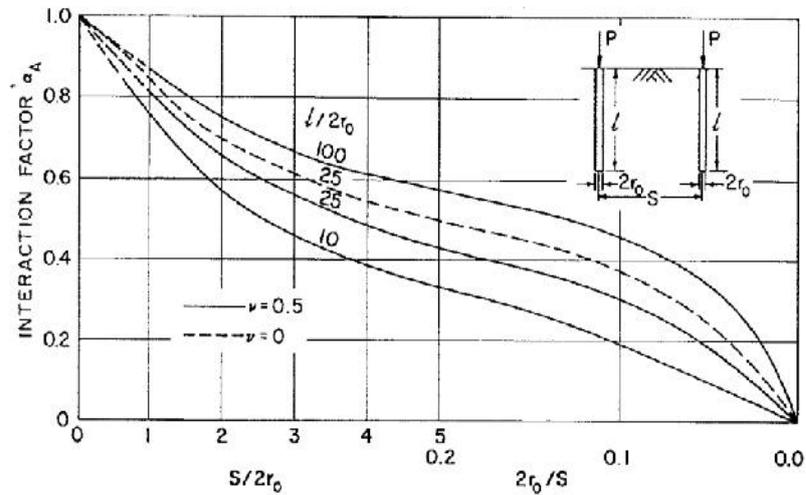
n = Jumlah tiang dalam satu kelompok

$\alpha\alpha$ = Faktor interaksi tiang kelompok

k_z = Konstanta kekakuan tiang tunggal

C_z = Konstanta redaman tiang tunggal

Nilai faktor interaksi dapat diplot dalam sebuah Gambar 2.10 yang merupakan fungsi dari $S/2r_0$, dimana S menyatakan jarak tiang ke- n terhadap tiang refrensi dan r_0 menyatakan jari-jari ekivalen tiang.



Gambar 2.10 α_A sebagai fungsi dari panjang tiang dan jarak antar tiang (Poulos, 1968)
 Sumber: Suresh C. Arya, 1979

2.7.3 Getaran Vertikal Pada Tiang Kelompok Dan Pile Cap

Blok pondasi (*pile cap*) apabila tidak tertanam dalam tanah, maka kekakuan dan redaman kelompok tiang dapat dihitung langsung dengan cara seperti yang telah tertulis sebelumnya. Akan tetapi jika blok pondasi (*pile cap*) ditanam dalam tanah granular padat, maka kekakuan dan redaman kelompok tiang akan bertambah. Gesekan antara tanah dengan sisi blok berkontribusi terhadap kekakuan dan redaman bagi kelompok tiang. Novak dan Beredugo (1972) merumuskan nilai dari konstanta kekakuan $k_{z(\text{cap})}$ dan konstanta redaman $c_{z(\text{cap})}$ akibat gesekan antara tanah dan sisi blok pondasi.

Untuk tiang kelompok dengan *pile cap*, hubungan antara kekakuan dan redaman dari pondasi dapat dirumuskan seperti pada persamaan (2.23 dan 2.24).

$$K_z(\text{cap}) = Gr_0 \left[C'_1 + \frac{G_s D_f}{Gr_0} S'_1 \right] \quad (2.23)$$

$$C_z(\text{cap}) = r_0^2 \sqrt{\rho G} \left[C'_2 + S'_1 \frac{D_f}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{G \rho}} \right] \quad (2.24)$$

Karena lapisan tanah yang ada dibawah pile cap mungkin saja mengalami penurunan kualitas dan akan bertambah buruk kondisinya dengan seiring waktu, maka hal tersebut harus dihindari pengaruhnya terhadap pilecap guna keselamatan, sehingga nilai $C'1 = 0$ dan $C'2 = 0$, sehingga persamaanya menjadi persamaan (2.25) dan persamaan (2.26).

$$K_z(cap) = G_s D_f S'_1 \quad (2.25)$$

$$c_z(cap) = D_f r_0 S'_2 \sqrt{G_s \rho_s} \quad (2.26)$$

Dimana: $K_z(cap)$ = Konstanta kekakuan akibat gesekan antara blok pondasi dengan tanah

$c_z(cap)$ = Konstanta redaman akibat gesekan antara blok pondasi dengan tanah

G_s = modulus geser tanah disekitar blok pondasi

D_f = kedalaman penanaman blok pondasi

r_0 = jari-jari ekivalen tiang

ρ_s = densitas massa tanah disekitar blok pondasi

S'_1, S'_2 = konstanta kekakuan dan redaman untuk lapisan sisi blok pondasi yang tertanam

Tabel 2.5 Konstanta kekakuan dan redaman untuk lapisan sisi blok pondasi yang tertanam untuk getaran vertikal (S_1, S_2) dan rocking ($S\phi_1, S\phi_2$)

V	S ₁	S ₂	S ϕ_1	S ϕ_2
0	2,7	6,7	2,5	1,8
0,25	2,7	6,7	2,5	1,8
0,4	2,7	6,7	2,5	1,8

Sumber: National Research Council of Canadian Geotechnic Journal, Vol.9, 1972

Dengan demikian, untuk tiang kelompok dan pile cap persamaannya menjadi persamaan (2-27) dan (2-28).

$$K_z(T) = K_z(g) + K_z(cap) \quad (2.27)$$

$$C_z(T) = C_z(g) + C_z(cap) \quad (2.28)$$

Dengan menggunakan nilai konstanta kekakuan dan redaman dari sistem pondasi dengan cara Novak, maka berikutnya dapat ditentukan respon sistem pondasi yang berupa frekuensi alami, frekuensi resonansi dan amplitudo. Respon sistem tersebut merupakan pengontrol desain pondasi dinamis untuk memastikan bahwa desain pondasi telah memenuhi persyaratan untuk pondasi penopang mesin.

- a. Rasio Redaman (Dashpot)

$$D_z = \frac{C_z(T)}{2\sqrt{K_z(T)m}} \quad (2.29)$$

Dimana: m= massa dari mesin dan peralatannya beserta *pile cap*

- b. Frekuensi alami teredam atau frekuensi resonansi

$$\text{Constant force: } f_m = f_n \left[\sqrt{1 - 2.D_z^2} \right] \quad (2.30)$$

$$\text{Rotating massa: } f_{mr} = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2.D_z^2}} \quad (2.31)$$

- c. Frekuensi alami tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (2.32)$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (2.33)$$

d. Amplitudo saat resonansi

$$\text{Constant force } A_z = \frac{F_0}{K_z(T)} \frac{1}{2.Dz \sqrt{1-D_z^2}} \quad (2.34)$$

$$\text{Rotating mass: } A_z = \frac{m_1 e}{m} \frac{1}{2.Dz \sqrt{1-D_z^2}} \quad (2.35)$$

e. Amplitudo getaran selain saat tidak terjadi resonansi

$$\text{Constant force } A_z = \frac{\frac{F_0}{k_z(T)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.Dz^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.36)$$

$$\text{Rotating massa: } A_z = \frac{\frac{m_1 e}{m} \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.Dz^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.37)$$

2.7.4 Getaran Horizontal Pada Tiang Kelompok

Novak (1974); Novak dan El-Sharnouby(1983), menurunkan konstanta kekakuan dan redaman untuk tiang yang mendapat beban dinamis getaran horizontal. Berikut ini nilai konstanta kekakuan, k_x konstanta redaman, c_x untuk tiang tunggal.

$$k_x = \frac{E_p \cdot I_p}{r_0^3} f_{x1} \quad (2.38)$$

$$c_x = \frac{E_p \cdot I_p}{r_0^2 V_s} f_{x2} \quad (2.39)$$

Dimana: E_p = modulus elastisitas material tiang

I_p = momen inersia penampang tiang

V_s = kecepatan gelombang geser

r_o = jari-jari ekivalen tiang

Variasi dari parameter kekakuan (f_{x1}) dan redaman (f_{x2}) diberikan pada Tabel 2.7 yang didasarkan pada analisis No vak dan El-Sharnouby (1983).
Jika tiang yang dipakai adalah jenis tiang kelompok maka kekakuan dan redaman kelompok dapat diberikan sebagai berikut:

$$k_{x(g)} = \frac{\sum_1^n K_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (2.40)$$

$$c_{x(g)} = \frac{\sum_1^n C_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (2.41)$$

dimana: $\alpha_{L(r)}$ = faktor interaksi kelompok tiang (Paulos,1971)

n = jumlah tiang dalam kelompok

2.7.5 Getaran Horizontal Pada Tiang Kelompok dan Pile Cap

Seperti pada kasus getaran vertikal, pada getaran horizontal blok pondasi juga memberikan sumbangan kekakuan dan redaman sebesar:

$$K_z(cap) = G_s D_f S_{x1} \quad (2.42)$$

$$c_z(cap) = D_f r_o S_{x2} \sqrt{G_s \rho_s} \quad (2.43)$$

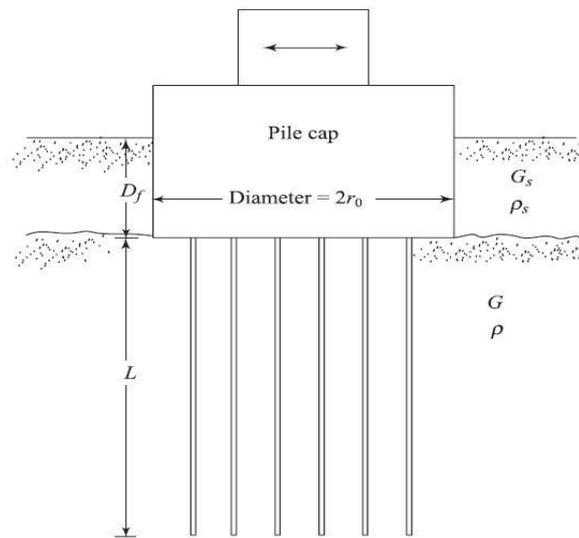
Dimana konstanta kekakuan dan redaman untuk lapisan sisi blok pondasi (S_x) yang tertanam untuk getaran horizontal dapat diperoleh dari tabel 2.5.

Konstanta kekakuan dan redaman total:

$$K_z(T) = K_z(g) + K_z(cap) \quad (2.44)$$

$$C_z(T) = C_z(g) + C_z(cap) \quad (2.45)$$

Untuk gambaran lebih jelas dapat dilihat pada gambar dibawah berikut.



Gambar 2.11 Tiang vertikal dengan beban getaran horizontal
 Sumber: Braja M.Das, 2011

Untuk nilai parameter S_x dapat dilihat pada tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2.6 Konstanta Kekakuan dan redaman untuk lapisan sisi blok pondasi yang tertanam untuk getaran horizontal (After Breduo dan Novak, 19672)

Poisson's Ration, ν	Validity Range	Constant Parameter
0.0	$0 < a_0 < 2.0$	$S_{x1} = 3.6$
	$0 < a_0 < 1.5$	$S_{x2} = 8.2$
0.25	$0 < a_0 < 2.0$	$S_{x1} = 4.0$
	$0 < a_0 < 1.5$	$S_{x1} = 9.1$
0.4	$0 < a_0 < 2.0$	$S_{x1} = 4.1$
	$0 < a_0 < 1.5$	$S_{x1} = 10,6$

Sumber: Prakash, 1990

Respon sistem pondasi tiang terhadap getaran horizontal dapat berdasarkan teori getaran dengan persamaan gerak sistem pondasi, $m \cdot \ddot{x} + c_x \cdot \dot{x} + k_x \cdot x = F_0 \cdot \cos \omega_e t$ adalah sebagai berikut.

- a. Rasio Redaman

$$D_x = \frac{C_x(T)}{2\sqrt{K_x(T)m}} \quad (2.46)$$

Dimana: m= massa dari mesin dan peralatannya beserta *pile cap*

- b. Frekuensi alami teredam atau frekuensi resonansi

$$\text{Constant force: } f_m = f_n \left[\sqrt{1 - 2.D_x^2} \right] \quad (2.47)$$

$$\text{Rotatating massa: } f_{mr} = \frac{f_n}{\sqrt{1-2.D_x^2}} \quad (2.48)$$

- c. Frekuensi alami tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_x(T)}{m}} \quad (2.49)$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x(T)}{m}} \quad (2.50)$$

- d. Amplitudo saat resonansi

$$\text{Constant force: } A_z = \frac{F_o}{K_x(T)} \frac{1}{2.D_x \sqrt{1-D_x^2}} \quad (2.51)$$

$$\text{Rotating mass: } aA_z = \frac{m_1 e}{m} \frac{1}{2.D_x \sqrt{1-D_x^2}} \quad (2.52)$$

- e. Amplitudo getaran selain saat tidak terjadi resonansi

$$\text{Constant force: } A_x = \frac{\frac{F_o}{k_x(T)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.D_x^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.53)$$

$$\text{Rotating massa: } A_z = \frac{\frac{m_1 e}{m} \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.Dx^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.54)$$

2.7.6 Tiang Terhadap Vibrasi Rocking

Vibrasi roking terjadi apabila gaya tak-seimbang (*unbalanced force*) horizontal bekerja diatas pusat gravitasi dari pondasi blok (pile cap). Seperti halnya pada getaran vertikal dan horizontal, Novak dan El-Saharnouby (1983) juga menurunkan konstanta kekakuan dan redaman untuk vibrasi rocking sebagai berikut.:

$$k_x = \frac{E_p \cdot I_p}{r_o^2} f_{x\phi 1} \quad (2.55)$$

$$c_x = \frac{E_p \cdot I_p}{r_o V_s} f_{x\phi 2} \quad (2.56)$$

dimana: $f_{\phi 1}, f_{\phi 2}$ = Parameter tak berdimensi (Tabel 2.6)

Untuk gabungan horizontal dan rocking (couple) konstanta kekakuan dan redaman yang berikutnya disebut konstanta kekakuan dan redaman lintang:

$$k_{x\phi} = \frac{E_p \cdot I_p}{r_o^2} f_{x\phi 1} \quad (2.57)$$

$$c_{x\phi} = \frac{E_p \cdot I_p}{r_o V_s} f_{x\phi 2} \quad (2.58)$$

dimana: $f_{x\phi 1}, f_{x\phi 2}$ = parameter tak berdimensi (Tabel 2.7)

Untuk tiang dalam kelompok konstanta kekakuan dan redaman diberikan sebagai berikut:

$$k_{\phi (g)} = \sum_1^n (k_{\phi} + k_z x r^2 + k_x Z_c^2 - 2 Z_c k_{x\phi}) \quad (2.59)$$

$$c_{\phi (g)} = \sum_1^n (c_{\phi} + c_z x_r^2 + c_x Z_c^2 - 2 Z_c c_{x\phi}) \quad (2.60)$$

Parameter Z_c dan X_r dijelaskan pada Gambar 2.12

Adapun pengaruh blok pondasi tertanam terhadap nilai konstanta kekakuan dan redaman:

$$k_{\phi (cap)} = G_s \cdot R^2 D_f S_{\phi 1} + G_s \cdot R^2 D_f \left[\frac{\delta^2}{3} + \left(\frac{Z_c}{R} \right)^2 - \delta \left(\frac{Z_c}{R} \right) \right] S_{x1} \quad (2.61)$$

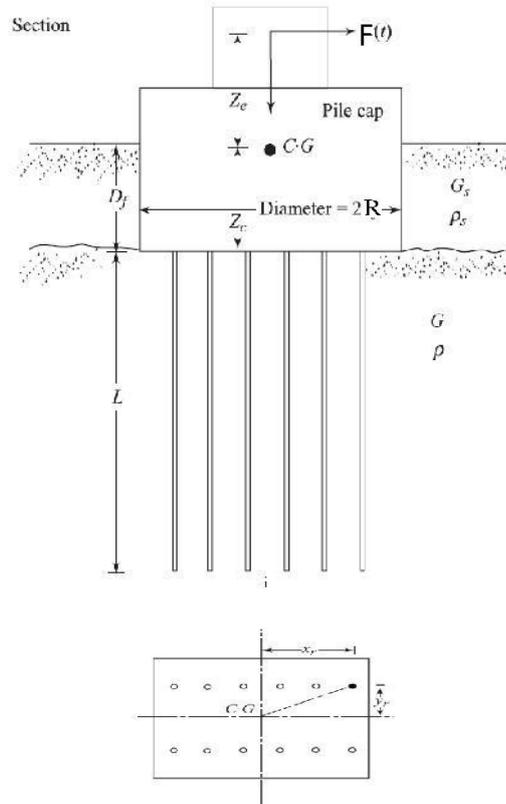
$$c_{\phi (cap)} = \delta \cdot R^2 \sqrt{G_s \cdot \rho_s \left\{ S_{\phi 2} + \left[\frac{\delta^2}{3} + \left(\frac{Z_c}{R} \right)^2 - \delta \left(\frac{Z_c}{R} \right) \right] S_{x2} \right\}} \quad (2.62)$$

dimana: $\delta = \frac{Df}{R}$

R = jari – jari ekivalen dari blok pondasi

$$R = \sqrt{\frac{\text{luas blok pondasi}}{\pi}}$$

Untuk lebih jelasnya, parameter yang dijelaskan diatas dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.12 Defenisi dari parameter-parameter
 Sumber: Braja M. Das, 2011

Berdasarkan pada persamaan gerak sistem pondasi, $m_{\phi} \cdot \ddot{\phi} + c_{\phi} \cdot \dot{\phi} + k_{\phi} \cdot \phi = M y^{\text{iot}}$ dan konstanta kekakuan dan redaman yang diperoleh dari metode Novak, maka respon sistem dapat ditentukan sebagai berikut (Braja M.Das, 1993).

a. Rasio Redaman

$$D_x = \frac{c_{\phi}(T)}{\sqrt{2K_{\phi}(T)I_g}} \quad (2.63)$$

Dimana: I_g = Momen inersia massa untuk blok pondasi dan mesin terhadap pusat blok pondasi

I_g = momen inersia massa terhadap sumbu y

$$I_g = \frac{m}{12}(P^2 + h^2)$$

b. Frekuensi alami teredam atau frekuensi resonansi

$$\text{Constant force: } f_m = f_n \left[\sqrt{1 - 2.D_\phi^2} \right] \quad (2.64)$$

$$\text{Rotating massa: } f_{mr} = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2.D_\phi^2}} \quad (2.65)$$

c. Frekuensi alami tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_\phi(T)}{I_g}} \quad (2.66)$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x(T)}{I_g}} \quad (2.67)$$

d. Amplitudo saat resonansi

$$\text{Constant force: } A_\phi = \frac{F_o}{K_x(T)} \frac{My/K_\phi(T)}{2.D_\phi \sqrt{1 - D_\phi^2}} \quad (2.68)$$

$$\text{Rotating massa: } A_\phi = \frac{m_1.e.Z}{I_g} \frac{1}{2.D_\phi \sqrt{1 - D_\phi^2}} \quad (2.69)$$

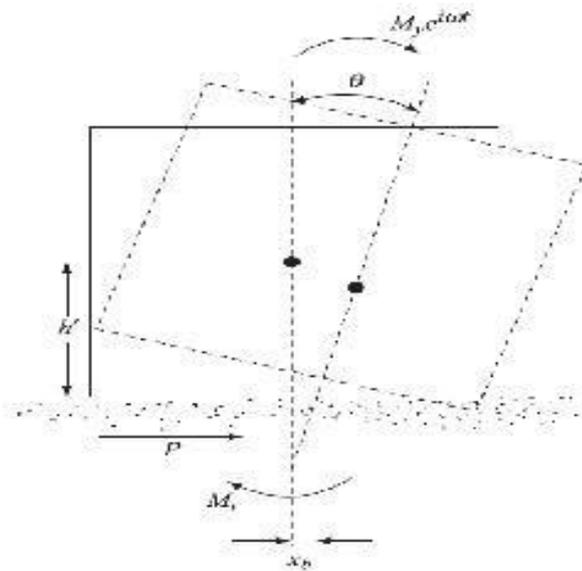
e. Amplitudo getaran selain saat tidak terjadi resonansi

$$\text{Constant force: } A_\phi = \frac{My/k_\phi T}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.D_\phi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.70)$$

$$\text{Rotating massa: } A_\phi = \frac{\left(m_1.e.Z/I_g\right) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4.D_\phi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2.71)$$

Adanya rocking akan meningkatkan amplitudo vertikal dan horizontal

(Prakash dan Puri):



Gambar 2.13 Vibrasi rocking

Sumber: Prakash, 1988

Tabel 2.7 Parameter kekakuan dan redaman tiang untuk vibrasi horizontal dan rocking

Stiffness and Damping Parameters of Horizontal Response for Piles with $L/r_0 > 25$ for Homogeneous Soil Profile and $L/r_0 > 30$ for Parabolic Soil Profile

v (1)	Stiffness Parameters					Damping Parameters			
	E_{pile}/G_{soil} (2)	(f_{ϕ_1}) (3)	$f_{(x\phi_1)}$ (4)	$(f_{x_1}^*)$ (5)	$(f_{x_1}^p)$ (6)	(f_{ϕ_2}) (7)	$f_{(x\phi_2)}$ (8)	$(f_{x_2}^*)$ (9)	$(f_{x_2}^p)$ (10)
Homogeneous Soil Profile									
0.25	10,000	0.2135	-0.0217	0.0042	0.0021	0.1577	-0.0333	0.0107	0.0054
	2,500	0.2998	-0.0429	0.0119	0.0061	0.2152	-0.0646	0.0297	0.0154
	1,000	0.3741	-0.0668	0.0236	0.0123	0.2598	-0.0985	0.0579	0.0306
	500	0.4411	-0.0929	0.0395	0.0210	0.2953	-0.1337	0.0953	0.0514
	250	0.5186	-0.1281	0.0659	0.0358	0.3299	-0.1786	0.1556	0.0864
0.40	10,000	0.2207	-0.0232	0.0047	0.0024	0.1634	-0.0358	0.0119	0.0060
	2,500	0.3097	-0.0459	0.0132	0.0068	0.2224	-0.0692	0.0329	0.0171
	1,000	0.3860	-0.0714	0.0261	0.0136	0.2677	-0.1052	0.0641	0.0339
	500	0.4547	-0.0991	0.0436	0.0231	0.3034	-0.1425	0.1054	0.0570
	250	0.5336	-0.1365	0.0726	0.0394	0.3377	-0.1896	0.1717	0.0957
Parabolic Soil Profile									
0.25	10,000	0.1800	-0.0144	0.0019	0.0008	0.1450	-0.0252	0.0060	0.0028
	2,500	0.2452	-0.0267	0.0047	0.0020	0.2025	-0.0484	0.0159	0.0076
	1,000	0.3000	-0.0400	0.0086	0.0037	0.2499	-0.0737	0.0303	0.0147
	500	0.3489	-0.0543	0.0136	0.0059	0.2910	-0.1008	0.0491	0.0241
	250	0.4049	-0.0734	0.0215	0.0094	0.3361	-0.1370	0.0793	0.0398
0.40	10,000	0.1857	-0.0153	0.0020	0.0009	0.1508	-0.0271	0.0067	0.0031
	2,500	0.2529	-0.0284	0.0051	0.0022	0.2101	-0.0519	0.0177	0.0084
	1,000	0.3094	-0.0426	0.0094	0.0041	0.2589	-0.0790	0.0336	0.0163
	500	0.3596	-0.0577	0.0149	0.0065	0.3009	-0.1079	0.0544	0.0269
	250	0.4170	-0.0780	0.0236	0.0103	0.3468	-0.1461	0.0880	0.0443

Source: Novak and El-Sharnouby (1983).
 $f_{x_1}^*$ and $f_{x_2}^*$ are parameters for pinned head.

Sumber: Prakash, 1988