

PENGARUH FREKUENSI OPERASI TERHADAP RESPONS DINAMIS TIANG PANCANG BETON KELOMPOK AKIBAT GETARAN VERTIKAL MESIN

Sjachrul Balamba

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado

e-mail: balambas@ymail.com

ABSTRAK

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 perlu memperhitungkan gaya statis yang berasal dari berat mesin dan berat pondasi, perencanaan pondasi mesin juga harus memperhitungkan gaya dinamis yang dihasilkan oleh mesin. Dua hal yang sangat penting dalam perencanaan pondasi mesin yaitu masalah tanah pendukung dan frekuensi getaran. Parameter tanah yang dibutuhkan antara lain adalah modulus geser tanah dinamis, redaman tanah dan angka poison. Sedangkan getaran mesin yang sangat menentukan adalah frekuensi getaran.

Pada penelitian ini dianalisis pengaruh frekuensi getaran terhadap respons dinamik pondasi tiang pancang beton kelompok akibat getaran vertikal.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah pada hubungan antara a_0 dengan $Kc(gr)$ terlihat bahwa terdapat pengaruh dari penambahan faktor frekuensi non dimensi (a_0) pada koefisien konstanta pegas $Kc(gr)$ pada getaran vertikal. Semakin besar (a_0) akan menyebabkan bertambah besarnya koefisien konstanta pegas. Pada hubungan antara a_0 dengan damping ratio bahwa terdapat pengaruh dari penambahan faktor frekuensi nondimensi (a_0). Semakin besar nilai a_0 akan semakin besar ratio redaman. Semakin besar nilai a_0 semakin kecil amplitudo getaran. Amplitudo getaran akan menjadi besar akibat bertambahnya beban.

Kata kunci: pondasi tiang pancang beton, frekuensi getaran

PENDAHULUAN

Dalam perencanaan pondasi yang mendukung mesin di atasnya (pondasi mesin) adalah lebih kompleks dibandingkan dengan pondasi yang hanya dibebani oleh beban statis. Pada pondasi mesin kita harus mempertimbangkan beban dinamis yang ditimbulkan oleh bekerjanya mesin. Beban dinamis ini kemudian disalurkan ke pondasi yang mendukung mesin tersebut.

Dalam mendesain pondasi mesin yang berkaitan dengan getaran periodik ada beberapa masalah yang perlu menjadi pertimbangan, yaitu penurunan. Getaran atau vibrasi cenderung memadatkan tanah yang non plastis sehingga terjadi penurunan. Pengaruh maksimal terjadi pada material berbutir kasar yang bersih. Resonansi yaitu setiap sistem fisik memiliki frekuensi karakteristiknya masing-masing yang dikenal sebagai frekuensi natural. Frekuensi natural didefinisikan sebagai frekuensi pada saat sistem akan bergetar ketika mengalami getaran bebas. Pada waktu frekuensi yang bekerja pada

sebuah mesin mendekati frekuensi natural pondasinya, amplitudo cenderung menjadi besar. Sistem dikatakan berada dalam keadaan resonansi ketika dua frekuensi tersebut menjadi sama. Timbulnya resonansi dan efek lanjutannya 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-pondasi mesin, kriteria yang penting adalah menghindari resonansi dengan maksud bahwa amplitudo getaran tidak akan besar.

Permasalahan

Pondasi mesin dengan tiang pancang yang memikul gaya dinamik seperti mesin harus didesain seteliti mungkin agar tidak terjadi hal-hal yang merugikan, baik kepada pekerja maupun pada mesin. Salah satu parameter yang

perlu diperhatikan adalah frekuensi operasi dari mesin untuk mengontrol amplitudo getaran dan frekuensi resonansi.

KAJIAN TEORI

Berdasarkan pada kriteria perencanaan pondasi-pondasi mesin, maka mesin-mesin dapat digolongkan sebagai berikut:

- a. Mesin-mesin yang menghasilkan gaya-gaya tumbukan, misalnya palu-palu pancang tempa, mesin-mesin press
- b. Mesin-mesin yang menghasilkan gaya-gaya berkala, misalnya mesin-mesin torak seperti kompresor torak dan mesin diesel
- c. Mesin-mesin kecepatan tinggi, misalnya turbin gas dan kompresor rotari
- d. Mesin-mesin macam lainnya

Berdasarkan bentuk strukturnya, umumnya pondasi-pondasi mesin digolongkan sebagai berikut:

- a. Pondasi-pondasi jenis blok, yang terdiri dari sebuah landasan kaki dari beton.
- b. Pondasi-pondasi jenis kotak atau jenis sumuran, terdiri dari rongga blok beton yang menunjang mesin pada puncaknya.
- c. Pondasi-pondasi jenis dinding, terdiri dari sepasang dinding yang mendukung mesin-mesin pada puncak pondasi-pondasi tersebut
- d. Pondasi-pondasi jenis kerangka, bangunan kerangka yang membentuk landasan dudukan dari mesin-mesin yang terdiri dari kolom-kolom vertikal yang memikul mesin pada puncaknya.

Srinivasulu membagi mesin-mesin berdasarkan frekuensi operasinya dalam 3 kategori:

- a. Frekuensi rendah sampai sedang (0-500 rpm), misalnya mesin-mesin torak dan pengempa
- b. Frekuensi sedang sampai tinggi (300-1000 rpm), terdiri mesin-mesin gas atau mesin diesel
- c. Frekuensi sangat tinggi (>1000rpm), ini mencakup mesin-mesin ruang pembakaran dalam, motor-motor elektrik dan rangkaian generator turbo

Pondasi mesin menurut tinjauan perencanaan harus memiliki syarat-syarat sebagai berikut :

- a. Pondasi seharusnya mampu memikul beban-beban luar atau beban-beban yang dilimpahkan tanpa menyebabkan keruntuhan “geser” atau keruntuhan “patah”
- b. Penurunan pondasi seharusnya berada dalam batas-batas yang diizinkan.

- c. Pusat gravitasi gabungan antara mesin dan pondasi seharusnya berada di garis vertikal yang sama dengan pusat gravitasi bidang alas.
- d. Sebaiknya tidak terjadi resonansi.
- e. Semua bagian-bagian dari mesin yang bekerja dan berputar bolak-balik harus seimbang.
- f. Pondasi harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak ada perubahan frekuensi naturalnya.

Dalam mendesain pondasi mesin, beberapa aturan umum yang harus diperhatikan agar menghindari kemungkinan terjadinya resonansi :

- a. Frekuensi resonansi dari sistem pondasi-tanah harus lebih kecil dari setengah frekuensi operasi mesin ($F_{\text{resonansi}} < 0,5 F_{\text{mesin}}$) untuk mesin lebih dari 1000 rpm.
- b. Untuk mesin kecepatan rendah (350-400 rpm), Frekuensi resonansi dari sistem pondasi-tanah harus lebih besar dari dua kali frekuensi operasi mesin ($F_{\text{resonansi}} > 2 F_{\text{mesin}}$)
- c. Frekuensi resonansi dan frekuensi alami dari pondasi dapat dikurangi dengan menaikkan massa sistem (m), dengan mengurangi luas sentuh dasar (r_0), dan dengan mengurangi modulus geser G (mengurangi konstanta pegas k_i).

Data atau bahan keterangan perencanaan yang diperlukan pada pondasi mesin:

- a. Tenaga mesin dan kecepatan operasi
- b. Besar dan posisi beban statis mesin dan pondasi
- c. Besar dan kedudukan beban dinamis yang terjadi
- d. Data-data khusus yang ditambahkan oleh pembuat mesin seperti amplitudo yang diizinkan, dll.
- e. Data tanah

Amplitudo yang diizinkan

Amplitudo izin dari pondasi mesin ditentukan oleh kepentingan relatif dari mesin dan kepekaan dari struktur sekitar terhadap getaran (Tabel 1).

Parameter Tanah untuk Analisis Dinamis Mesin

Dalam merencanakan parameter-parameter dari lapisan-lapisan tanah tersebut, 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. Parameter-parameter tersebut dapat di lihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Amplitudo izin

No	Type	Amplitudo Izin (cm)
1	Mesin Kecepatan Rendah (500 rpm)	0,02- 0,025
2	Pondasi "Hammer mill"	0,1-0,12
3	Mesin Kecepatan Tinggi	
	a. 3000 rpm	
	1. Getaran vertical	0,002-0,003
	2. Getaran horizontal	0,004-0,005
	b.1500 rpm	
	1. Getaran vertical	0,004-0,006
	2. Getaran horizontal	0,007-0,009

Sumber: *Handbook of Machine Foundation*, P. Srinivasulu, C. V. Vaidyanathan

Tabel 2. Modulus Elastisitas

Jenis Tanah	Modulus 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
Loess	150 – 600
Serpih	1400 – 14000
Kayu	80.000 – 100.000
Beton	200.000 – 300.000
Baja	2.150.000

Sumber: Bowles (1977)

Tabel 3. Angka poisson

Jenis Tanah	Angka Poisson
Lempung jenuh 0,4 – 0,5	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh 0,1 – 0,3	0,1 – 0,3
Lempung berpasir 0,2 – 0,3	0,2 – 0,3
Lanau 0,3 – 0,35	0,3 – 0,35
Pasir padat 0,2 – 0,4	0,2 – 0,4
Pasir kasar (e = 0,4 – 0,7)	0,15
Pasir halus (e = 0,4 – 0,7)	0,25
Batu (agak tergantung dari	0,1 – 0,4
Loess 0,1 – 0,3	0,1 – 0,3

Sumber: Bowles (1968)

Modulus Geser Tanah (G)

Modulus geser tanah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

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

Pondasi Mesin pada Tiang

Pada umumnya pondasi mesin akan dibenamkan pada suatu kedalaman tertentu. Pada kondisi tersebut maka amplitudo getaran yang dihasilkan akan berbeda dengan pondasi mesin yang terletak di atas tanah, karena konstanta pegas dan redaman tanah akan bertambah besar.

Pondasi tiang adalah jenis pondasi tertanam yang digunakan untuk mendukung beban dinamis mesin. 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 tergumpal 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 tiang yang menerima getaran dan guncangan, maka harus memperhatikan keadaan berikut:

1. Beban yang diberikan pada pondasi berupa gaya statis dan gaya dinamis melebihi nilai-nilai tekanan tanah yang diizinkan dan penggunaan pondasi dangkal (telapak) tidak cukup 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. Pada keadaan seperti ini beban dari pondasi baik statis maupun dinamis harus ditransferkan ke lapisan tanah yang lebih dalam.
3. Perlu untuk meningkatkan frekuensi natural dari pondasi dan untuk memperkecil amplitudo getaran.
4. Pertimbangan terhadap gaya gempa dan keadaan mesin.

Analisis Tiang dengan Getaran Vertikal

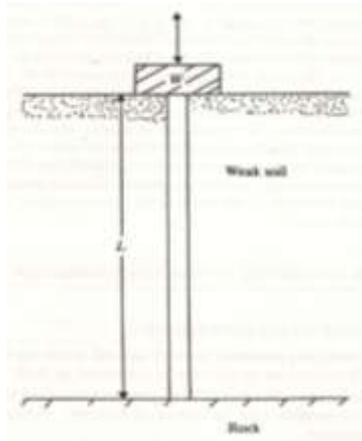
Secara umum tiang dapat dikelompokkan menjadi dua bagian besar:

1. Tiang dengan tahanan ujung, tiang ini menembus lapisan tanah lunak sampai lapisan keras atau batuan. Lapisan keras atau batuan dapat dianggap kaku.

2. Tiang dengan tahanan gesek, ujung tiang ini tidak berada pada lapisan keras. Tiang menahan beban yang diberikan dengan cara tahanan gesek yang terjadi antara tanah dan permukaan tiang.

Tiang dengan Tahanan Ujung

Tiang tertanam sampai sampai pada lapisan keras. Panjang tiang adalah L, dan beban pada tiang yang berasal dari pondasi adalah W. Permasalahan ini dapat diumpamakan sama seperti batang vertikal yang dijepit di bagian bawah dan bebas pada bagian atas.



Gambar 1. Tiang tahanan ujung

Untuk menghitung frekuensi natural dari tiang dengan tahanan ujung, terdapat tiga keadaan, yaitu :

- a. Jika W (berat mesin dan poer) sangat kecil (≈ 0), frekuensi natural dari getaran dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}} \quad (2)$$

dimana,

- f_n = frekuensi natural dari getaran,
- ω_n = frekuensi natural putaran,
- E_p = modulus elastisitas dari material tiang,
- ρ_p = masa jenis dari material tiang

- b. Jika nilai W sama dengan berat dari tiang, frekuensi natural getaran dapat dinyatakan sebagai berikut:

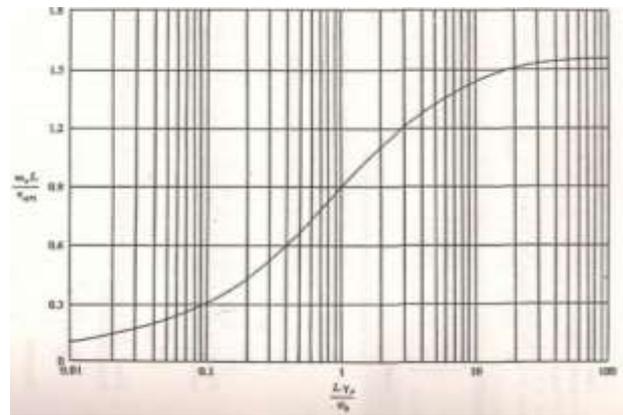
$$\frac{AL\gamma_p}{W} = \left[\frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \tan \left[\frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right] \quad (3)$$

dimana,

- A = luas penampang tiang,
- γ_p = berat satuan tiang,
- ω_n = frekuensi natural putaran,
- $v_{c(P)}$ = kecepatan perambatan gelombang dari tiang,

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara $\omega_n L / v_{c(P)}$ dengan $L \gamma_p / \sigma_0$ yang digunakan untuk menentukan ω_n dan f_n ,
dimana

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad \sigma_0 = \frac{W}{A}$$



Gambar 2. grafik hub. antara $\omega_n L / v_{c(P)}$ dan $L \gamma_p / \sigma_0$

- c. Jika W besar dan berat dari tiang diabaikan, maka digunakan persamaan berikut

$$\frac{AL\gamma_p}{W} \approx \left[\frac{\omega_n L}{v_{c(P)}} \right]^2 \quad (4)$$

$$v_{c(P)} = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}} = \sqrt{\frac{E_p g}{\gamma_p}} \quad (5)$$

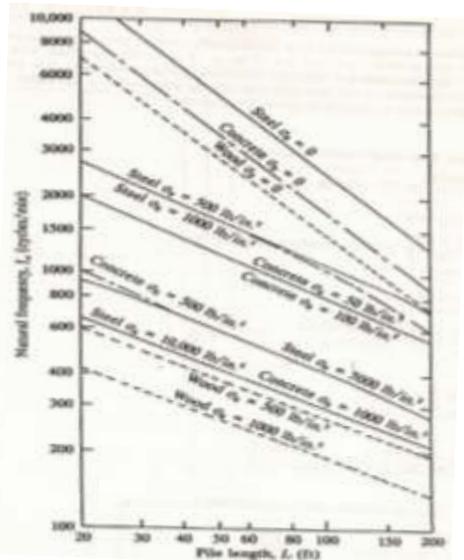
dimana g= percepatan gravitasi

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_p g}{LW}} \quad (6)$$

atau

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p g}{\sigma_0 L}} \quad (7)$$

σ_0 = tegangan axial = W/A



Gambar 3. Frekuensi resonansi untuk getaran vertikal pada tiang tahanan ujung (Richart, 1962)

Penggunaan grafik diatas harus berdasarkan jenis materialnya pada Tabel 4

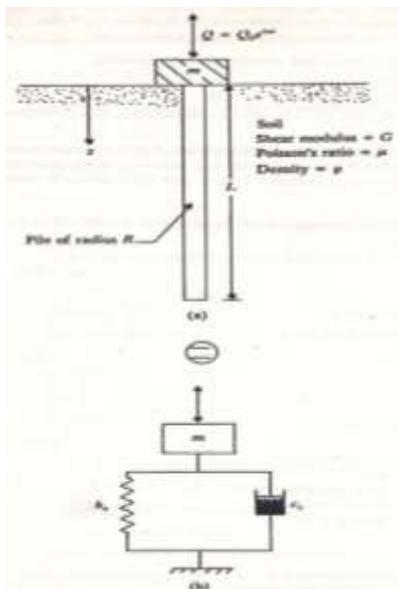
Tabel 4. Nilai E_p dan γ_p berdasarkan jenis material tiang

Material	E_p (lb/in ²)
Baja	29.4×10^6
Beton	3.0×10^6
Kayu	1.2×10^6

Sumber: Das (1993)

Tiang Dengan Tahanan Gesek

Analisis tiang dengan tahanan gesek di bawah getaran vertikal berbeda dengan tahanan ujung, yang mana tidak ada beban yang di pindahkan dari batang ke tanah.



Gambar 4. Tiang tahanan gesek–Getaran vertikal

Tiang dianggap sebagai sistem massa-pegas-redaman. Massa m diasumsikan sebagai massa dari mesin dan pilecap. Formula matematika untuk menentukan kekakuan (k_z) dan redaman (c_z) diberikan oleh Novak (1977).

Hubungan antara k_z dan c_z diberikan oleh Novak dan El-sharnouby (1983) sebagai berikut :

$$k_z = \left(\frac{E_p A}{R} \right) f_{z1} \tag{8}$$

$$c_z = \left(\frac{E_p A}{\sqrt{G/\rho}} \right) f_{z2} \tag{9}$$

dimana,

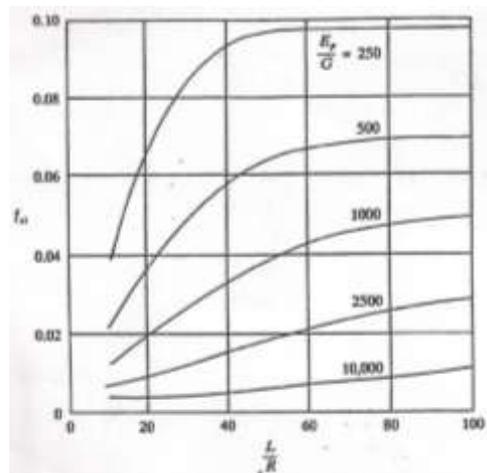
E_p = modulus elastisitas dari material tiang

A = luas penampang tiang

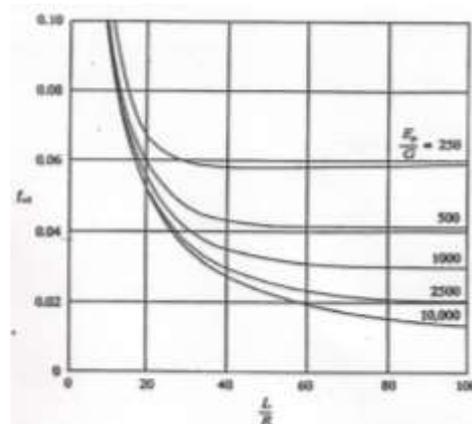
G = modulus geser tanah,

ρ = massa jenis dari material tiang,

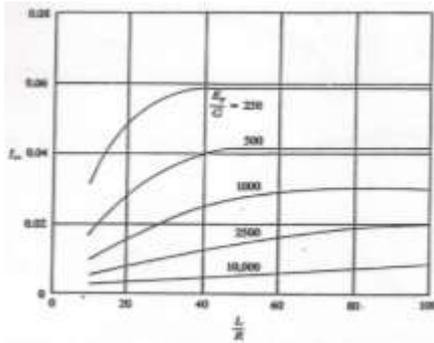
f_{z1}, f_{z2} = parameter nondimensional



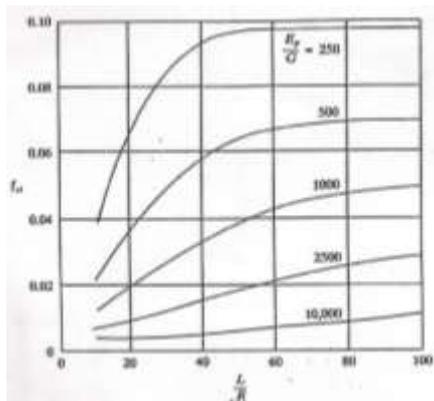
Gambar 5. Variasi dari f_{z1} dan E_p/G untuk tahanan ujung (Novak dan El-sharnouby, 1983)



Gambar 6. Variasi dari f_{z2} dan E_p/G untuk tahanan ujung (Novak dan El-Sharnouby, 1983)



Gambar 7. Variasi dari f_{z1} dan E_p/G untuk tahanan kulit (Novak dan El-sharnouby, 1983)



Gambar 8. Variasi dari f_{z2} dan E_p/G untuk tahanan kulit (Novak dan El-sharnouby, 1983)

Secara umum pondasi tiang didirikan sebagai pondasi tiang kelompok. Kekakuan dan redaman dari tiang kelompok tidak sederhana seperti pada 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:

$$k_{z(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n k_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (10)$$

$$c_{z(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n c_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (11)$$

dimana,

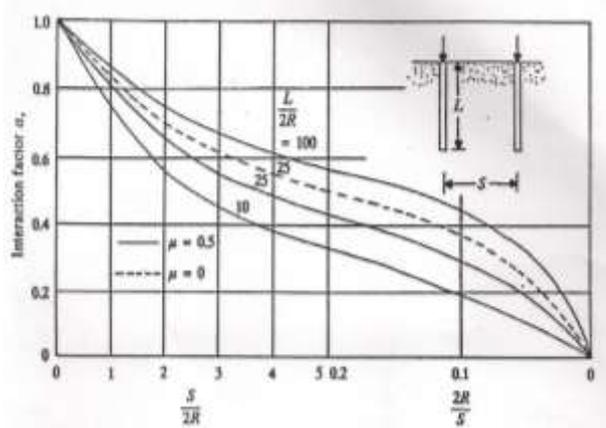
$k_{z(g)}$ = konstanta pegas untuk tiang kelompok,

$c_{z(g)}$ = konstanta redaman untuk tiang kelompok,

n = banyaknya tiang kelompok,

α_r = faktor interaksi

Perkiraan nilai α_r dapat diperoleh dari penyelesaian statis oleh Poulos (1968)



Gambar 9. Variasi dari faktor interaksi α_r (Poulos, 1968)

Untuk tiang kelompok dengan pilecap, hubungan antara kekakuan dan redaman dari pondasi adalah:

$$k_{z(cap)} = Gr_o \left[\bar{C}_1 + \frac{G_s D_f}{G r_o} \bar{S}_1 \right] \quad (12)$$

$$c_{z(cap)} = r_o^2 \sqrt{\rho G} \left[\bar{C}_2 + \bar{S}_2 \frac{D_f}{r_o} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{G \rho}} \right] \quad (13)$$

Tanah yang mendukung pilecap mungkin saja berkualitas buruk dan akan bertambah buruk dengan seiring waktu, hal tersebut harus dihindari pengaruhnya terhadap pilecap, sehingga nilai $\bar{C}_1 = 0$ dan $\bar{C}_2 = 0$

$$k_{z(cap)} = G_s D_f \bar{S}_1$$

$$c_{z(cap)} = D_f r_o \bar{S}_2 \sqrt{G_s \rho_s}$$

Dengan demikian, untuk tiang kelompok dan pilecap,

$$k_{z(r)} = \frac{\sum_{r=1}^n k_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} + G_s D_f \bar{S}_1 \quad (14)$$

$$c_{z(T)} = \frac{\sum_{r=1}^n c_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} + D_f r_o \bar{S}_2 \sqrt{G_s \rho_s} \quad (15)$$

dimana $k_{z(T)}$ dan $c_{z(T)}$ konstanta kekakuan dan redaman untuk tiang kelompok dan pilecap.

Tabel 5. Nilai C_1 , C_2 , S_1 , dan S_2 untuk getaran vertikal

Angka poissons, μ	C_1	C_2	S_1	S_2
0.0	3.9	3.5	2.7	6.7
0.25	5.2	5.0	2.7	6.7
0.5	7.5	6.8	2.7	6.7

a. Rasio redaman

$$D_z = \frac{c_{z(T)}}{2\sqrt{k_{z(T)}}m} \quad (16)$$

dimana m = massa dari pile cap dan mesin

b. Frekuensi natural tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{z(T)}}{m}} \quad (17)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{z(T)}}{m}} \quad (18)$$

c. Frekuensi natural teredam/frekuensi resonansi

$$f_m = f_n \sqrt{1 - 2D_z^2} \quad (19)$$

d. Amplitudo dari getaran saat resonansi

$$A_z = \frac{Q_o}{k_{z(T)}} \frac{1}{2D_z \sqrt{1 - D_z^2}} \quad (20)$$

e. Amplitudo getaran saat tidak terjadi resonansi

$$A_z = \frac{Q_o}{k_{z(T)}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4D_z^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (21)$$

Analisis Tiang Dengan Getaran Horisontal

Dari Novak(1974) dan Novak dan El-sharnoby (1983) mengatakan bahwa konstanta kekakuan dan redaman untuk tiang tunggal sama

halnya seperti yang dijelaskan untuk getaran vertikal.

$$k_x = \frac{E_P I_P}{R^3} f_{x1} \quad (22)$$

$$c_x = \frac{E_P I_P}{R^2 v_s} f_{x2} \quad (23)$$

dimana,

E_P = modulus elastisitas dari material tiang,

I_P = momen inersia dari penampang tiang,

v_s = kecepatan gelombang geser dari tanah,

R = jari-jari tiang, Nilai f_{x1} dan f_{x2} berdasarkan Tabel 6

Tabel 6. Parameter kekakuan dan redaman untuk getaran horisontal ($L/R > 25$)

Poisson ratio μ	E_p/G	f_{x1}	f_{x2}
0,25	10,000	0.0042	0.0107
	2,500	0.0119	0.0297
	1,000	0.0236	0.0579
	500	0.0395	0.0953
	250	0.0659	0.1556
0,4	10,000	0.0047	0.0119
	2,500	0.0132	0.0329
	1,000	0.0261	0.0641
	500	0.0436	0.1054
	250	0.0726	0.1717

Sumber: Das (1993)

Getaran horisontal untuk tiang kelompok

$$k_{x(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n k_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (24)$$

$$c_{x(g)} = \frac{\sum_{r=1}^n c_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (25)$$

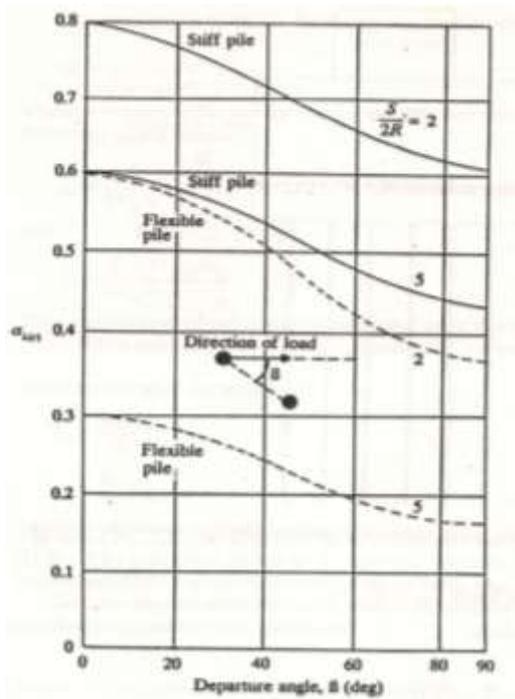
dimana,

$\alpha_{L(r)}$ = faktor interaksi (poulos, 1971),

$k_{x(g)}$ = konstanta pegas untuk tiang kelompok,

$c_{x(g)}$ = koefisien redaman untuk tiang kelompok,

n = banyaknya tiang dalam kelompok.



Gambar 10. Variasi dari faktor interaksi α_r , (Poulos, 1968)

b. Frekuensi natural teredam/frekuensi resonansi

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \left[\sqrt{\frac{k_{x(T)}}{m}} \right] \left[\sqrt{1-2D_x^2} \right] \quad (29)$$

c. Frekuensi natural tidak teredam

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{x(T)}}{m}} \quad (30)$$

d. Amplitudo getaran saat resonansi

$$A_{x(\text{resonansi})} = \frac{Q_o}{k_{x(T)}} \frac{1}{2D_x \sqrt{1-D_x^2}} \quad (31)$$

e. Amplitudo getaran selain saat terjadi resonansi

$$A_x = \frac{Q_o/k_{x(T)}}{\sqrt{[1-(\omega^2/\omega_n^2)]^2 + 4D_x^2(\omega^2/\omega_n^2)}} \quad (32)$$

Getaran horizontal untuk tiang kelompok dan pilecap

$$k_{x(T)} = \frac{\sum_{r=1}^n k_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + G_s + D_f + \bar{S}_{x1} \quad (26)$$

$$c_{x(T)} = \frac{\sum_{r=1}^n c_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + D_f r_o + \bar{S}_{x2} \sqrt{G_s \rho_s} \quad (27)$$

Tabel 7. Nilai C_{x1} , C_{x2} , S_{x1} dan S_{x2} untuk getaran horizontal

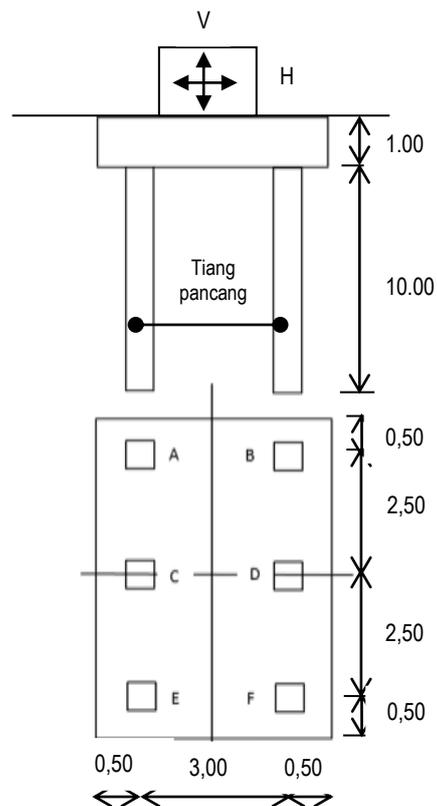
Angka poisson μ	Parameter	
0	$C_{x1} = 4.30$	$C_{x2} = 5.7$
0.5	$C_{x1} = 5.10$	$C_{x2} = 3.15$
0	$S_{x1} = 3.6$	$S_{x2} = 8.2$
0.25	$S_{x1} = 4.0$	$S_{x2} = 9.1$
0.4	$S_{x1} = 4.1$	$S_{x2} = 10.6$

a. Rasio redaman

$$D_z = \frac{c_{z(T)}}{2\sqrt{k_{x(T)}m}} \quad (28)$$

dimana m= massa dari pilecap dan mesin

HASIL DAN PEMBAHASAN

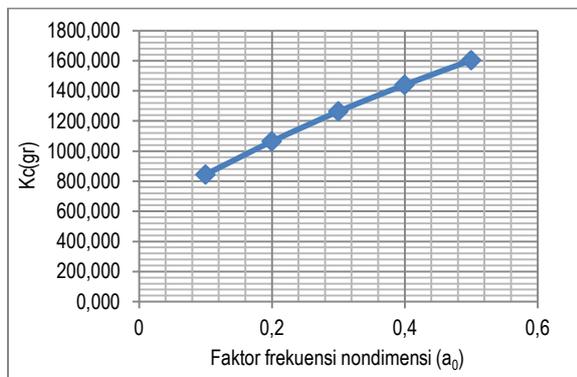


Gambar 11. Pondasi mesin dengan 6 tiang pancang

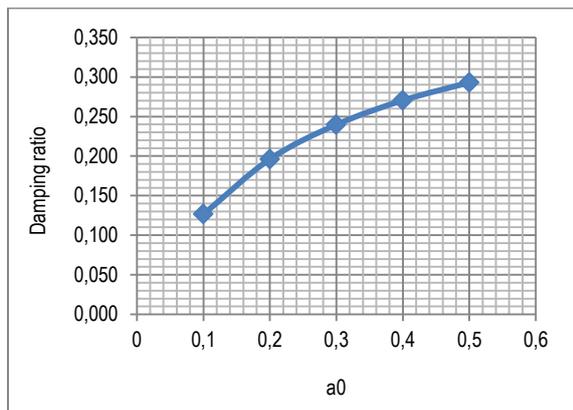
Pondasi tiang pancang kelompok yang terdiri dari 6 tiang pancang seperti pada Gambar 11 memikul beban mesin pada tanah dengan panjang tiang pancang 10m, Luas penampang tiang pancang 0,09 m², Elastisitas tiang pancang 27800MPa, Berat jenis beton 23,6kN/m³, dengan $a_0=0,1; 0,2 ; 0,3; 0,4; 0,5$, modulus geser tanah 17,7kPa, angka poisson 0,33, berat jenis tanah 16,5kN/m³ dan delta 0,4. Analisis dilakukan dengan mengabaikan pengaruh pilecap. Beban vertikal dan horizontal dinamik 296 kN.

Pada Gambar 12, Grafik hubungan antara a_0 dengan $K_c(\text{gr})$ terlihat bahwa tidak ada pengaruh dari penambahan faktor frekuensi nondimensi (a_0) pada koefisien konstanta pegas $K_c(\text{gr})$ pada getaran vertikal. Semakin besar (a_0) akan menyebabkan bertambah besarnya koefisien konstanta pegas.

Pada Gambar 13, grafik hubungan antara a_0 dengan damping ratio bahwa terdapat pengaruh dari penambahan faktor frekuensi nondimensi (a_0). Semakin besar nilai a_0 akan semakin besar ratio redaman.



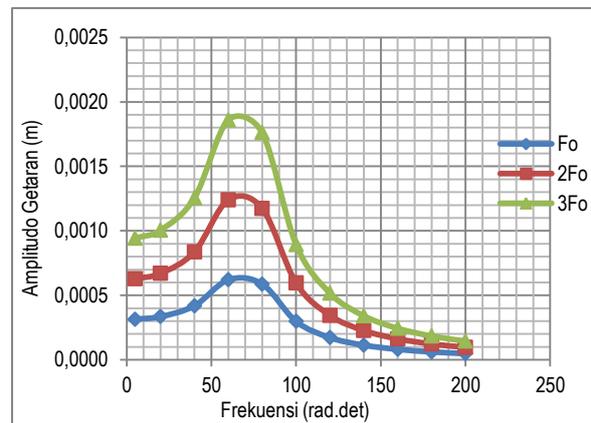
Gambar 12. grafik hubungan antara faktor dimensionless frekuensi (a_0) dengan $K_c(\text{gr})$



Gambar 13. Grafik hubungan antara a_0 dengan damping ratio

Tabel 8. Nilai Amplitudo pada setiap frekuensi pada $a_0=0,1$

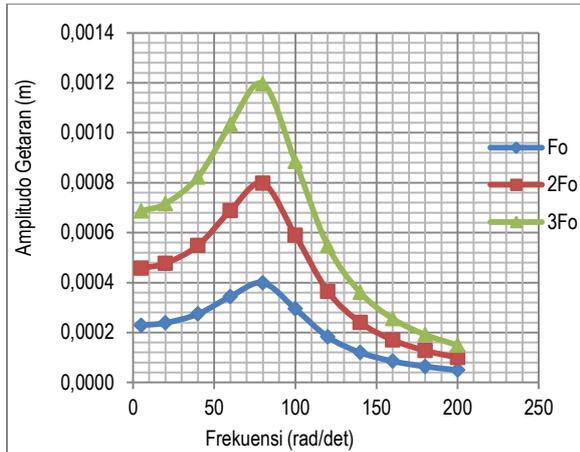
W	F_0	$2F_0$	$3F_0$
5	0.000314	0.000629	0.000943
20	0.000335	0.000670	0.001005
40	0.000418	0.000837	0.001255
60	0.000620	0.001240	0.001860
80	0.000587	0.001174	0.001761
100	0.000298	0.000596	0.000894
120	0.000172	0.000345	0.000517
140	0.000114	0.000227	0.000341
160	0.000081	0.000163	0.000244
180	0.000061	0.000123	0.000184
200	0.000048	0.000096	0.000145



Gambar 14. Grafik hubungan antara frekuensi operasi dengan amplitude getaran pada $a_0=0,1$

Tabel 9. Nilai Amplitudo pada setiap frekuensi pada $a_0=0,2$

W	F_0	$2F_0$	$3F_0$
5	0.0002289	0.0004578	0.0006868
20	0.0002387	0.0004774	0.0007161
40	0.0002742	0.0005483	0.0008225
60	0.0003442	0.0006884	0.0010326
80	0.0003987	0.0007974	0.0011960
100	0.0002947	0.0005895	0.0008842
120	0.0001823	0.0003646	0.0005469
140	0.0001201	0.0002402	0.0003603
160	0.0000852	0.0001703	0.0002555
180	0.0000638	0.0001276	0.0001914
200	0.0000497	0.0000995	0.0001492



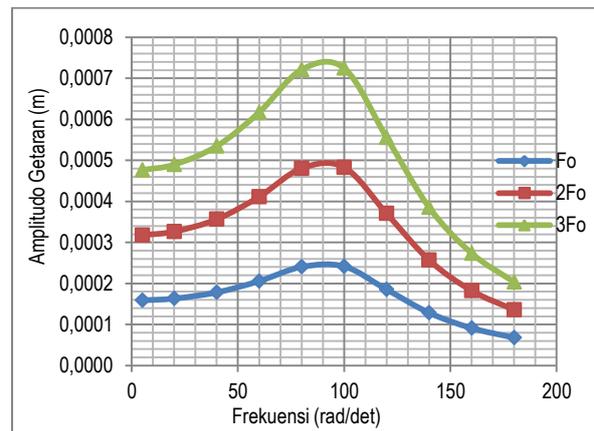
Gambar 15. grafik hubungan antara frekuensi operasi dengan amplitude getaran pada $a_0=0,2$

Tabel 11. Nilai Amplitudo pada setiap frekuensi pada $a_0=0,4$

w	Fo	2Fo	3Fo
5	0.000159	3.177E-04	0.000477
20	0.000163	3.264E-04	0.000490
40	0.000178	3.563E-04	0.000535
60	0.000206	4.113E-04	0.000617
80	0.000240	4.807E-04	0.000721
100	0.000241	0.000482984	0.000724
120	0.000185	0.000370474	0.000556
140	0.000128	0.000256879	0.000385
160	0.000091	0.000182408	0.000274
180	0.000068	0.00013548	0.000203

Tabel 10. Nilai Amplitudo pada setiap frekuensi pada $a_0=0,3$

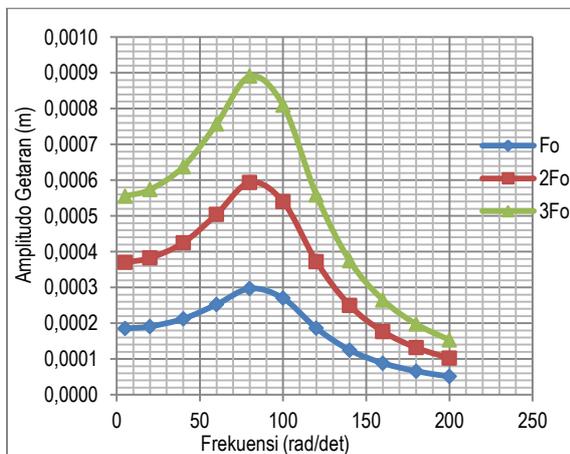
W	Fo	2Fo	3Fo
5	0.00019	0.00037	0.00056
20	0.00019	0.00038	0.00057
40	0.00021	0.00042	0.00064
60	0.00025	0.00050	0.00076
80	0.00030	0.00059	0.00089
100	0.00027	0.00054	0.00081
120	0.00019	0.00037	0.00056
140	0.00013	0.00025	0.00038
160	0.00009	0.00018	0.00027
180	0.00007	0.00013	0.00020
200	0.00005	0.00010	0.00015



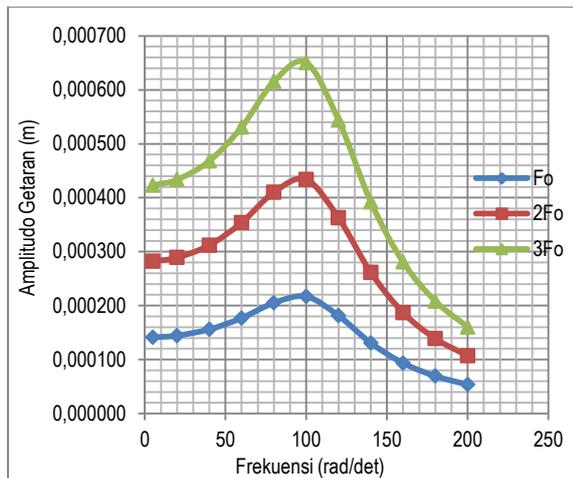
Gambar 17. grafik hubungan antara frekuensi operasi dengan amplitude getaran pada $a_0=0,4$

Tabel 12. Nilai Amplitudo pada setiap frekuensi pada $a_0=0,5$

w	Fo	2Fo	3Fo
5	0.000141	0.000282	0.000423
20	0.000144	0.000289	0.000433
40	0.000156	0.000312	0.000468
60	0.000177	0.000354	0.000531
80	0.000205	0.000410	0.000615
100	0.000217	0.000434	0.000650
120	0.000181	0.000363	0.000544
140	0.000131	0.000261	0.000392
160	0.000094	0.000187	0.000281
180	0.000069	0.000139	0.000208
200	0.000053	0.000107	0.000160



Gambar 16. grafik hubungan antara frekuensi operasi dengan amplitude getaran pada $a_0=0,3$



Gambar 18. grafik hubungan antara frekuensi operasi dengan amplitudo getaran pada $a_0=0,5$

Pada Gambar 14, 15, 16, 17 dan 18 terlihat bahwa semakin besar nilai a_0 semakin kecil amplitudo getaran. Amplitudo maksimum terjadi pada frekuensi diantara 60 sampai 100rad/det. Untuk nilai a_0 kecil memberikan nilai amplitudo terbesar. Pada setiap penambahan beban akan semakin besar amplitudo getaran yang terjadi.

PENUTUP

Kesimpulan

1. Pada hubungan antara a_0 dengan $K_c(\text{gr})$ terlihat bahwa terdapat pengaruh dari penambahan faktor frekuensi non dimensi (a_0) pada koefisien konstanta pegas $K_c(\text{gr})$ pada getaran vertikal. Semakin besar (a_0) akan menyebabkan bertambah besarnya koefisien konstanta pegas
2. Pada hubungan antara a_0 dengan damping ratio bahwa terdapat pengaruh dari penambahan faktor frekuensi nondimensi (a_0). Semakin besar nilai a_0 akan semakin besar rasio redaman.
3. Semakin besar nilai a_0 semakin kecil amplitudo getaran
4. Semakin besar beban semakin besar amplitudo getaran

Saran

Untuk menjadi perbandingan diharapkan menggunakan data dari penyelidikan dinamika tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Barkan, D. D., 1962. *Dynamic of Bases and Foundations*, Mc Graw-Hill Book Company, USA.
- Bowles, E. Josep, 1991. *Analisis dan Desain Pondasi*, Jilid 2, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Bowles E. Josep, 1982. *Foundation and Analysis Design*, Third Edition, Mc Graw-Hill Book Company, Japan.
- Bowles E. Josep dan J.K. Hainim, 1989. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*, Edisi Kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Das, Braja M., 2006. *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth Edition, Nelson A Division Of Thomson Canada Limited, Canada,
- Das, Braja M., 1993. *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Company, Canada.
- Shamsher, Prakash, 1981. *Soil Dynamics*, Mc Graw-Hill Book Company, USA.
- Shamsher, Prakash, 1988. *Foundations for Machines: Analysis and Design*, John Wiley and Sons,