

EVALUASI PONDASI MESIN DENGAN TIANG PANCANG AKIBAT GETARAN *RECIPROCATING ENGINE* (Studi Kasus PLTU UBOH 3 Banten)

Muhammad Rifqi Abdurrozak¹, Anwar Purnomo², dan Edy Purwanto³

¹Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
E-mail : rifqi_abdurrozak@uii.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
E-mail : Anwarpurnomo25@gmail.com

³Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
E-mail : purwanto_edy@yahoo.com

Abstrak. Pondasi yang menopang mesin dipengaruhi oleh beban statis yang berasal dari mesin dan pile cap serta getaran yang disebabkan dari gaya dinamis yang terjadi pada saat mesin beroperasi. Getaran yang berlebihan dapat menyebabkan mesin rusak dan memberikan efek yang merugikan pada struktur pondasi atau orang yang bekerja di dekat mesin tersebut. Secara keseluruhan akan mengurangi tingkat produktivitas dari mesin dan pekerja. Hasil dari penelitian di PLTU 3 Uboh Banten, berat total mesin FD fan dan pondasi mesin 861,9794 kN masih aman terhadap kapasitas dukung tiang pancang. Pada pembebanan dinamik saat mesin beroperasi nilai amplitudo getaran vertikal pada unit 1 sebesar 0,09886 mm dan pada unit 2 sebesar 0,09371 mm, kemudian akibat pembebanan getaran horizontal nilai amplitudo di unit 1 sebesar 0,05678 mm dan pada unit 2 sebesar 0,2017 mm. Perbedaan nilai amplitudo tersebut dipengaruhi oleh parameter tanah yaitu modulus geser, semakin besar nilai modulus gesernya maka amplitudo yang terjadi semakin kecil sedangkan untuk pengaruh frekuensi putar mesin berbanding lurus dengan amplitudo dimana semakin besar frekuensi putar mesin maka semakin besar juga amplitudo yang terjadi.

Kata kunci: evaluasi, getaran *reciprocating engine*, pondasi mesin

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan akan energi listrik berbanding lurus dengan meningkatnya pembangunan infrastruktur yang berkaitan dengan mesin-mesin pendukung pada unit pembangkit listrik. Mesin-mesin yang menghasilkan getaran tersebut membutuhkan perencanaan yang khusus karena selain mempertimbangkan beban statik juga mempertimbangkan beban dinamik yang terjadi akibat pengoperasian mesin tersebut.

Konstruksi bangunan yang bertumpu pada tanah secara keseluruhan akan mentransfer beban melalui pondasi. Pondasi adalah bagian struktur yang meneruskan beban bangunan dan berat pondasi itu sendiri ke lapisan tanah yang terletak di bawahnya.

Penyelidikan pada lapisan tanah merupakan prasyarat bagi perancangan elemen bangunan bawah (Bowles, 1977) dari penyelidikan tanah tersebut maka dapat menentukan jenis pondasi yang digunakan.

Pondasi tiang digunakan ketika lapisan tanah kuat terletak pada kedalaman yang jauh dari permukaan tanah.

Pondasi yang menopang mesin dipengaruhi oleh beban statis dan getaran yang disebabkan gaya dinamis pada saat mesin beroperasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui efek dari pembebanan mesin statik dan dinamik saat mesin beroperasi pada frekuensi puncak terhadap struktur dan pekerja yang ada disekitar mesin tersebut.

II. TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

A. Mesin

Menurut Srinivasulu (1976) berdasarkan pada kriteria perencanaan pondasi mesin, maka 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 atau putaran bolak-balik
- c. Mesin mesin kecepatan tinggi yang menghasilkan putaran rotasi tetap seperti turbin gas dan kompresor rotasi.

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

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

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

- a. Pondasi mampu memikul beban-beban luar atau beban dari struktur atas tanpa menyebabkan keruntuhan geser atau keruntuhan patah.
- b. Tidak menimbulkan kerusakan baik pada struktur secara keseluruhan dan juga terhadap mesin yang ada di atasnya.
- c. Biaya perawatan dan perbaikan untuk struktur pondasi mesin tidak mnghabiskan biaya yang banyak, walaupun perawatan dan perbaikan tidak dapat dihindari. Akan tetapi dengan desain pondasi dan evaluasi yang tetap maka dapat meminimalisir biaya tersebut.
- d. Tidak menimbulkan gangguan bagi pekerja yang berada disekitar mesin.

C. Nilai Amplitudo yang Diijinkan

Beberapa tipe mesin torak termasuk kedalam mesin tak seimbang yang mempunyai dampak berbahaya terhadap getaran. Amplitudo getaran yang besar akan membahayakan sistem secara keseluruhan. Jika amplitudo getaran besar maka akan membahayakan normalitas kerja mesin dan merusak struktur secara keseluruhan.

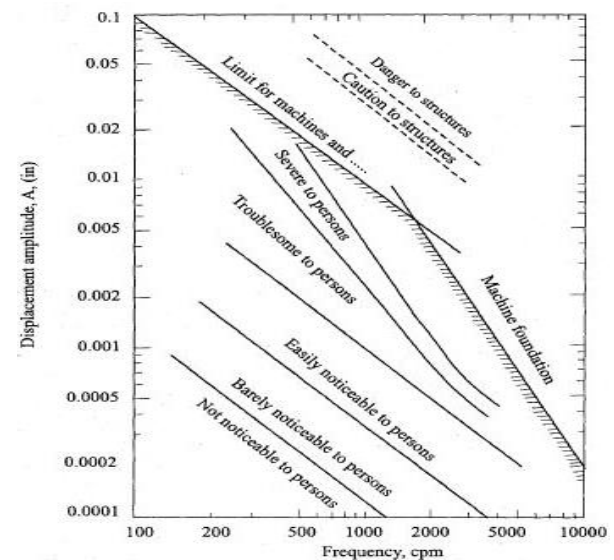
Pada penelitian kali ini, batasan *permissible* untuk amplitudo getaran menggunakan parameter yang dikeluarkan oleh richart (Braja M. Das, 1993).

D. Parameter Tanah

Dalam kasus pondasi mesin, selain parameter tanah untuk pembebanan statik diperlukan juga parameter tanah dinamik untuk melakukan analisis pada massa tanah yang mengalami beban dinamik (Srinivasulu, 1976). Parameter tanah yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Klasifikasi Tanah.
- b. Kadar Air Tanah.

- c. Berat Volume Tanah
- d. Modulus Geser Tanah.
- e. *Poisson Ratio*.



Gambar 1. Grafik batasan amplitudo dari Richart

Tabel 1. Angka *poisson* (Bowles, 1968)

Jenis tanah	Angka <i>poisson</i>
Lempung jenuh 0,4 – 0,5	0,4 – 0,5
Lempungtak 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 –
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	0,1 – 0,4
Loess	0,1 – 0,3

E. Modulus Geser Tanah (G)

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).

Modulus geser tanah dapat dihitung dengan Persamaan 1 dan 2.

$$G = \frac{6908(2,17-e)^2}{1+e} \sigma_o^{1/2} \quad (1)$$

(round grained e < 0,8)

$$G = \frac{3230(2,97-e)^2}{1+e} \sigma_o^{1/2} \quad (2)$$

(round grained e > 0,6)

σ_o = effective octahedral stress.

e = void ratio

F. Pondasi Tiang

Menurut Hardiyatmo (2002) pondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan apabila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Pondasi tiang juga dapat digunakan untuk mendukung bangunan yang menahan gaya angkat atas, terutama pada bangunan-bangunan tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat beban angin.

G. Pondasi Tiang Pancang untuk Mesin

Menurut Balamba (2013), pada umumnya pondasi mesin akan dibenamkan pada suatu kedalaman tertentu. Jika pondasi mesin dibenamkan pada kedalaman tertentu maka amplitudo getaran yang dihasilkan akan berbeda dengan pondasi mesin yang terletak di atas tanah, hal ini dikarenakan 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 bahwa 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:

- 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.
- 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.
- Diperlukan untuk meningkatkan frekuensi natural dari pondasi dan untuk memperkecil amplitudo getaran.
- Pertimbangan terhadap gaya gempa dan keadaan mesin.

H. Tiang dengan Getaran Vertikal.

Braja M. Das (1993) mengelompokan tiang secara umum menjadi dua bagian besar, diantaranya adalah sebagai berikut:

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

I. Tiang dengan Tahanan Ujung

Tiang pada jenis ini adalah tiang yang menembus ke lapisan keras atau batuan (*bed rock*). Lapisan keras yang ada dibawah atau disebut batuan dianggap mempunyai sifat getas atau kaku.

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

- Jika perbandingan W (berat mesin dan poer) sangat kecil (mendekati 0), maka frekuensi natural dari getaran dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{E_p}{\rho p}} \quad (3)$$

dimana:

f_n = frekuensi natural getaran

ω_n = frekuensi natural putaran

E_p = modulus elastisitas dari material tiang pondasi

ρp = massa jenis material tiang pondasi.

- Jika nilai W sama dengan berat dari tiang, frekuensi natural getaran dapat dinyatakan dalam Persamaan 4.

$$\frac{AL}{w} \gamma_p = \left[\frac{\omega_n}{V_{c(p)}} \right] \tan \left[\frac{\omega_n L}{V_{c(p)}} \right] \quad (4)$$

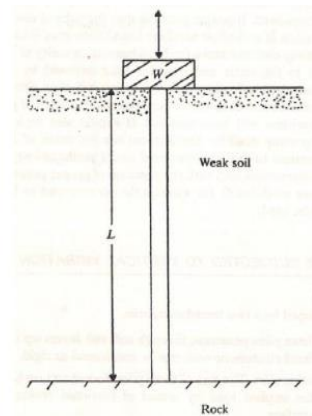
dimana:

A = luas penampang tiang

γ_p = berat satuan tiang

ω_n = frekuensi natural putaran

$V_{c(p)}$ = kecepatan perambatan gelombang dari tiang

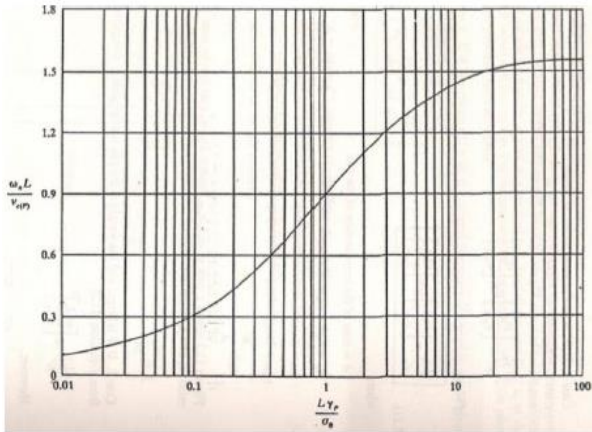


Gambar 2. Pondasi tiang dengan tahanan ujung (Braja M. Das, 1993)

Pada Gambar 3 menunjukkan hubungan antara $\omega_n L / V_{c(p)}$ dengan $L \gamma_p / \sigma_0$ yang digunakan untuk

menentukan ωn dan f_n . Dimana nilai $f_n = \frac{\omega n}{2\pi}$ dan

$$\text{nilai } \sigma = \frac{W}{A}$$



Gambar 3. Grafik hubungan $\omega n L / V_{c(p)}$ dengan $L\gamma_p/\sigma_o$

Jika besar dan berat dari W tiang diabaikan, maka digunakan Persamaan berikut ini:

$$\frac{AL\gamma_p}{W} = \left[\frac{\omega_n L}{V_{c(p)}} \right]^2 \quad (5)$$

$$V_{c(p)} = \sqrt{\frac{Ep}{\rho p}} = \sqrt{\frac{E_p g}{\rho p}} \quad (6)$$

dimana g = percepatan gravitasi

$$\omega n = \sqrt{\frac{E_p g}{LW}} \quad (7)$$

Atau

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p g}{\sigma_o L}} \quad (8)$$

$$\sigma_o = \text{tegangan aksial} = \frac{W}{A}$$

Richart (1962) membuat grafik untuk variasi nilai f_n berdasarkan panjang dari tiang pondasi dan besaran tegangan aksial.

Penggunaan Gambar 5 telah disediakan nilai E_p dan γ_p berdasarkan jenis material tiangnya. Nilai E_p dan γ_p dapat dilihat pada Tabel 2.

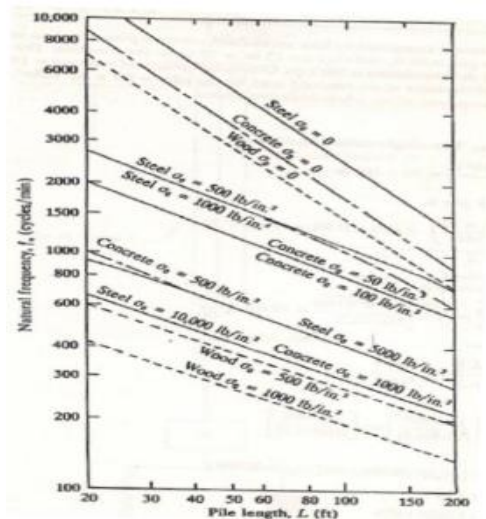
Tabel 2. Nilai E_p dan γ_p berdasarkan jenis material tiang (Braja M. Das, 1993)

Material	E_p (Kpa)	γ_p (kN/m ³)
Baja	200x10 ⁶	75,5
Beton	21x10 ⁶	23,6
Kayu	8,25x10 ⁶	6,3

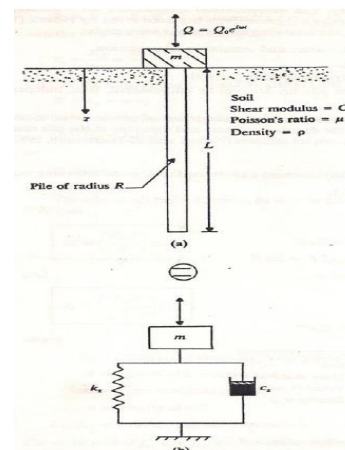
J. Tiang dengan Tahanan Gesek

Analisis tiang dengan tahanan gesek dibawah getaran vertikal berbeda dengan tiang tahanan ujung, pada tahanan gesek tidak ada beban yang dipindahkan dari tiang ke tanah.

Pada kondisi tiang dengan tahanan gesek, tiang dianggap sebagai sistem massa-pegas-redaman. Massa m diasumsikan sebagai masa dari mesin dan pile cap. Novak (1977) membuat formula matematika untuk menentukan kekakuan (K_z) dan redaman (C_z).



Gambar 4. Grafik frekuensi resonansi untuk getaran vertikal pada tiang tahanan ujung



Gambar 5. Pondasi tiang dengan tahanan gesek

Hubungan antara K_z dan C_z diberikan oleh Novak dan El-sharnouby (1983) seperti pada Persamaan 9 dan Persamaan 10.

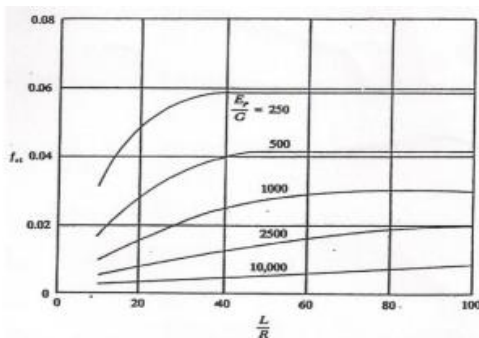
$$K_z = \left(\frac{E_p A}{R} \right) f_{z1} \quad (9)$$

$$C_z = \left(\frac{E_p A}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}} \right) f_{z2} \quad (10)$$

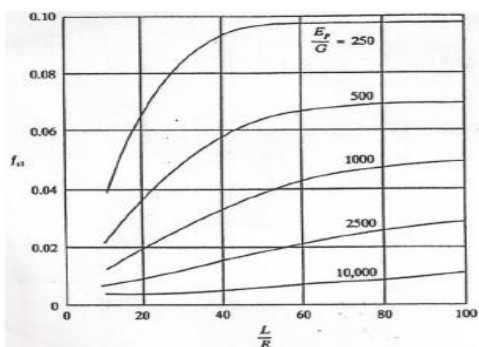
dimana:

- E_p = Modulus Elastisitas Material Tiang
- A = Luas penampang tiang
- G = Modulus geser tanah
- ρ = Masa jenis material tiang
- f_{z1}, f_{z2} = Parameter non-dimensional

Novak dan El-Sharnouby membuat grafik untuk menentukan parameter *non-dimensional* yang dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Variasi f_{z1} dan Ep/G untuk tahanan gesek (Novak dan El-sharnouby, 1983)



Gambar 7. Variasi f_{z2} dan Ep/G untuk tahanan gesek (Novak dan El-sharnouby, 1983)

K. Getaran Vertikal pada Kelompok Tiang

Secara umum untuk pondasi dalam dengan tiang didirikan dengan tiang yang lainnya kemudian membentuk suatu kelompok tiang. Kekakuan dan redaman dari tiang kelompok tidak sesederhana 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 Persamaan 11 dan Persamaan 12.

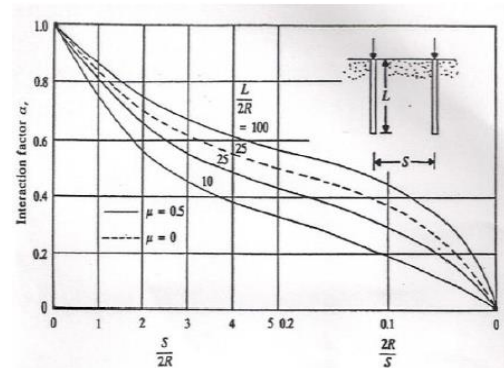
$$K_z(g) = \frac{\sum_1^n K_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (11)$$

$$C_z(g) = \frac{\sum_1^n C_z}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} \quad (12)$$

dimana:

- $K_z(g)$ = Konstanta pegas untuk tiang kelompok
- $C_z(g)$ = Konstanta redaman untuk tiang kelompok
- n = Jumlah tiang dalam satu kelompok
- α_r = Faktor interaksi

Perkiraan nilai faktor interaksi dapat diperoleh dari penyelesaian statis Poulos (1968) seperti Gambar 9.



Gambar 8. Variasi dari faktor interaksi α_r untuk getar vertikal (Das, 1993)

L. Getaran Vertikal pada Tiang Kelompok dan Pile Cap

Untuk tiang kelompok dengan *pilecap*, hubungan antara kekakuan dan redaman dari pondasi dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 13 dan 14.

$$K_z(cap) = Gr_o \left[C'_1 + \frac{G_s}{G} \frac{D_f}{r_o} S'_1 \right] \quad (13)$$

$$C_z(cap) = r_o^2 \sqrt{\rho G} \left[C'_2 + S'_2 \frac{D_f}{r_o} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{G \rho}} \right] \quad (14)$$

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 $\dot{C}_1 = 0$ dan $\dot{C}_2 = 0$, sehingga persamaanya menjadi Persamaan 15 dan Persamaan 16.

$$K_{z(cap)} = G_s D_f \dot{S}_1 \quad (15)$$

$$C_{z(cap)} = D_f r_o \dot{S}_2 \sqrt{G_s \rho_s} \quad (16)$$

Dengan demikian, untuk tiang kelompok dan pilecap persamaanya menjadi Persamaan 17 dan 18.

$$K_z(T) = \frac{\sum_1^n K_z}{\sum_r^n \alpha r} + G_s D_f \dot{S}_1 \quad (17)$$

$$C_z(T) = \frac{\sum_1^n K_z}{\sum_r^n \alpha r} + G_s D_f \dot{S}_2 \sqrt{G_s \rho_s} \quad (18)$$

Dimana $K_{z(T)}$ dan $C_{z(T)}$ konstanta kekakuan dan redaman untuk tiang kelompok dan pilecap.

Untuk mendapatkan nilai C_1 , C_2 , S_1 dan S_2 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai C_1 , C_2 , S_1 dan S_2 untuk getaran vertikal (Braja M. Das, 1993)

Angka poisons 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 (*Dashpot*)

$$D_z = \frac{C_z(T)}{\sqrt[2]{K_z(T)^m}} \quad (19)$$

b. Frekuensi natural teredam atau frekuensi resonansi

$$f_m = f_n \left[\sqrt{1 - D_x^2} \right] \quad (20)$$

c. Frekuensi natural tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (21)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (22)$$

d. Amplitudo getaran saat resonansi

$$A_z = \frac{Q_o}{K_z(T)} \frac{1}{2D_z \sqrt{1 - D_z^2}} \quad (23)$$

e. Amplitudo getaran selain saat tidak terjadi resonansi.

$$A_z = \frac{Q_o}{K_z(T)} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) + 4D_z^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)} \quad (24)$$

M. Getaran Horizontal pada Tiang Tunggal.

Menurut novak (1974) dan Novak & El-Sharnouby (1983) mengatakan bahwa konstanta kekakuan dan konstanta redaman untuk tiang tunggal mempunyai rumus yang sama dengan getaran vertikal yang sudah dibahas sebelumnya. Persamaan hubungan antara pegas dan konstanta redaman untuk tiang tunggal dengan getaran horizontal seperti pada Persamaan 25 dan 26.

$$K_x = \left(\frac{E_p I_p}{R^3} \right) f_{x1} \quad (25)$$

$$C_x = \left(\frac{E_p I_p}{R^2 V_s} \right) f_{x2} \quad (26)$$

dimana:

E_p = Modulus elastisitas material tiang

I_p = Momen inersia penampang tiang

V_s = Kecepatan gelombang geser tanah

R = Jari-jari tiang

f_{x1}, f_{x2} = Parameter non-dimensional

Kemudian dari rumus tersebut, Novak dan El-Sharnouby membuat tabel untuk menentukan parameter *non-dimensional* (f_{x1} , f_{x2}). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter kekakuan dan redaman untuk getaran horizontal ($L/R > 25$) (Das, 1993)

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	0,659	0,1556
0,4	10.000	0,047	0,0119
	2.500	0,0132	0,0329
	1.000	0,0261	0,0641
	500	0,0436	0,1054
	250	0,0726	0,1717

N. Getaran Horizontal pada Tiang kelompok

Secara umum untuk pondasi dalam dengan tiang didirikan dengan tiang yang lainnya kemudian membentuk suatu kelompok tiang. Kekakuan dan redaman dari tiang kelompok tidak sesederhana pada tiang tunggal.

Kekakuan dari tiang kelompok dapat diperoleh dengan Persamaan 27 dan Persamaan 28.

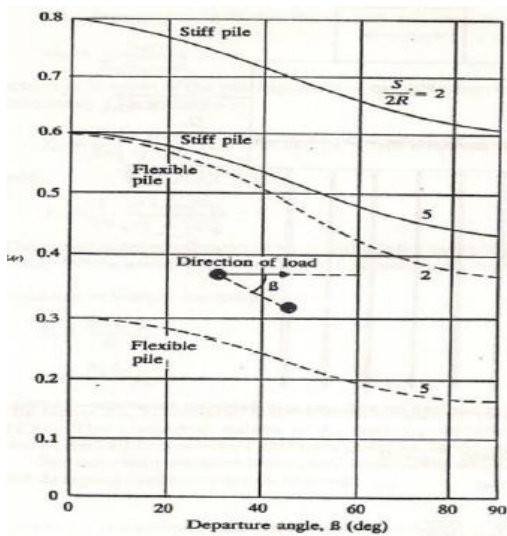
$$K_x(g) = \frac{\sum_1^n K_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (27)$$

$$C_x(g) = \frac{\sum_1^n C_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} \quad (28)$$

dimana:

- $K_{x(g)}$ = Konstanta pegas untuk tiang kelompok
- $C_{x(g)}$ = Konstanta redaman untuk tiang kelompok
- n = Jumlah tiang dalam kelompok
- α_r = Faktor interaksi

Perkiraan nilai faktor interaksi dapat diperoleh dari grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Variasi faktor interaksi α_r untuk getaran horizontal

O. Getaran Horizontal pada Tiang kelompok dan Pile Cap

Untuk tiang kelompok dengan *pilecap*, hubungan antara kekakuan dan redaman dari pondasi dapat dirumuskan dalam Persamaan 29 sampai 30.

$$K_x(g) = \frac{\sum_1^n C_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + G_s + D_f + \dot{S}_{x1} \quad (29)$$

$$C_x(g) = \frac{\sum_1^n C_x}{\sum_{r=1}^n \alpha_{L(r)}} + D_{f_o} r_o + \dot{S}_{x2} \sqrt{G_s \rho_s} \quad (30)$$

Untuk nilai parameter C_{x1} , C_{x2} , S_{x1} dan S_{x2} dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. 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 (*Dashpot*)

$$D_x = \frac{C_{x(T)}}{\sqrt[2]{K_{x(T)} m}} \quad (31)$$

b. Frekuensi natural teredam atau frekuensi resonansi

$$f_m = f_n \left[\sqrt{1 - 2D_x^2} \right] \quad (32)$$

c. Frekuensi natural tidak teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (33)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z(T)}{m}} \quad (34)$$

d. Amplitudo getaran saat resonansi

$$A_x = \frac{Q_o}{K_z(T)} \frac{1}{2D_x \sqrt{1 - D_x^2}} \quad (35)$$

e. Amplitudo getaran selain saat tidak terjadi resonansi

$$A_x = \frac{Q_o}{K_z(T)} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + 4D_x^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)} \quad (36)$$

III. METODE PENELITIAN

Objek dari penelitian ini adalah menganalisis dan mengetahui efek dari beban dinamik yang diakibatkan oleh pengoperasian mesin FD fan 1476 Rpm terhadap struktur pondasi mesin, lapisan tanah dan lingkungan yang ada di sekitar pondasi mesin. Subjek penelitian ini adalah pondasi mesin FD fan di PLTU Ubuh 3 Banten.

A. Data Penelitian

Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah

data sekunder. Data sekunder adalah data-data yang didapat dari kearsipan instansi terkait, dalam hal ini data didapatkan dari PLTU UBOH 3 BANTEN. Data-data tersebut sebagai berikut.

1. *As Built Drawing*, data ini berupa gambar yang berisi tentang detail lokasi pabrik dan juga detail lengkap desain struktur yang ada di kawasan PLTU UBOH 3 Banten.
2. Data Tanah, berupa data hasil dari penyelidikan laboratorium dan pengujian lapangan tanah di lokasi PLTU 3 UBOH Banten.
3. Data mesin, spesifikasi mesin yang dievaluasi dalam penelitian kali ini adalah mesin *FD fan* pada unit 1 dan 2 PLTU UBOH 3 Banten.

Tabel 6. Spesifikasi mesin *FD fan* (*As Built Drawing* 3x315 Mw PLTU 3 Banten)

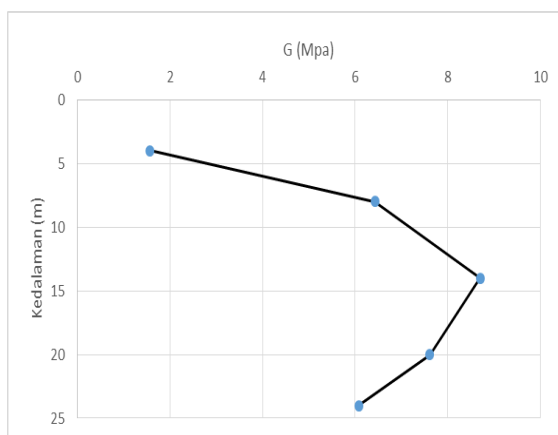
<i>Forced draft fan</i>		<i>Motor</i>	
<i>Total weight</i>	9100 kg	<i>Weight</i>	4100 kg
<i>Density</i>	1.171 kg/m ³	<i>Speed</i>	1476 r/min
<i>Speed</i>	1476 r/min	<i>Voltage</i>	6000 v
<i>Temperatur</i>	30° C	<i>Capacity</i>	500 kw
<i>Pressure</i>	3373 Pa	<i>Model</i>	YKK450-4YHW
<i>Flow</i>	107.7 m ³ /s	<i>Bearing motor lube oil</i>	
<i>Model</i>	ASN-1962/900	<i>Inboard</i>	6208 ZZ
<i>Manufacture</i>	Shanghai electric machinery Co.Ltd	<i>Outboard</i>	6208 ZZ

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pondasi tiang pancang kelompok terdiri dari 6 tiang pancang pada Gambar 10 dan Gambar 11 memikul beban mesin dan pondasi blok dengan berat total 861,9794 kN. Panjang pondasi tiang pancang di kedua unit sebesar 15m dan diameter tiang pancang 50 cm.

A. Modulus Geser Tanah.

Hasil rekapitulasi perhitungan modulus geser tanah pada penelitian kali ini dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8, serta pada Gambar 10 dan Gambar 11.



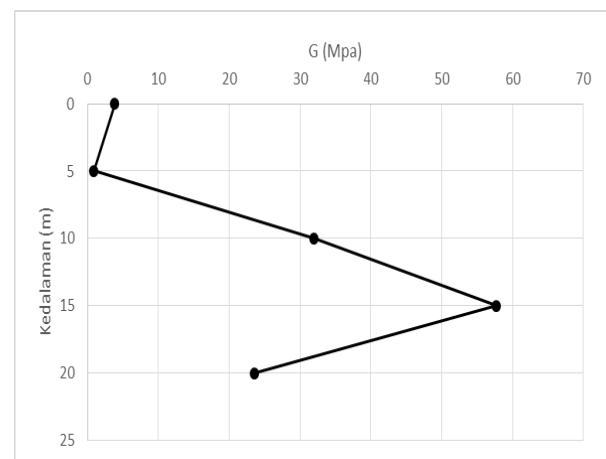
Gambar 10. Grafik modulus geser pada kedalaman tanah tertentu titik BH 3

Tabel 7. Rekapitulasi perhitungan modulus geser titik BH 3

<i>Depth (m)</i>	<i>Shear modulus</i>						<i>Unit</i>
	σ_1	K_0	σ_2	σ_0	e	G	
3,50-4,0	15,45	0,99	15,33	15,37	2,33	1,57	MPa
7,5-8,0	35,07	0,70	24,68	28,14	1,92	6,43	MPa
13,5-14,0	69,97	0,71	49,39	56,25	1,94	8,70	MPa
17,5-20	98,69	0,71	69,71	79,37	2,07	7,61	MPa
23,50-24,00	112,66	0,71	79,72	90,70	2,37	3,30	MPa
27,50-28,00	126,83	0,71	89,99	102,27	2,55	1,60	MPa

Tabel 8. Rekapitulasi perhitungan modulus geser titik BH 4

<i>Depth (m)</i>	<i>Shear modulus</i>						<i>Unit</i>
	σ_1	K_0	σ_2	σ_0	e	G	
3,50-4,0	21,11	0,69	14,58	16,75	2,04	3,81	MPa
7,5-8,0	37,47	0,71	26,56	30,20	2,55	0,90	MPa
13,5-14,0	80,24	0,43	34,22	49,56	1,21	31,92	MPa
17,5-20	108,30	0,69	74,79	85,96	1,004	57,76	MPa
23,50-24,00	151,81	0,4	60,45	90,90	1,185	44,94	MPa



Gambar 11. Grafik modulus geser pada kedalaman tertentu titik BH 4

B. Analisis Kapasitas Dukung Tiang Kelompok

Pada penelitian kali ini, pondasi mesin *FD fan* menggunakan tiang pancang sebanyak 6 buah. Hasil perhitungan kapasitas dukung tiang kelompok dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi perhitungan kapasitas dukung tiang kelompok

<i>Unit</i>	<i>Beban total (kN)</i>	<i>Kapasitas dukung tiang kelompok (kN)</i>	<i>Keterangan</i>
1	861,9794	987,9603	Aman
2	861,9794	1022,198	Aman

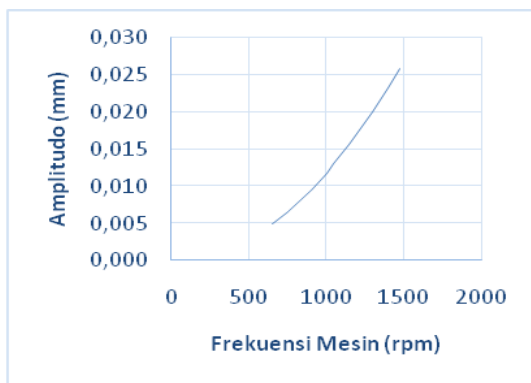
C. Analisis Getaran Vertikal

Pondasi mesin dengan tiang pancang yang memikul mesin *FD fan* selain memikul beban statik, pondasi juga menerima beban dinamik dari pengoperasian mesin. Dengan nilai *unbalanced forced* sebesar 24,407 kN dan frekuensi pengoperasian mesin 1476 Rpm.

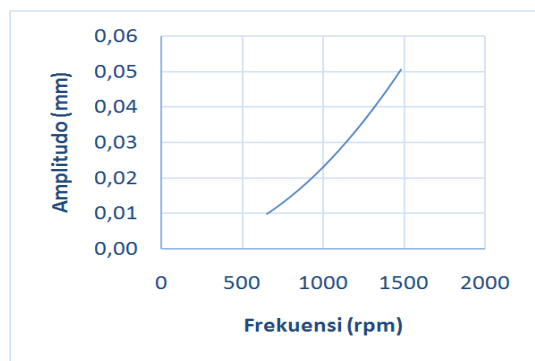
Rekapitulasi hasil perhitungan amplitudo getaran vertikal dapat dilihat pada Tabel 10, dan Grafik amplitudo serta frekuensi pada getaran vertikal unit 1 dan vertikal unit 2 dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.

Tabel 10. Rekapitulasi perhitungan amplitudo getaran vertikal

Unit	Frekuensi mesin (Rpm)	Amplitudo pada frekuensi mesin (mm)	Amplitudo pada frekuensi resonansi (mm)	Keterangan
1	1476	0,09886	0,02582	Berbahaya Terhadap Pekerja
2	1476	0,09371	0,05061	Berbahaya Terhadap Pekerja



Gambar 12. Grafik amplitudo vs frekuensi pada getaran vertikal unit 1



Gambar 13. Grafik amplitudo vs frekuensi pada getaran vertikal unit 2

D. Analisis Getaran Horizontal

Pondasi mesin dengan tiang pancang yang memikul mesin FD *fan* selain memikul beban statik, pondasi juga menerima beban dinamik dari pengoperasian mesin. Dengan nilai *unbalanced forced* sebesar 24,407 kN dan frekuensi pengoperasian mesin 1476 Rpm. Rekapitulasi hasil perhitungan amplitudo getaran vertikal dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Rekapitulasi perhitungan amplitudo getaran horizontal

Unit	Frekuensi mesin (Rpm)	Amplitudo pada frekuensi mesin (mm)	Amplitudo pada frekuensi resonansi (mm)	Keterangan
1	1476	0,09371	0,05061	Berbahaya Terhadap Pekerja
2	1476	0,01252	0,2017	Melebihi Batas Aman Mesin

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

- Kapasitas dukung kelompok pondasi tiang pancang pada unit 1 titik BH 4 sebesar 8165,1303 kN dan pada unit 2 titik BH 3 sebesar 7282,1043 kN maka kapasitas dukung tersebut aman untuk menahan beban total pada saat mesin mati dan berat *pile cap* serta dudukan mesin sebesar 861,9407kN.
- Pada getaran vertikal peningkatan frekuensi mesin akibat kebutuhan beban daya listrik yang harus diproduksi mengakibatkan peningkatan amplitudo getaran dengan nilai maksimal amplitudo sebesar 0,02582 mm (unit 1 BH 4) dan 0,05061 mm (Unit 2 BH 3). Sedangkan Pada getaran horizontal peningkatan frekuensi mesin akibat kebutuhan beban daya listrik yang harus diproduksi mengakibatkan peningkatan amplitudo getaran dengan nilai maksimal amplitudo sebesar 0,05678 mm (unit 1 BH 4) dan 0,2017 mm (Unit 2 BH 3). Penambahan berat mesin setelah beroperasi sebesar 24,4063 kN sehingga total berat menjadi 886,3470 kN, maka kapasitas dukung kelompok tiang pancang pada kedua unit masih aman terhadap penambahan beban yang terjadi.
- Tingkat kenyamanan pada kedua unit memiliki perbedaan jika berpedoman pada batasan yang sudah di tentukan oleh Richart. Pada unit 1 saat pembebanan getaran vertikal masuk kedalam kategori mudah dirasakan oleh pekerja sedangkan pada unit 2 masuk kedalam kategori sangat keras terasa oleh pekerja. Kemudian untuk akibat getaran horizontal pada unit 1 getaran terasa sangat keras terasa oleh pekerja sedangkan pada unit 2 getaran sudah melebihi batas limit mesin.

B. Saran

- Untuk penelitian yang berikutnya sebaiknya menggunakan data aktual dari penyelidikan dinamik tanah
- Pengujian vibrasi mesin secara menyeluruh harus dilakukan guna mengetahui kondisi dari ketidaksetimbangan mesin akibat pengoperasian yang terus menerus sehingga dapat mengontrol nilai amplitudo yang terjadi.
- Perlu diadakannya *balancing* atau penambahan

beban pada mesin supaya dapat meredam getaran yang terjadi tidak menimbulkan amplitudo yang berlebihan.

- d. Perlu adanya *early warning* disekitar mesin FD *fan* berupa papan peringatan supaya pekerja dapat berhati-hati terhadap efek getaran yang ditimbulkan.
- e. Perlu adanya *early warning* disekitar mesin FD *fan* berupa papan peringatan supaya pekerja dapat berhati-hati terhadap efek getaran yang ditimbulkan.

DAFTAR PUSTAKA

Balamba, S., 2013, "Analisis Respon Dinamik Pondasi Tiang Pancang Kelompok Akibat Beban Dinamik Mesin Pada Getaran Vertikal dan Horizontal", *Jurnal*, Universitas Samratulangi.

Balamba, S., 2013 "Pengaruh Dimensi dan Kedalaman Tertanam Terhadap Respons Dinamis Pondasi Mesin

Tipe Blok Pada Getaran Rocking dan Torsi", *Jurnal*, Universitas Samratulangi.

Das.B.M., 2006. *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth Edition McGraw-Hill Book Company, USA.

Das.B.M., 1993. *Principles of Foundation Engineering*, Cengage Learning, USA

Das.B.M., 1993. *Principles of Soil Dynamics*, Cengage Learning, USA

Irasari, P., Nugraha, A.S., dan Kasim, M., 2010, *Analisis Getaran Generator Magnet Permanen 1 Kw Hasil Rancang Bangun Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan MEKATRONIK*, LIPI, Bandung.

Pranoto, H. & Setiawan, S.A., 1999. Perencanaan Pondasi untuk Mesin *Reciprocating* Berfrekuensi Tinggi".

Triandini, L.W., 2007, *Reduksi Vibrasi Pada Pondasi Mesin PLTU Menggunakan Massa Seismik Tereadam*, Tesis, Magister Teknik Sipil Universitas Indonesia, Jakarta