

## Analisis Perbandingan Respon Dinamis Pondasi Mesin Akibat Getaran Vertikal Dan Horizontal Mesin Pada Tanah Lunak–Sedang-Keras

Ria Elfriani Harahap<sup>1</sup>, Darlina Tanjung<sup>2</sup>, Ronal H.T Simbolon<sup>3</sup>

Teknik Sipil Universitas Islam Sumatera Utara<sup>1</sup>

Dosen Teknik Sipil Universitas Islam Sumatera Utara<sup>2,3</sup>

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara

Kota Medan, 20217, Indonesia

Email: [riaharahap10@gmail.com](mailto:riaharahap10@gmail.com), [darlinauisu@gmail.com](mailto:darlinauisu@gmail.com), [ronal.h.t.simbolon@uisu.ac.id](mailto:ronal.h.t.simbolon@uisu.ac.id)

### Abstrak

Pondasi mesin merupakan elemen struktur yang digunakan untuk meneruskan beban dari mesin di atas pondasi ke dalam tanah. Selain memperhitungkan beban statis yang berasal dari berat mesin dan berat pondasi, perencanaan pondasi mesin juga harus memperhitungkan gaya dinamis yang dihasilkan oleh mesin. Pondasi jenis ini banyak digunakan untuk mesin industri, mesin bolak-balik, mesin rotasi, dan mesin lainnya. Dalam mendesain pondasi mesin, selain dapat menerima beban statis, pondasi mesin juga harus memenuhi persyaratan amplitudo dan frekuensi izin. Untuk menganalisis perbandingan respon dinamis yang terjadi pada saat mesin beroperasi pada kondisi tanah (lunak, sedang, dan keras), di mana memiliki pengaruh terhadap stabilitas pondasi tiang itu sendiri. Berdasarkan hal itu, diperlukan tiga parameter yaitu parameter tanah, mesin (berupa mesin pompa jenis *submersible pumps*), dan pondasi. Analisis yang digunakan pada pembahasan ini yaitu menggunakan metode analisis Novak. Dari hasil analisis yang didapatkan, Respon Dinamis berupa amplitudo yang paling besar terjadi pada tanah keras dengan getaran vertikal yaitu  $3,545 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm (mendekati batas ijin amplitudo) dan getaran horizontal sebesar  $6,932 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm. Selain itu, hasil beban dinamis yang diakibatkan saat mesin pompa beroperasi jauh lebih kecil dibandingkan dengan beban statis.

**Kata kunci:** Dinamika Tanah, *Submersible Pumps*, Pondasi Mesin, Respon Dinamis.

### 1. Pendahuluan

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. Amplitudo izin dari pondasi mesin ditentukan pada kepentingan relatif dari mesin dan kepekaan dari struktur sekitar terhadap getaran.

**Tabel 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	
	I. 3000 Rpm	
	a. Getaran vertikal	0,002-0,003
	b. Getaran horisontal	0,004-0,005
	II. 1500 Rpm	
	a. Getaran vertikal	0,004-0,006
	b. Getaran horisontal	0,007-0,009

Sumber: P. Srinivasulu, 1976

Dalam penelitian ini ada beberapa hal yang perlu dihitung dalam menentukan respon dinamis yang dihasilkan oleh mesin terhadap pondasi yaitu, antara lain:

- A. konstanta kekakuan dan redaman serta respon dinamis sistem pondasi berupa frekuensi alami, frekuensi resonansi, dan amplitudo pada masing-masing kondisi tanah (lunak-sedang-keras).
- B. gaya dinamis yang bekerja pada kondisi tanah lunak, sedang, dan keras.

## 2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian ini dimulai dari metode pengumpulan data dengan studi kepustakaan yaitu sumber data yang diambil berasal dari buku-buku, jurnal, atau literatur-literatur lainnya.

### 2.1. Metode Pengumpulan Data

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan yang dianggap perlu dalam pengumpulan data secara rinci dapat diuraikan dibawah berikut:

1. Melakukan studi kepustakaan atau review terhadap buku-buku dan jurnal-jurnal yang terkait dengan desain pondasi tiang pancang dan pondasi mesin.
2. Pengumpulan data-data diambil dari penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian ini. Adapun parameter- parameter yang dibutuhkan, antara lain :
  - a. Parameter tanah, meliputi :  
Modulus geser tanah (G), yang ditentukan dengan rumus empiris.
    - 1) Poisson ratio (" $\mu$ ")
    - 2) Modulus elastisitas tanah ( $E_s$ )
    - 3) Berat volume tanah (" $\gamma$ " \_ "s")
  - b. Parameter pondasi, meliputi:
    - 1) Dimensi tiang pancang
    - 2) Dimensi Pile cap (blok pondasi)
    - 3) Propertis tiang dan pile cap

- c. Parameter mesin, meliputi :
- 1) Berat mesin
  - 2) Frekuensi operasi mesin

Berikut data-data atau parameter yang digunakan pada penelitian ini.

A. Parameter Tanah

Jenis tanah yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu tanah lunak (berupa loess), tanah sedang (pasir tidak padat), dan tanah keras (pasir padat). Adapun data tanah yang diperlukan yaitu modulus geser tanah (G), yang diperoleh dari hasil perhitungan nilai korelasi sebelumnya.

Tabel 2. Nilai Gs

KONDISI TANAH	MODULUS ELASTISITAS (ES)	ANGKA POISSON (U)	GS (KG/CM <sup>2</sup> )	GS (KN/M <sup>2</sup> )
LUNAK	200	0.25	80	7845.28
SEDANG	250	0.25	100	9806.6
KERAS	900	0.4	321.43	31521.21

B. Parameter Pondasi

1. Panjang tiang = 12 m
2. Jari-jari tiang = 0,15 m
3. Jarak antar tiang = 2 m
4. Berat volume tiang ( $\gamma_p$ ) dan berat volume *pile cap* ( $\gamma_c$ ) = 24 kN/m<sup>3</sup>
5. Modulus elastisitas tiang ( $E_p$ ) = 21x10<sup>6</sup> kN/m<sup>2</sup>
6. Ukuran *pile cap* = 3,50 m x 3,50 m
7. Tebal *pile cap* = 1,2 m

C. Parameter Pondasi

1. Mesin yang digunakan yaitu berupa *submersible pumps* dengan tipe JCU 10X12-22.
2. Berat rotor ( $w_r$ ) = 4 kN
3. Berat mesin dan peralatannya = 1500 kg = 14,710 kN
4. Dimensi : Tinggi = 1,638 m  
 Panjang = 1,638 m  
 Lebar = 1,095 m
5. Kecepatan operasi ,f = 1450 rpm
6. Eksentrisitas massa tak seimbang (*unbalanced mass*), e = 2,54 x 10<sup>-5</sup> m
7. Gaya tak seimbang bekerja pada arah longitudinal (sumbu y) pada frekuensi operasi, dengan tipe gaya *rotation-mass-exitation*.  
 $F_o = 2.m_r.e. \omega_e^2$

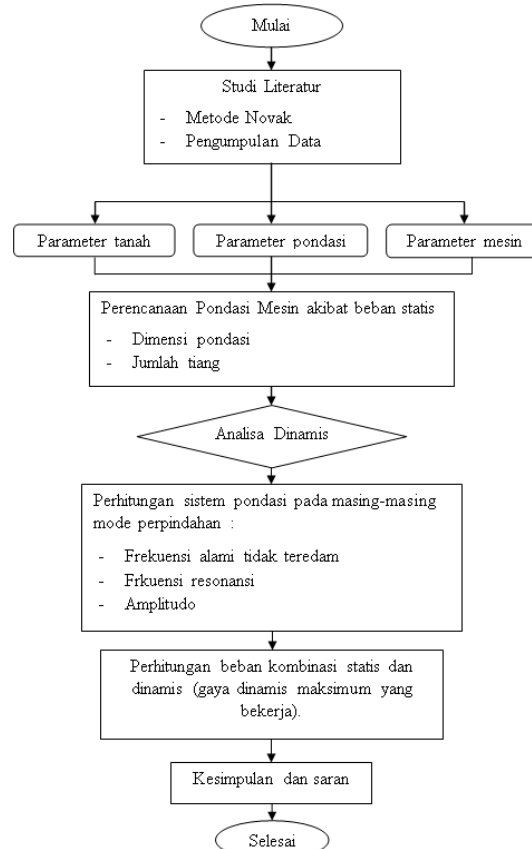
$$= 2.0,4 \cdot 2,54 \times 10^{-5} \cdot 151,767^2 = 0,468 \text{ kN}$$

## 2.2. Metode Analisis Data

Dalam perhitungan pondasi tiang pancang dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Menentukan konstanta tanah.
  - a. Modulus Elastisitas Tanah ( $E_s$ )
    - Tanah lunak, yaitu jenis tanah yang diasumsikan berupa tanah Loess.
    - Tanah sedang, yaitu jenis tanah yang diasumsikan berupa Pasir tidak padat.
    - Tanah keras, yaitu jenis tanah yang diasumsikan berupa Pasir padat.
  - b. Angka Poisson, " $\mu$ "
  - c. Modulus geser tanah ( $G_s$ )
2. Menentukan dimensi dan jumlah tiang pancang.
3. Menghitung daya dukung statis.
4. Analisa dinamis untuk mendapatkan konstanta kekakuan dan redaman sistem pondasi berdasarkan metode Novak.
5. Menentukan respon sistem pondasi yaitu frekuensi alami, frekuensi resonansi, dan amplitudo.
6. Membuat perbandingan hasil respon sistem pondasi pada kondisi masing-masing tanah (lunak-sedang-keras).
7. Membuat kesimpulan dan saran.

Bagan alir penelitian secara garis besar dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

### 3. Hasil Analisis

#### 3.1 Analisis Dinamis Pada Tanah Lunak

**Tabel 3.** Hasil Respon Dinamis Tanah Lunak

No	Parameter	Vertikal	Horizontal	Rocking
1	Jari-jari tiang	0,15	0,15	0,15
2	Konstanta kekakuan	371.962,692 kN/m	82.327,128 kN/m	1.880.247,086 kN/m
3	Konstanta redaman	2.360,645 kN-s/m	1.162,769 kN-s/m	1.739,480 kN-s/m
4	Rasio redaman	0,340	0,356	0,144
5	Frekuensi natural	1.024,882 rpm	482,159 rpm	2.188,720 rpm
6	Frekuensi resonansi	1.168,873 rpm	558,042 rpm	2.235,568rpm
7	Gaya unbalanced F(t)	0,468 kN	0,468 kN	0,468. Z' =0,945 kN-m
8	Amplitudo pada Frekuensi resonansi	(a) 9,83 x 10 <sup>-4</sup> mm	(a) 9,45 x 10 <sup>-4</sup> mm	3,9x10 <sup>-6</sup> rad
9	Amplitudo pada Frekuensi operasi	(b) -1,65x10 <sup>-2</sup> mm	(b) -1,64x 10 <sup>-3</sup> mm	8,17x 10 <sup>-7</sup> rad
10	Amplitudo akibat vibrasi rocking	(c) $A_{z1} = A_{\phi} \cdot P/2$ =3,9 x10 <sup>-6</sup> .1750 =6,825x10 <sup>-3</sup> mm	(c) $A_{x1} = A_{\phi} \cdot h$ =3,9x10 <sup>-6</sup> .1200 =4,68x10 <sup>-3</sup> mm	
11	Amplitudo total (Z)	a + b + c =-8,69x10 <sup>-3</sup> mm	a + b + c =3,99x10 <sup>-3</sup> mm	

Batasan kondisi dinamik berdasarkan hasil yang diperoleh yaitu sebagai berikut.

- Getaran Vertikal = -8,692 x10<sup>-3</sup> mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm
- Getaran Horizontal = 3,985 x10<sup>-3</sup> mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm

### 3.2 Analisis Dinamis Pada Tanah Sedang

Tabel 4. Hasil Respon Dinamis Tanah Sedang

No	Parameter	Vertikal	Horizontal	Rocking
1	Jari-jari tiang	0,15	0,15	0,15
2	Konstanta kekakuan	395.716,365 kN/m	88.211,088	1.964.711,736
3	Konstanta redaman	2.540,33 kN-s/m	76,965 kN-s/m	2.560,875 kN-s/m
4	Rasio redaman	0,355	0,391	0,150
5	Frekuensi natural	1.057,099 rpm	499,099 rpm	2.205,277 rpm
6	Frekuensi resonansi	1.222,304 rpm	599,008 rpm	2.256,635rpm
7	Gaya unbalanced F(t)	0,468 kN	0,468 kN	0,468. Z' =0,945 kN-m
8	Amplitudo pada Frekuensi resonansi	(a) $A_z = 9,47 \times 10^{-4} \text{ mm}$	(a) $A_x = 8,73 \times 10^{-4} \text{ mm}$	$A_\phi = 3,75 \times 10^{-6} \text{ rad}$
9	Amplitudo pada Frekuensi operasi	(b) $A_z = 1,77 \times 10^{-2} \text{ mm}$	(b) $A_x = 8,77 \times 10^{-4} \text{ mm}$	$7,93 \times 10^{-7} \text{ rad}$
10	Amplitudo akibat vibrasi rocking	(c) $A_{z1} = A_\phi \cdot P/2$ $= 3,75 \times 10^{-6} \cdot 1750$ $= 6,56 \times 10^{-3} \text{ mm}$	(c) $A_{x1} = A_\phi \cdot h$ $= 3,75 \times 10^{-6} \cdot 1200$ $= 4,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$	
11	Amplitudo total (Z)	a + b + c $= 2,521 \times 10^{-2} \text{ mm}$	a + b + c $= 6,25 \times 10^{-3} \text{ mm}$	

Batasan kondisi dinamik berdasarkan hasil yang diperoleh yaitu sebagai berikut.

- Getaran Vertikal =  $2,521 \times 10^{-2} \text{ mm}$  < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm
- Getaran Horizontal =  $6,25 \times 10^{-3} \text{ mm}$  < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm

### 3.3 Analisis Dinamis Pada Tanah Keras

**Tabel 5.** Hasil Respon Dinamis Tanah Lunak

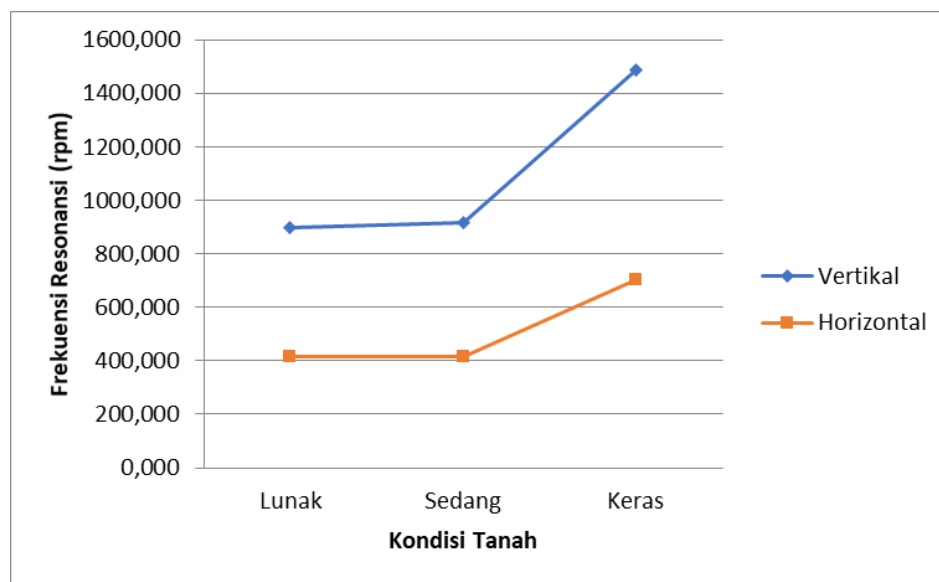
No	Parameter	Vertikal	Horizontal	Rocking
1	Jari-jari tiang	0,15	0,15	0,15
2	Konstanta kekakuan	894.674,45 kN/m	107.701,689 kN/m	3.399.379,13
3	Konstanta redaman	2.682,258 kN-s/m	171,962 kN-s/m	1.326,16
4	Rasio redaman	0,249	0,469	0,116
5	Frekuensi natural	1.589,475 rpm	939,143 rpm	2.900,771
6	Frekuensi resonansi	1.698,252 rpm	1.254,895 rpm	2.940,610rpm
7	Gaya unbalanced F(t)	0,468 kN	0,468 kN	0,468. Z' =0,945 kN-m
8	Amplitudo pada Frekuensi resonansi	(a) $A_z = 1,30 \times 10^{-2}$ mm	(a) $A_x = 7,588 \times 10^{-4}$ mm	$4,83 \times 10^{-6}$ rad
9	Amplitudo pada Frekuensi operasi	(b) $A_z = 1,40 \times 10^{-3}$ mm	(b) $A_x = 3,734 \times 10^{-4}$ mm	$3,64 \times 10^{-7}$ rad
10	Amplitudo akibat vibrasi rocking	(c) $A_{z1} = A_\phi \cdot P/2$ $= 4,83 \times 10^{-6} \cdot 1750$ $= 8,45 \times 10^{-3}$ mm	(c) $A_{x1} = A_\phi \cdot h$ $= 4,83 \times 10^{-6} \cdot 1200$ $= 5,80 \times 10^{-3}$ mm	
11	Amplitudo total (Z)	a + b + c $= 3,545 \times 10^{-2}$ mm	a + b + c $= 6,932 \times 10^{-3}$ mm	

Batasan kondisi dinamik berdasarkan hasil yang diperoleh yaitu sebagai berikut.

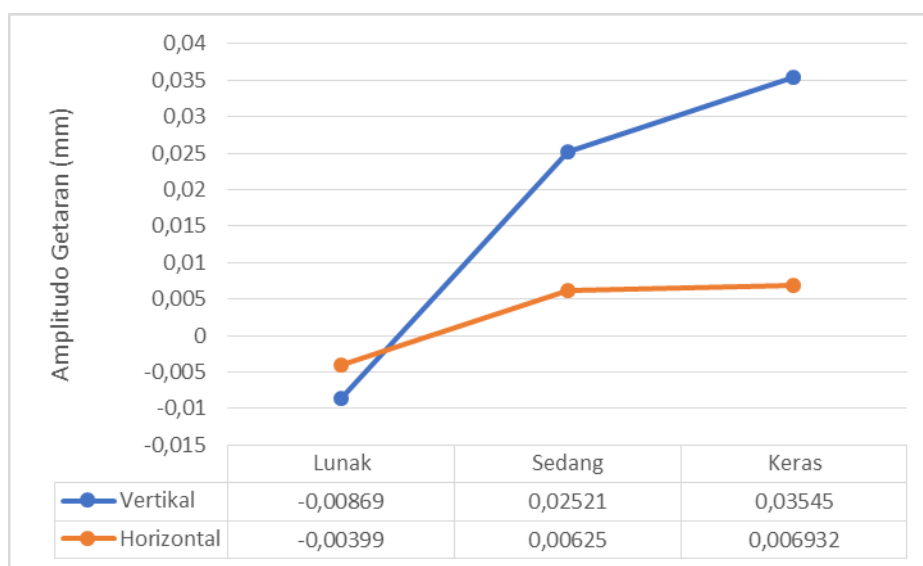
- Getaran Vertikal =  $3,545 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm
- Getaran Horizontal =  $6,932 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm

### 3.4 Grafik Hasil Respon Dinamis

Dari hasil analisis respon dinamis, maka dapat dibuat grafik perbandingan nilai amplitudo akibat beban vertikal dan beban horizontal yang dihasilkan dari masing-masing situs yaitu tanah lunak, tanah sedang dan tanah keras.



**Gambar 2.** Grafik Frekuensi resonansi akibat getaran Vertikal dan Horizontal pada kondisi tanah (lunak-sedang-keras)



**Gambar 3.** Grafik Amplitudo akibat getaran Vertikal dan Horizontal pada kondisi tanah (lunak-sedang-keras)

### 3.5 Beban Maksimum yang Diterima Tiang

Pada penelitian ini direncanakan jumlah tiang sebanyak 2 tiang dengan jarak antar tiang yaitu 2 meter. Sehingga beban aksial yang didukung masing-masing tiang adalah  $317,11/2$  yaitu lebih kurang sebesar 158,555 kN.

Beban maksimum (P maks) yang diterima oleh tiang kelompok dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P \text{ maks} = W + F_{\text{din}_{\text{maksimum}}}$$

- a. Pada kondisi tanah lunak

$$\begin{aligned} F_{\text{din}_{\text{maksimum}}} &= Z \sqrt{k^2 + (c\omega_e)^2} \\ &= 3,99 \times 10^{-6} \sqrt{371962,692^2 + (2360,645 \cdot 151,767)^2} \\ &= 2,06 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban dinamis dianggap beban yang bekerja pada pusat gravitasi dari pondasi. Maka beban yang diterima oleh satu tiang akibat beban dinamis yaitu:

$$P \text{ (beban) untuk 1 tiang} = 2,06 / 2 = 1,03 \text{ kN}$$

Beban yang diterima oleh tiang akibat beban dinamis relatif sangat kecil dibandingkan beban statis.

$$\text{Sehingga } P \text{ maks} = 317,11 + 2,06 = 319,17 \text{ kN}$$

- b. Pada kondisi tanah sedang

$$\begin{aligned} F_{\text{din}_{\text{maksimum}}} &= Z \sqrt{k^2 + (c\omega_e)^2} \\ &= 2,521 \times 10^{-5} \sqrt{395716,365^2 + (2540,33 \cdot 151,767)^2} \\ &= 13,928 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban dinamis dianggap beban yang bekerja pada pusat gravitasi dari pondasi. Maka beban yang diterima oleh satu tiang akibat beban dinamis yaitu:

$$P \text{ (beban) untuk 1 tiang} = 13,928 / 2 = 6,964 \text{ kN}$$

Beban yang diterima oleh tiang akibat beban dinamis relatif sangat kecil dibandingkan beban statis.

$$\text{Sehingga } P \text{ maks} = 317,11 + 13,928 = 331,038 \text{ kN}$$

- c. Pada kondisi tanah keras

$$\begin{aligned} F_{\text{din}_{\text{maksimum}}} &= Z \sqrt{k^2 + (c\omega_e)^2} \\ &= 3,545 \times 10^{-5} \sqrt{894674,45^2 + (2682,258 \cdot 151,767)^2} \\ &= 34,845 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban dinamis dianggap beban yang bekerja pada pusat gravitasi dari pondasi. Maka beban yang diterima oleh satu tiang akibat beban dinamis yaitu:

$P$  (beban) untuk 1 tiang =  $34,845 / 2 = 17,422$  kN

Beban yang diterima oleh tiang akibat beban dinamis relatif sangat kecil dibandingkan beban statis.

Sehingga  $P$  maks =  $317,11 + 34,845 = 351,955$  kN

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Semakin keras suatu kondisi tanah maka semakin besar frekuensi resonansi/ frekuensi alami teredam yang terjadi akibat beban dinamis mesin. Sehingga dari hasil analisis yang dilakukan sebelumnya dapat diambil kesimpulan yaitu :
  - a) Pada kondisi tanah lunak, frekuensi resonansi/alami teredam (1168,873 rpm) akibat beban dinamis tidak mendekati/ lebih rendah dari frekuensi mesin (1450 rpm) sehingga sistem pada pondasi yang direncanakan tidak terjadi resonansi.
  - b) Pada kondisi tanah sedang, frekuensi resonansi/alami teredam (1222,304 rpm) akibat beban dinamis tidak mendekati/ lebih rendah dari frekuensi mesin (1450 rpm) sehingga sistem pada pondasi yang direncanakan tidak terjadi resonansi.
  - c) Pada kondisi tanah keras, frekuensi resonansi/alami teredam (1698,252 rpm) akibat beban dinamis tidak mendekati/ lebih tinggi dari frekuensi mesin (1450 rpm) sehingga sistem pada pondasi yang direncanakan terhindar dari terjadinya resonansi.
2. Pada sistem pondasi yang direncanakan, amplitudo paling besar saat mesin bekerja terjadi pada kondisi tanah keras sehingga hampir mendekati batas ijin amplitudo (Tabel 1) yaitu :
  - a) Tanah lunak
    - Getaran Vertikal =  $-8,692 \times 10^{-3}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm.
    - Getaran Horizontal =  $3,985 \times 10^{-3}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm.
  - b) Tanah sedang
    - Getaran Vertikal =  $2,521 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm.
    - Getaran Horizontal =  $6,25 \times 10^{-3}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm.
  - c) Tanah Keras
    - Getaran Vertikal =  $3,545 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,04 mm.
    - Getaran Horizontal =  $6,932 \times 10^{-2}$  mm < amplitudo ijin yaitu 0,07 mm.
3. Gaya yang bekerja akibat beban dinamis pada masing-masing kondisi tanah relatif kecil sehingga penurunan yang diakibatkan beban dinamis juga relatif kecil bila dibandingkan beban statis. Selain itu, pada hasil beban kombinasi statis dan dinamis yang bekerja pada pondasi lebih besar terjadi pada tanah keras yaitu tanah lunak (319,17 kN); sedang (331,038 kN); dan keras (351,955 kN).

#### Referensi

- [1] Bowles, J. E. 1996. *Foundation Analysis and Design*, Fifth Edition. Singapore: McGraw-Hill Company.
- [2] Hardiyatmo, H. C. 2008. *Teknik Fondasi 2*, Edisi II. Cetakan IV. Yogyakarta: Beta Offset

- [3] Masyhur Irsyam. (2008). *Dinamika Tanah dan Pondasi Mesin* (U. J. Fauzi (ed.)). ITB
- [4] Novak, M. 1974. *Dynamic Stiffness and Damping of Piles*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 4
  
- [5] Novak, M. 1977. *Vertikal Vibration of Floating piles*. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103
- [6] Novak, M. and El Sharnouby, B. 1983. *Stiffness and Damping Constants of Single Piles*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109
- [7] Prakash, S. and Puri, V. K. 1988. *Foundations for Machines: Analysis and Design*, John Wiley and Sons, USA