

Diterima : 11 April 2025 | Selesai Direvisi : 14 Mei 2025 | Disetujui : 12 Juni 2025 | Dipublikasikan : Juli 2025
DOI : <https://doi.org/10.24853/jk.16.2.157-169>
Copyright © 2025 Jurnal Konstruksia
This is an open access article under the CC BY-NC licence (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Pengaruh Variasi Geometri (L/B) Terhadap Respon Dinamis Pondasi Mesin

Budi Satiawan¹, Andika Setiawan¹, Tanjung Rahayu Raswitaningrum¹ dan Irnanda Satya Soerjatmodjo¹

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510

Email korespondensi: budi.satiawan@umj.ac.id

ABSTRAK

Geometri dari pondasi mesin diketahui memiliki pengaruh yang sangat sensitif terhadap karakter dinamis pondasi mesin. Penelitian ini dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh variasi dari lebar pondasi (L) terhadap panjang pondasi (B) terhadap karakteristik dinamik pondasi mesin. Dari penelitian diperoleh dengan bertambahnya dimensi lebar pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0.912 akan terjadi kenaikan frekuensi arah vertikal (fnz) hingga 8,76%, kenaikan frekuensi alami arah horizontal (fnx) sebesar 4,53%, penurunan total displacement arah vertikal hingga sebesar 38,77%, penurunan total displacement arah horizontal, X hingga 33,23% dan total displacement arah horizontal, Y hingga 74,87%.

Kata kunci: Pondasi mesin, dinamis, lebar pondasi (L), panjang pondasi (B), frekuensi alami, displacement

ABSTRACT

The geometry of machine foundations is known to have a very sensitive influence on their dynamic characteristics. This research was conducted to investigate the effect of variations in the foundation width (L) with respect to the foundation length (B) on the dynamic characteristics of machine foundations. The research findings indicate that with an increase in the foundation width dimension (L), where the L/B ratio changes from 0.6 to 0.912, there will be an increase in the vertical natural frequency (fnz) up to 8.76%, an increase in the horizontal natural frequency (fnx) of 4.53%, a decrease in the total vertical displacement up to 38.77%, a decrease in the total horizontal displacement, X up to 33.23%, and a decrease in the total horizontal displacement, Y up to 74.87%.

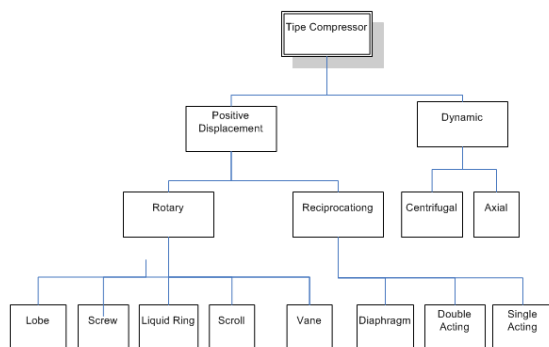
Keywords: Machine foundation, dynamic, foundation width (L), foundation length (B), natural frequency, displacement

1. PENDAHULUAN

Tipe pondasi mesin banyak ditemui pada fasilitas industri Hulu migas. Pondasi ini banyak digunakan untuk mendukung peralatan yang bergetar (Rotating Equipment) diantaranya adalah Pondasi Pompa (Pump Foundation), Pondasi Kompresor Gas (Gas Compressor

Package. Umumnya, *gas compressor* ini banyak digunakan untuk kebutuhan pengangkatan minyak di sumur menggunakan teknologi *gaslift*, pengumpulan gas, transmisi dan distribusi maupun dapat digunakan untuk mengurangi besaran volume gas untuk kebutuhan pengiriman menggunakan

tangker. Konstruksi suatu struktur, terutama pondasi yang menopang beban dinamis seperti mesin industri, sering kali dihadapkan pada tantangan desain dan pelaksanaan pada kondisi tanah yang bercirikan tanah dengan kekerasan rendah atau tanah lunak [8]. Karakteristik tanah lunak, yang meliputi kekuatan geser rendah, kompresibilitas tinggi, dan potensi likuefaksi, dapat secara signifikan memengaruhi perilaku pondasi dan kinerja struktur di atasnya. Dalam konteks rekayasa sipil, penempatan suatu alat berat atau mesin industri pada sebuah lokasi seringkali berimplikasi pada perencanaan dan desain struktur yang akan memberikan beban tambahan akibat penempatan alat tersebut [9]. Beban tambahan ini tidak hanya bersifat statis akibat berat alat, tetapi yang lebih krusial adalah beban dinamis berupa getaran yang dihasilkan selama operasi mesin. Terdapat beberapa tipe *compressor* sesuai teknologi yang ada (gambar 1). Aspek pertimbangan utama untuk pemilihan kompresor ini adalah kapasitas *gas compressor*, *suction pressure* dan *discharge pressure* serta rasio tekanan (*pressure ratio*).



Gambar 1. Tipe *Gas Compressor*

Untuk memastikan unit *compressor* ini agar selalu berada pada posisi dan elevasi yang tepat sesuai kebutuhan desain selama fase operasi maka paket *compressor* ini akan dipasang diatas pondasi. Tipe pondasi yang umumnya banyak digunakan untuk menunjang instalasi *gas compressor* ini adalah system pondasi rigid yang terbuat dari struktur

beton bertulang yang didesain mampu menerima beban statis dan beban dinamis yang diakibatkan dari getaran mesin.

Beban statis yang bekerja pada sistem pondasi mesin dapat berasal dari:

- Berat sendiri (pondasi)
- Berat dari peralatan atau mesin (paket *compressor*)
- Beban gempa statik
- Beban angin

Sedangkan beban dinamis dapat berasal dari getaran yang berasal dari pergerakan bagian-bagian mesin seperti gerakan *crank shaft / rotor* dan *piston*. Kriteria desain pondasi mesin akibat beban statis adalah sebagai berikut :

- Memastikan tegangan tanah yang terjadi tidak melebihi daya dukung ijin tanah.
- Penurunan yang terjadi baik akibat penurunan seketika dan konsolidasi tidak melebihi batas yang diijinkan.

Sedangkan kriteria dinamis yang harus dipertimbangkan adalah:

- Resonansi tidak diperkenankan terjadi dimana frekuensi mesin tidak boleh sama dengan frekuensi sistem (mesin-pondasi-tanah).
- Amplitudo yang terjadi pada pondasi tidak melebihi amplitudo yang diperkenankan dari pabrikan.
- Frekuensi alami pondasi umumnya dijauhkan 20% hingga 33% dari *operating speed* mesin [1].

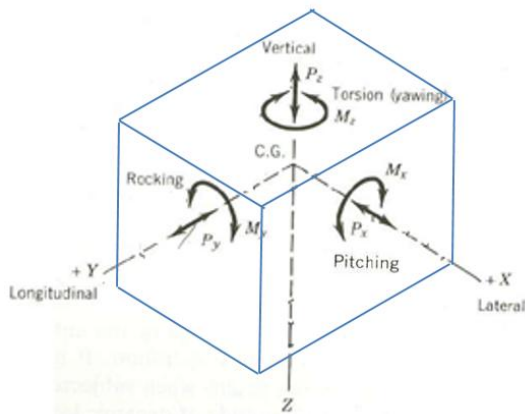
2. METODELOGI PENELITIAN

Metodelogi yang digunakan dalam penelitian ini adalah membuat simulasi perhitungan menggunakan formulasi empiris yang diperoleh dari literatur sebagai pendekatan dalam menghitung karakter dinamis pondasi mesin.

3. LANDASAN TEORI

Terdapat 6 derajat kebebasan untuk mode getaran pondasi block. 3 mode berupa gerakan arah translasi X, Y dan Z dan 3

mode rotasi (rocking, pitching dan torsion) sesuai gambar 2.



Gambar 2. Mode vibrasi pada pondasi Block

Secara umum untuk menganalisa efek dinamis getaran mesin pada pondasi mesin perlu dilakuka perhitungan dengan tahapan sebagai berikut.

Menghitung massa dan Momen Inertia

Untuk gerakan arah vertikal dan horizontal

$$m = W/g \quad (1)$$

dimana:

- m = total massa
- W = total berat mesin+pondasi
- g = percepatan gravitasi

Untuk momen inersia inersia dengan mode gerakan rotasi (rocking dan pitching) dapat dihitung menggunakan formulasi sebagai berikut:

$$I_{\psi}(\text{mesin}) = m \cdot k^2 \quad (2)$$

dimana:

- I_{ψ} = Momen inersia mesin (tabel 1)
- m = total massa mesin
- k = jarak dari pusat paket mesin +tebal pondasi

Tabel 1. Momen Inersia

SLENDER ROD		$I_y = I_z = \frac{1}{12} mL^2$
THIN RECTANGULAR PLATE		$I_x = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$ $I_y = \frac{1}{12} ma^2$ $I_z = \frac{1}{12} mb^2$
RECTANGULAR PRISM		$I_x = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$ $I_y = \frac{1}{12} m (a^2 + L^2)$ $I_z = \frac{1}{12} m (b^2 + L^2)$ $I_x = I_z + mL^2/4$
THIN DISK		$I_x = \frac{1}{2} mr^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{4} mr^2$
CIRCULAR CYLINDER		$I_x = \frac{1}{2} ma^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{12} m (3a^2 + L^2)$ $I_x = I_z + mL^2/4$
CIRCULAR CONE		$I_x = \frac{3}{10} ma^2$ $I_y = I_z = \frac{3}{8} m (\frac{1}{4} a^2 + h^2)$
SPHERE		$I_x = I_y = I_z = \frac{2}{5} ma^2$

Total inersia mesin dan pondasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{\psi} = \sum_i^n \left[\frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) + m_i k_i^2 \right] \quad (3)$$

Menghitung Spring Constant

Nilai *Equivalent radius* untuk pondasi persegi, r_o dapat dihitung sesuai tabel 2 untuk masing-masing pola gerakan pondasi.

Tabel 2. Nilai r_o dan koefisien *embedment*

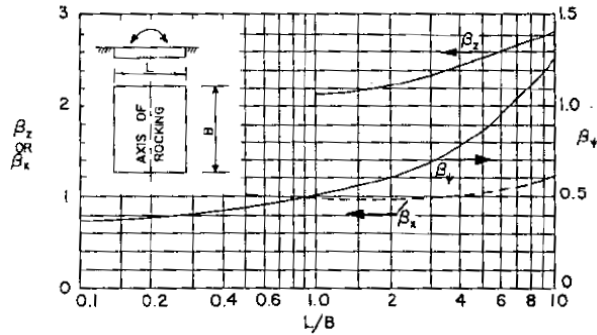
Mode of Vibration	r_o for Rectangular Foundation	Coefficient
Vertical	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_z = 1 + 0.6(1-\nu)(h/r_o)$
Horizontal	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_x = 1 + 0.55(2-\nu)(h/r_o)$
Rocking	$\sqrt{BL^3/3\pi}$	$\eta_{\psi} = 1 + 1.2(1-\nu)(h/r_o) + 0.2(2-\nu)(h/r_o)^3$
Torsional	$\sqrt[3]{BL(B^2 + L^2)/6\pi}$	None available

Notes: h is the depth of foundation embedment below grade;
 L is horizontal dimension perpendicular to axis of rocking; B is remaining horizontal dimension.

Koefisien *embedment* pondasi untuk menghitung *spring constant* dapat

dihitung berdasarkan tabel 2 sesuai dengan pola gerakan.

Besaran koefisien β_z , β_x , β_y , dan β_ψ dapat dihitung menggunakan grafik pada gambar 3. Nilai-nilai ini akan digunakan untuk menghitung nilai *equivalent spring constant* (k)



Gambar 3. Koefisien β_z , β_x dan β_y untuk pondasi persegi

Nilai *Equivalent spring constant* untuk pondasi persegi dapat dihitung berdasarkan tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Equivalent Spring Constant*

Mode of Vibration	Circular Footing	Rectangular Footing
Vertical	$k_z = \frac{4Gr_0}{1-\nu}$	$k_z = \frac{G}{1-\nu} \beta_z \sqrt{BL} \eta_z$
Horizontal	$k_x = \frac{32(1-\nu)Gr_0}{7-8\nu} \eta_x$	$k_x = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{BL} \eta_x$
Rocking	$k_\psi = \frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)} \eta_\psi$	$k_\psi = \frac{G}{1-\nu} \beta_\psi BL^2 \eta_\psi$
Torsional	$k_\theta = \frac{16Gr_0^3}{3}$	No solution available; Use r_0 from Table 4-2

Damping Ratio

Nilai *damping ratio embedment factor* dapat dihitung menggunakan tabel 4 sesuai dengan masing-masing pola gerakan translasi dan rotasi.

Tabel 4. *Damping Ratio Embedment Factor*

Mode of Vibration	Damping Ratio Embedment Factor
Vertical	$\alpha_z = \frac{1 + 1,9(1-\nu) \frac{h}{r_0}}{\sqrt{n_z}}$
Horizontal	$\alpha_y = \frac{1 + 1,9(2-\nu) \frac{h}{r_0}}{\sqrt{n_x}}$
Rocking	$\alpha_\psi = \frac{1 + 0,7(1-\nu) \left(\frac{h}{r_0}\right) + 0,6(2-\nu) \left(\frac{h}{r_0}\right)^3}{\sqrt{n_\psi}}$

Nilai *Mass Ratio* dan *Damping Ratio* dapat dihitung menggunakan tabel 5.

Tabel 5. Tabel *Equivalent Damping Ratio* untuk Pondasi Bundar dan Persegi

Mode of Vibration	Mass (or Inertia) Ratio	Damping Ratio D
Vertical	$Bz = \frac{1-\nu}{4} \frac{W}{\gamma r_0^3}$	$z = \frac{0,425}{\sqrt{Bz}} \alpha_z$
Horizontal	$Bx = \frac{7-8\nu}{32(1-\nu)} \frac{W}{\gamma r_0^3}$	$Dx = \frac{0,288}{\sqrt{Bx}} \alpha_x$
Rocking	$B_\psi = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_\psi}{\rho r_0^5}$	$D_\psi = \frac{0,15\alpha_\psi}{(1+n_\psi B_\psi)\sqrt{n_\psi B_\psi}}$
Torsional	$B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho r_0^5}$	$D_\theta = \frac{0,5}{1+2B_\theta}$

Perhitungan nilai n_ψ dapat diambil berdasarkan nilai b_ψ .

Tabel 6. Tabel Nilai n_ψ terhadap variasi nilai B_ψ

B_ψ	5	3	2	1	0,8	0,5	0,2
n_ψ	,079	1,110	1,143	1,219	1,251	1,378	,600

Geometrical damping ratio dapat dihitung menggunakan tabel 7.

Tabel 7. Tabel Nilai *Mass Ratio* dan *Damping Ratio*

Mode of Vibration	Mass (or Inertia) Ratio	Damping Ratio D
Vertical	$B_z = \frac{1-\nu}{4} \frac{W}{\gamma r_0^3}$	$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}} \alpha_z$
Horizontal	$B_x = \frac{7-8\nu}{32(1-\nu)} \frac{W}{\gamma r_0^3}$	$D_x = \frac{0,288}{\sqrt{B_x}} \alpha_x$
Rocking	$B_\psi = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_\psi}{\rho r_0^5}$	$D_\psi = \frac{0,15\alpha_\psi}{(1+n_\psi B_\psi)\sqrt{n_\psi B_\psi}}$

Mode of Vibration	Mass (or Inertia) Ratio	Damping Ratio D
Torsional	$B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho \cdot r o^5}$	$D_\theta = \frac{0,5}{1 + 2B_\theta}$

damping, D dapat dihitung dari penjumlahan *geometrical damping* (Dz) ditambah *internal damping* tanah (Dzi).

$$D = D_z + D_{zi} \quad (4)$$

Dimana:

D = Total damping

D_z = Geometrical damping

D_{zi} = Internal damping (tanah)

Frekuensi Alami Pondasi

Frekuensi alami pondasi akibat pengaruh dari dari berat pondasi dan mesin dapat dihitung menggunakan persamaan 5.

$$f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Dimana:

f_n = Frekuensi alami

k = Equivalent spring constant

m = massa total

Untuk nilai *Displacement response*, *Transmissibility factor* dan *Transmitted force* dapat dihitung sesuai tabel 8.

Tabel 8. Ringkasan persamaan sistem SDOF

Expression	Constant Force Excitation F _o Constant	Rotating Mass-type Excitation F _o = m _i eω ²
Magnification Factor	$M = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}}$	$M_r = \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}}$
Amplitude at frequency f	$Y = M(F_o/k)$	$Y = M_r(m_i e/m)$
Resonant frequency	$f_{mr} = f_n \sqrt{1-2D^2}$	$f_{mr} = \frac{f_n}{\sqrt{1-2D^2}}$
Amplitude at resonance frequency f _r	$Y_{max} = \frac{(F_o/k)}{2D\sqrt{1-D^2}}$	$Y_{max} = \frac{(m_i e)}{2D\sqrt{1-D^2}}$
Transmissibility factor	$T_r = \frac{\sqrt{1+(2Dr)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}}$	$\bar{T}_r = \frac{r^2 \sqrt{1+(2Dr)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}}$

Dimana:

$$r = \omega/\omega_n \quad (6)$$

$$\omega_n (\text{Undamped natural circular frequency}) = \sqrt{(k/m)}$$

$$D (\text{Damping Ratio}) = C/C_o$$

$$C_o (\text{Critical Damping}) = 2\sqrt{km}$$

$$T_r = \text{Force transmitted}/F_o$$

$$\bar{T}_r = \text{Force transmitted}/m_i e \omega^2$$

4. RUMUSAN MASALAH

Pada fase perencanaan detail pondasi mesin umumnya pertimbangan dalam menentukan ukuran geometri pondasi adalah berdasarkan faktor berat pondasi terhadap berat mesin yang akan di tahan. Dengan kondisi tersebut maka sering ditemui desain suatu pondasi kaku yang cukup tebal untuk mengantisipasi kebutuhan minimum berat pondasi. Pilihan lain untuk mengurangi tebal pondasi adalah menambah lebar dari dimensi pondasi mesin. Geometri akhir dari desain pondasi ini akan mempengaruhi karakteristik dinamik pondasi mesin yang nantinya akan berpengaruh pada respon pondasi akibat beban dinamis.

5. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan peneilitan ini adalah untuk mengetahui pengaruh seberapa besar pengaruh variasi geometri lebar pondasi (L) dan panjang pondasi (B) terhadap karakteristik dinamis pondasi mesin disertai dengan adanya pengurangan tebal pondasi mesin.

6. METODELOGI PENELITIAN

Metodelogi yang digunakan dalam penelitian ini adalah membuat simulasi perhitungan menggunakan formulasi empiris yang diperoleh dari literatur sebagai pendekatan dalam menghitung karakteristik dinamis pondasi mesin.

7. BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang diambil di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kondisi tanah adalah homogen
- Output yang diteliti hanya meliputi karakter dinamis pondasi mesin tidak mencakup stabilitas internal dan eksternal pondasi.
- Dalam penelitian ini untuk semua variasi lebar pondasi (L) dan panjang pondasi (B) memiliki total volume beton yang sama sehingga total ketebalan pondasi akan bervariasi menyesuaikan total luasan beton (B x L) yang ada.
- Tipe peralatan yang digunakan dalam perhitungan adalah tipe *Reciprocate*.
- Variasi desain dilakukan dengan menaikkan lebar pondasi (L) tanpa mengubah panjang pondasi (B)
- Posisi pusat massa peralatan adalah sama, dimana memiliki jarak yang sama terhadap titik pusat massa pondasi.

8. ANALISA DAN PEMBAHASAN

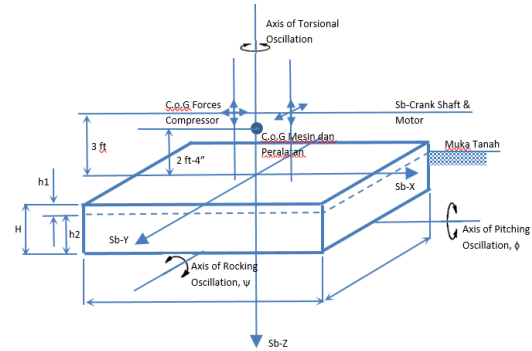
Analisa kasus diambil dari informasi mesin dan peralatan sebagai berikut:

<i>Compressor</i>	= 125061,71 N
<i>Gas coolers</i>	= 19349,76 N
<i>Scrubbers</i>	= 31182,02 N
<i>Motor</i>	= 80067,96 N
Berat Total	= 255661,44N

Jarak dari pusat berat mesin dan peralatan ke permukaan atas pondasi, (C.G) arah Z = 711,20 mm

Compressor speed primary (operating) = 585 rpm

Compressor speed Secondary = 1170 rpm



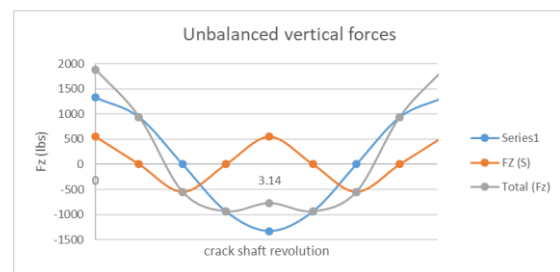
Gambar 4. Geometri Pondasi dan Mesin

Unbalance force untuk arah vertikal (Z) diperoleh:

$$F_z(P) = 1329 \cos \omega t$$

$$F_z(S) = 553 \cos 2\omega t$$

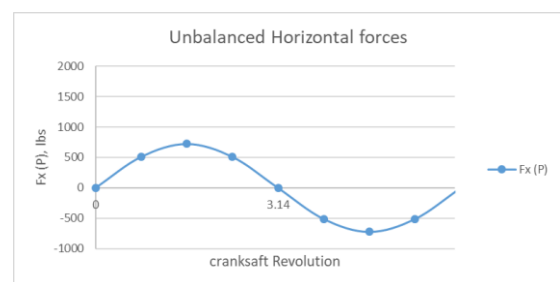
$$F_z = 1329 \cos \omega t + 553 \cos 2\omega t$$



Gambar 5. Fungsi waktu *unbalanced vertical force*

Unbalance force untuk arah horizontal (X) diperoleh:

$$F_x(P) = 725 \sin \omega t$$



Gambar 6. Fungsi waktu *unbalanced horizontal force*

Unbalance force untuk mode rotasi diperoleh:

Vertical Moment, Tφ(P)

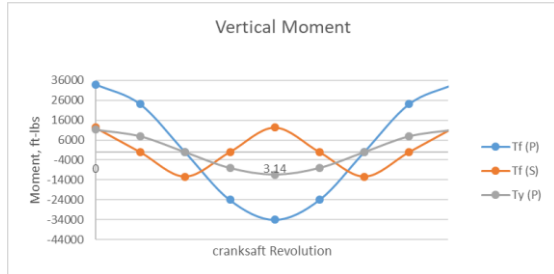
$$T_\phi(P) = 34000 \cos \omega t$$

Vertical Moment, Tφ(S)

$$T_\phi(S) = 12350 \cos 2\omega t$$

Horizontal Moment, $T\phi(P)$

$$T\psi(P) = 11304 \cos \omega t$$



Gambar 7. Fungsi waktu *unbalanced vertical moment*

Sehingga dapat diperoleh *amplitude* untuk masing-masing arah gaya sebagai berikut:

- *Max Vertical primary force*, $F_z = 1329$ lbs = 5911.68 N
- *Max Vertical secondary force*, $F_z = 553$ lbs = 2459.87 N
- *Max Horizontal primary force*, $F_x = 725$ lbs = 3224.96 N
- *Max Rocking primary moment* $T\psi = 11304$ lbs.ft = $1.53E+07$ N.mm
- *Max Pitching primary moment* $T\phi = 34000$ lbs.ft = $4.61E+07$ N.mm
- *Max Pitching secondary moment* $T\phi = 12350$ lbs.ft = $1.67E+07$ N.mm

Diketahui parameter tanah dan pondasi sebagai berikut:

- Berat volume tanah (γ) = $1.87416E-05$ N/mm³
- Modulus Geser (G) = 14000 psi = 96.53 Mpa
- *Poisson's Ratio* (ν) = 0.35
- $\rho = \gamma_s/g = 1.91.E-09$ N.s²/mm⁴
- *Damping Ratio* (D_{yi}) = 0,05
- Daya dukung ijin statik, $\sigma_{all} = 0,12$ Mpa
- *Settlement* permanen = 0,2 inch saat tegangan tanah di 0,12 Mpa

Penentuan Ukuran Pondasi

Dimensi pondasi yang digunakan dalam perhitungan sebagai berikut:

Tebal pondasi di atas muka tanah, $h_2 = 150$ mm

Tebal pondasi tertanam di dalam tanah, $h_1 = 1350$ mm

Tebal total pondasi, $H = 1500$ mm ($h_1 + h_2$)

Lebar pondasi, $L = 8000$ mm

Panjang Pondasi, $B = 4800$ mm

Luas bidang kontak, $A = 38400000$ mm²

Berat pondasi = 382400 N

Total beban statik, $W = \text{berat mesin} + \text{berat pondasi} = 1638061,45$ N

Berat pondasi / berat mesin = 5,41 > 5, OK

Tegangan tanah terjadi = $0,04 \text{ N/mm}^2 < 0.5$
 $\sigma_{all} = 0,06 \text{ Mpa}$

Mode Gerak Arah Vertikal (*Vertical Excitation, Z-Direction*)

$$m = W/g = 166.98 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$r_o = \sqrt{B \cdot L / \pi} = 3496,15 \text{ mm}$$

$$\text{Eff. } h = 1350 \text{ mm}$$

$$n_z = 1 + 0,6(1 - \nu) \left(\frac{h}{r_o} \right) = 1,15$$

$$B = 8000 \text{ mm}$$

$$L = 4800 \text{ mm}$$

$$L/B = 0,6$$

$$\beta_z = 2,15 \text{ (Gambar 3)}$$

$$k_z = \frac{G}{1-\nu} \beta_z \sqrt{B \cdot L} \cdot n_z = 2,28E+06 \text{ N/mm}$$

$$\alpha_z = \frac{1+1,9(1-\nu) \frac{h}{r_o}}{\sqrt{n_z}} = 1,38$$

$$B_z = \frac{1-\nu}{4} \frac{W}{\gamma \cdot r_o^3} = 0,332$$

$$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}} \alpha_z = 1,015$$

$$D_{zi} = 0,05$$

$$\text{Total damping, } D_z = D_z + D_{zi} = 1,065$$

$$f_{nz} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 1114,99 \text{ rpm}$$

Karena $2.D^2 = 2,27 > 1$, *resonance* tidak terjadi

$$F_{zo}(P) = 5911,68 \text{ N}$$

$$F_{zo}(S) = 2459,87 \text{ N}$$

$$\omega = 585 \text{ rpm (operasi utama)}$$

$$\omega_n = 1114,99 \text{ rpm}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = 0,52$$

$$M_z(P) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2.D.r)^2}} = 0,751$$

$$\omega = 1170 \text{ rpm (operasi sekunder)}$$

$$\omega_n = 1114,99 \text{ rpm}$$

$$r = 1,05$$

$$D_z = 1,07$$

$$M_z(S) = 0,45$$

$$Z = \sum M_z.F_z/k_z$$

$$= 0,0026 \text{ mm}$$

$$Z_t = Z + \psi.R_{hx} + \phi.R_{hy}$$

$$= 1.67E-02 \text{ mm}$$

Mode Gerak Arah Horizontal (Horizontal Excitation, X-Direction)

$$m = W/g = 166,98 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$r_o = \sqrt{B.L/\pi} = 3496,15 \text{ mm}$$

$$\text{Eff. } h = 1350 \text{ mm}$$

$$n_x = 1 + 0,55(2 - \nu)\left(\frac{h}{r_o}\right) = 1,35$$

$$B = 8000 \text{ mm}$$

$$L = 4800 \text{ mm}$$

$$L/B = 0,6$$

$$\beta_x = 0,95 \text{ (Gambar 3)}$$

$$k_x = 2(1 + \nu)G\beta_x\sqrt{B.L}.n_x$$

$$= 2071902.194 \text{ N/mm}$$

$$\alpha_x = \frac{1+1,9(2-\nu)\frac{h}{r_o}}{\sqrt{n_x}} = 1,90$$

$$B_x = \frac{7-8\nu}{32(1-\nu)}\frac{W}{\gamma.r_o^3} = 0,413$$

$$D_x = \frac{0,288}{\sqrt{B_x}}\alpha_x = 0,852$$

$$D_{xi} = 0,05$$

$$\text{Total damping, } D_x = D_x + D_{xi} = 0,902$$

$$f_{nx} = \frac{60}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = 1063,72 \text{ rpm}$$

Karena $2.D^2 = 1,63 > 1$, resonance tidak terjadi

$$F_{xo}(P) = 3224,96 \text{ N}$$

$$\omega = 585 \text{ rpm}$$

$$\omega_n = 1063,72 \text{ rpm}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = 0,55$$

$$M_x(P) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2.D.r)^2}} = 0,824$$

$$X = \sum M_x.F_x/k_x$$

$$= 0,0013 \text{ mm}$$

$$X_t = X + \psi.R_o$$

$$= 3.11E-03 \text{ mm}$$

$$Y_t = \phi.R_{hy}$$

$$= 0.01 \text{ mm}$$

Rocking Excitation (ψ -Direction)

$$m = 255661/(9.81*1000)$$

$$= 26,06 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$k = 1500+711,2 = 2211,20 \text{ mm}$$

$$I_\psi (\text{mesin}) = m.k^2$$

$$= 127424307,60 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$I_\psi = \sum_i^n \left[\frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) + m_i k_i^2 \right]$$

$$I_\psi (\text{pondasi}) = 857247706,42 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

Dimana:

$$m = 140,917 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$a = 8000 \text{ mm}$$

$$b = 1500 \text{ mm}$$

$$k = 750 \text{ mm}$$

$$I_\psi (\text{sistem}) = I_\psi (\text{mesin}) + I_\psi (\text{pondasi}) = 984672014,02 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$r_o = \sqrt[4]{B^3.L/\pi} = 4018,46 \text{ mm}$$

$$\text{Eff. } h = 13507 \text{ mm}$$

$$n_\psi = 1 + 1,2(1 - \nu)\left(\frac{h}{r_o}\right) + 0,2(2 - \nu)\left(\frac{h}{r_o}\right)^3 = 1,27$$

$$L/B = 1,67$$

$$\beta_\psi = 0,58 \text{ (Gambar 3)}$$

$$k_\psi = \frac{G}{(1-\nu)}\beta_\psi\sqrt{B.L^2}.n_\psi = 3,37E+13 \text{ N/mm}$$

$$\alpha_\psi = \frac{1 + 0,7(1 - \nu)\left(\frac{h}{r_o}\right) + 0,6(2 - \nu)\left(\frac{h}{r_o}\right)^3}{\sqrt{n_\psi}}$$

$$= 1,05$$

$$B_\psi = \frac{3(1-\nu)}{8}\frac{I_\psi}{\rho.r_o^5} = 0,12$$

$$n_\psi = 1.6 \text{ (dari table 2)}$$

$$D_\psi = \frac{0,15\alpha_\psi}{(1 + n_\psi B_\psi)\sqrt{n_\psi B_\psi}} = 0,303$$

$$D\psi_i = 0,05$$

$$\text{Total damping, } D\psi = D\psi + D\psi_i = 0,303$$

$$f_{n\psi} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 1767,24 \text{ rpm}$$

$$\text{Karena } 2.D^2 = 0,25 < 1$$

$$f_{mr} = \frac{fa}{\sqrt{1 - 2D^2}} = 2039,56 \text{ N}$$

$$F\psi_o(P) = 23112502.74 \text{ N.mm}$$

$$F\psi_o(S) = 2062198.35 \text{ N.mm}$$

$$\omega = 585 \text{ rpm (operasi Utama)}$$

$$\omega_n = 1767,24 \text{ rpm}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = 0,33$$

$$M_\psi(P) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2.D.r)^2}} = 1,086$$

$$\omega = 1170 \text{ rpm (operasi sekunder)}$$

$$r = 0,66$$

$$D\psi = 0,353$$

$$M_\psi(S) = 1,3685$$

$$\psi = \Sigma M_\psi.F\psi/k\psi$$

$$= 8.28E-07 \text{ rad}$$

Pitching Excitation (ϕ -Direction)

$$m = 255661/(9,81 \cdot 1000)$$

$$= 26,06 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$k = 1500 + 711,2 = 2211,200 \text{ mm}$$

$$I\phi(\text{mesin}) = m.k^2 = 127424307,60 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$I_\phi = \sum_i^n \left[\frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) + m_i k_i^2 \right]$$

$$I\phi(\text{pondasi}) = 376249541.28 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

Dimana:

$$m = 140,917 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$a = 4800 \text{ mm}$$

$$b = 1500 \text{ mm}$$

$$k = 750 \text{ mm}$$

$$I\phi(\text{sistem}) = I\phi(\text{mesin}) + I\phi(\text{pondasi}) = 503673848,88 \text{ N-sec}^2/\text{mm}$$

$$r_o = \sqrt[4]{B^3 \cdot L/\pi} = 3112,69 \text{ mm}$$

$$\text{Eff. } h = 1350 \text{ mm}$$

$$n_\phi = 1 + 1,2(1 - \nu) \left(\frac{h}{r_o} \right) + 0,2(2 - \nu) \left(\frac{h}{r_o} \right)^3 = 1,37$$

$$B = 8000 \text{ mm}$$

$$L = 4800 \text{ mm}$$

$$L/B = 0,6$$

$$\beta\phi = 0,45 \text{ (Gambar 3)}$$

$$k_\phi = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_\phi \sqrt{B \cdot L^2} \cdot n_\phi = 1.68E+13 \text{ N/mm}$$

$$\alpha_\phi = \frac{1 + 0,7(1 - \nu) \left(\frac{h}{r_o} \right) + 0,6(2 - \nu) \left(\frac{h}{r_o} \right)^3}{\sqrt{n_\phi}}$$

$$= 1,09$$

$$B\phi = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_\phi}{\rho \cdot r_o^5} = 0,22$$

$$n\phi = 1,591 \text{ (dari tabel 2)}$$

$$D_\phi = \frac{0,15\alpha_\psi}{(1 + n_\phi B_\phi) \sqrt{n_\phi B_\phi}} = 0,205$$

$$D\phi_i = 0,05$$

$$\text{Total damping, } D\phi = D\phi + D\phi_i = 0,255$$

$$f_{n\phi} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 1744.84 \text{ rpm}$$

$$\text{Karena } 2.D^2 = 0,13 < 1$$

$$f_{m\phi} = \frac{fa}{\sqrt{1 - 2.D^2}} = 1871,256 \text{ N}$$

$$F\phi_o(P) = 46097793,5 \text{ N.mms}$$

$$F\phi_o(S) = 16744345,58 \text{ N.mm}$$

$$\omega = 585 \text{ rpm (operasi Utama)}$$

$$\omega_n = 1744.84 \text{ rpm}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = 0,34$$

$$M_\phi(P) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2.D.r)^2}} = 1,11$$

$$\omega = 1170 \text{ rpm (operasi sekunder)}$$

$$r = 0,67$$

$$D\phi = 0,255$$

$$M_\phi(S) = 1,54$$

$$\phi = \Sigma M_\phi.F\phi/k\phi = 4.57E-06 \text{ rad}$$

Dalam penelitian ini, perhitungan akan dilakukan dengan membuat beberapa variasi lebar pondasi (L) dengan mempertahankan nilai panjang pondasi awal (B) dan mempertahankan total volume beton pondasi awal sehingga nilai ketebalan pondasi akan disesuaikan

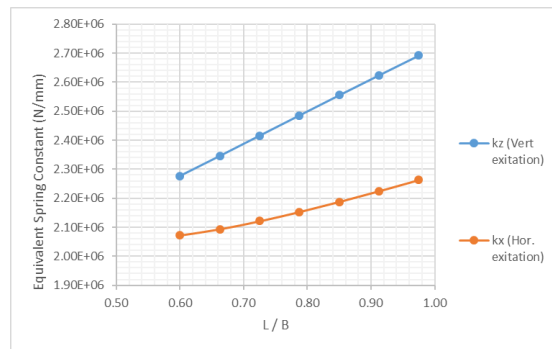
terhadap total volume awal dan luas tapak pondasi ($L \times B$).

Pengaruh Variasi L/B Terhadap Nilai *Equivalent Spring Constant* (k_z , k_x , k_ψ , k_ϕ)

Berdasarkan variasi rasio Lebar pondasi (L) terhadap Panjang pondasi (B), L/B dapat dilihat trend perubahan nilai *equivalent spring constant* untuk masing-masing arah gerakan pondasi (translasi dan rotasi) sebagai berikut.

Tabel 9. Variasi Nilai L/B Vs *Equivalent Spring Constant* k_z dan k_x

L (mm)	B (mm)	L / B	k_z (Vertical) N/mm	k_x (Horional) N/mm
4800	8000	0.6	2.28E+06	2.07E+06
5300	8000	0.663	2.35E+06	2.09E+06
5800	8000	0.725	2.42E+06	2.12E+06
6300	8000	0.788	2.49E+06	2.15E+06
6800	8000	0.85	2.56E+06	2.19E+06
7300	8000	0.912	2.62E+06	2.23E+06

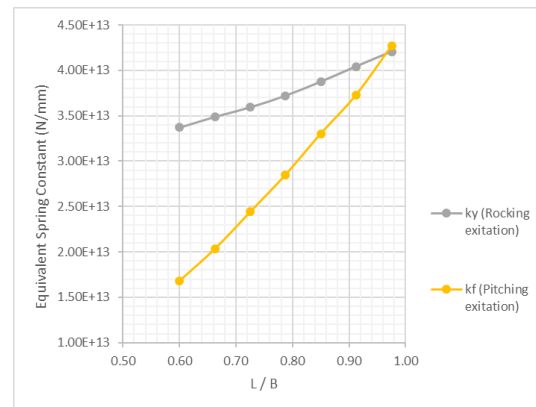


Gambar 8. Grafik L/B Vs *Equivalent Spring Constant* k_z dan k_x

Tabel 10. Nilai L/B Vs *Equivalent Spring Constant* k_ψ dan k_ϕ

L (mm)	B (mm)	L / B	k_ψ (Rocking) N/mm	k_ϕ (Pitching) N/mm
4800	8000	0.6	3.37E+13	1.68E+13
5300	8000	0.663	3.49E+13	2.03E+13
5800	8000	0.725	3.60E+13	2.44E+13
6300	8000	0.788	3.72E+13	2.85E+13
6800	8000	0.85	3.88E+13	3.30E+13

7300	8000	0.912	4.04E+13	3.73E+13
------	------	-------	----------	----------



Gambar 9. Grafik L/B Vs *Equivalent Spring Constant* k_ψ dan k_ϕ

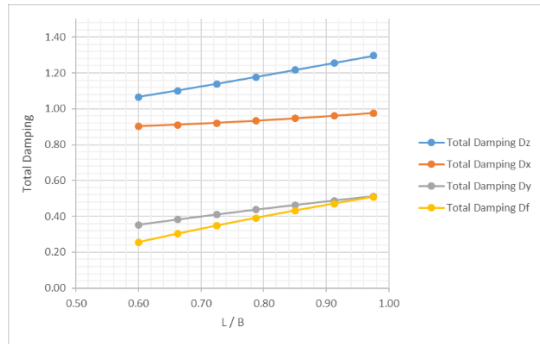
Dari tabel 9, tabel 10, gambar 8 dan gambar 9 dapat terlihat perubahan nilai *equivalent spring constant* sesuai dengan variasi nilai L/B . Dengan semakin lebar tapak pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0.912 akan terjadi kenaikan k_z hingga 15.29% dan kenaikan k_x hingga 7.4%. Berdasarkan hasil analisa menunjukan kenaikan lebar pondasi akan lebih sensitif terhadap nilai kenaikan nilai *equivalent spring constant* arah vertikal (k_z) jika dibandingkan dengan kekakuan arah horizontal (k_x).

Pengaruh Variasi Variasi L/B Terhadap Nilai *Total Damping* (D_z, D_x, D_ψ, D_ϕ)

Dari table 11 dan gambar 10 terlihat perubahan nilai total damping sesuai dengan variasi perubahan nilai L/B .

Tabel 11. Nilai L/B Vs *Total Damping*

L/B	Total Damping D_z	Total Damping D_x	Total Damping D_y	Total Damping D_f
0.60	1.07	0.90	0.35	0.26
0.66	1.10	0.91	0.38	0.30
0.73	1.14	0.92	0.41	0.35
0.79	1.18	0.93	0.44	0.39
0.85	1.22	0.95	0.46	0.43
0.91	1.26	0.96	0.49	0.47
0.98	1.30	0.98	0.51	0.51



Gambar 10. Grafik L/B Vs Total Damping

Dengan semakin lebar tapak pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0,912 terlihat kenaikan *total damping* arah vertikal (Dz) dari nilai awal 1,07 menjadi 1,30 yang artinya akan mengalami kenaikan sebesar 17,99%. Sedangkan kenaikan *total damping* arah horizontal (Dx) diperoleh dari nilai awal 0,90 menjadi 0,96 atau total kenaikan hingga sebesar 6,38%. Hal ini menunjukkan dengan kenaikan lebar pondasi mesin (L) maka kenaikan *Total damping* akan lebih sensitif pada arah vertikal (Dz) jika dibandingkan dengan kenaikan total damping pada mode gerakan arah horizontal.

Kenaikan total damping untuk mode rotasi rocking dan pitching mengalami kenaikan masing-masing hingga 38,17% dan 84,39%.

Pengaruh Variasi L/B Terhadap Frekuensi Alami (f_{nz} , f_{nx} , $f_{n\psi}$, $f_{n\phi}$)

Dari hasil analisa sesuai tabel 12 dan gambar 10 terlihat perubahan nilai frekuensi alami pondasi sesuai dengan variasi perubahan rasio lebar pondasi (L) terhadap panjang pondasi (B). Dengan semakin lebar tapak pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0,912 akan terjadi kenaikan frekuensi arah vertikal (f_{nz}) dari nilai awal 1114,99 rpm menjadi 1212,66 rpm yang artinya akan mengalami kenaikan hingga sebesar 8,76%.

Tabel 12. Variasi L/B Vs Frekuensi Alami Arah Vertikal (f_{nz})

L / B	Natural freq, f_{nz} Vert Exitation (rpm)	Kenaikan (%)
0.60	1114.99	0.00
0.66	1131.82	1.51
0.73	1148.59	3.01
0.79	1165.13	4.50
0.85	1181.35	5.95
0.91	1197.20	7.37
0.98	1212.66	8.76

Tabel 13. Variasi L/B Vs Frekuensi Alami Arah Horizontal (f_{nx})

L / B	Natural freq, f_{nx} Hor Exitacion (rpm)	Kenaikan (%)
0.60	1063.72	0.00
0.66	1069.24	0.52
0.73	1076.29	1.18
0.79	1084.37	1.94
0.85	1093.13	2.77
0.91	1102.35	3.63
0.98	1111.86	4.53

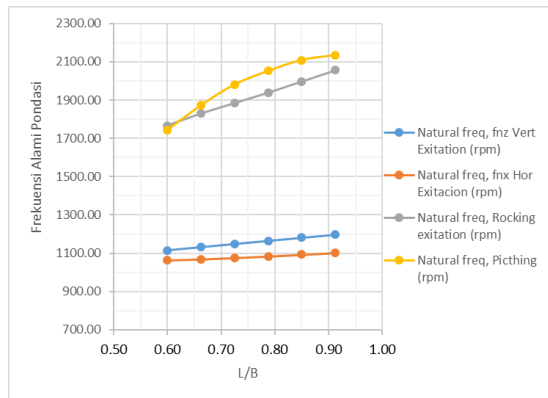
Tabel 14. Variasi L/B Vs Frekuensi Alami mode *Rocking Excitation* ($f_{n\psi}$)

L / B	Natural freq, Rocking exitation (rpm)	Kenaikan (%)
0.60	1767.24	0.00
0.66	1830.37	3.57
0.73	1884.35	6.63
0.79	1939.33	9.74
0.85	1997.54	13.03
0.91	2055.89	16.33
0.98	2110.19	19.41

Tabel 15. Variasi L/B Vs Frekuensi Alami mode *Pitching Excitation* ($f_{n\phi}$)

L / B	Natural freq, Pitching (rpm)	Kenaikan (%)
0.60	1744.84	0.00
0.66	1873.77	7.39
0.73	1981.81	13.58
0.79	2052.19	17.61
0.85	2108.94	20.87
0.91	2134.72	22.34

L / B	Natural freq, Picthing (rpm)	Kenaikan (%)
0.98	2173.90	24.59



Gambar 10. Grafik L/B Vs Frekuensi Alami Pondasi

Untuk frekuensi alami arah horizontal (fnx) sesuai table 13 diperoleh kenaikan dari 1063,72 rpm menjadi 1111,86 rpm atau kenaikan sebesar 4,53%. Hal ini menunjukkan penurunan frekuensi alami akan lebih sensitive pada arah vertikal (fnz) jika dibandingkan dengan kenaikan frekuensi alami (fnx) pada mode gerakan arah horizontal. Untuk perubahan nilai frekuensi alami dengan arah pola gerakan rotasi dapat dilihat pada tabel 14 dan tabel 15.

Kenaikan nilai frekuensi alami ini perlu dipertimbangkan agar tidak terjadi resonansi dimana mendekatnya frekuensi masa pondasi dan mesin terhadap frekuensi putaran mesin untuk tipe sistem pondasi yang didesain berada di bawah frekuensi operasi mesin.

Pengaruh Variasi L/B Terhadap Total Simpangan Arah Vertikal dan Horizontal

Dari hasil analisa sesuai tabel 16 hingga tabel 18 dan gambar 11 terlihat penurunan nilai total displacement (simpangan total) akibat penambahan lebar pondasi (L).

Tabel 16. Variasi L/B Vs Simpangan Arah Vertikal, Z

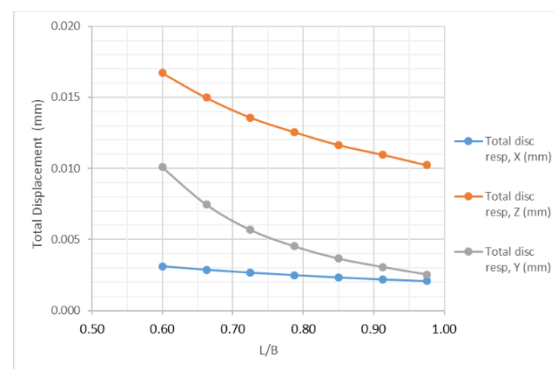
L / B	Total disc resp, Z (mm)	Penurunan (%)
0.60	0.0167	0.00
0.66	0.0150	10.39
0.73	0.0136	18.74
0.79	0.0126	24.85
0.85	0.0116	30.31
0.91	0.0110	34.38
0.98	0.0102	38.77

Tabel 17. Variasi L/B Vs Simpangan Arah Horizontal, X

L / B	Total disc resp, X (mm)	Penurunan (%)
0.60	0.0031	0.00
0.66	0.0029	7.90
0.73	0.0027	14.22
0.79	0.0025	19.81
0.85	0.0023	24.88
0.91	0.0022	29.36
0.98	0.0021	33.23

Tabel 18. Variasi L/B Vs Simpangan Arah Horizontal, Y

L / B	Total disc resp, Y (mm)	Penurunan (%)
0.60	0.0101	0.00
0.66	0.0075	26.14
0.73	0.0057	43.78
0.79	0.0045	55.27
0.85	0.0037	63.82
0.91	0.0031	69.71
0.98	0.0025	74.87



Gambar 11. Grafik L/B Vs Total Displacement Pondasi

Dengan semakin lebar tapak pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0.912 akan terjadi penurunan *total displacement* arah vertikal dari 0,0167 mm menjadi 0,0102 mm atau penurunan hingga sebesar 38,77%. Untuk *total displacement* arah horizontal,X dari 0,0031mm menjadi 0,0021 mm atau penurunan hingga sebesar 33,23%, sedangkan untuk *total displacement* arah horizontal,Y dari 0,0101mm menjadi 0,0025 mm atau penurunan hingga sebesar 74,87 %.

9. KESIMPULAN

Dengan semakin lebar tapak pondasi (L), dimana L/B dari 0,6 menjadi 0.912 akan terjadi kenaikan frekuensi arah vertikal (fnz) hingga 8,76%, kenaikan frekuensi alami arah horizontal (fnx) sebesar 4,53%, penurunan *total displacement* arah vertikal hingga sebesar 38,77%, untuk *total displacement* arah horizontal,X terjadi penurunan hingga sebesar 33,23%, *total displacement* arah horizontal,Y terjadi penurunan hingga 74,87 %.

Dengan menambah ukuran lebar pondasi dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam mendesain pondasi dinamis (pondasi mesin) dimana diperlukan pembatasan dengan mengurangi besar total maks. displacement (simpangan). Dengan menambah lebar pondasi (L) juga akan mengakibatkan kenaikan nilai frekuensi alami pondasi, hal ini perlu dipertimbangkan agar tidak terjadinya resonansi dimana mendekatnya frekuensi masa pondasi dan mesin terhadap frekuensi putaran mesin untuk tipe sistem pondasi yang didesain berada di bawah frekuensi operasi mesin.

DAFTAR PUSTAKA

[1] ACI 351.3R-04 [2004]. "Foundations for Dynamic Equipment". American Concrete Institute, United State of America.

- [2] Andalucia, S. (2023) "Operasi dan Troubleshooting Gas Compressor di Stasiun Kompresor Gas (SKG) Lembak PT Pertamina Hulu rokan Region 1 Zona 4". Jurnal Cakrawala Ilmiah Vol.2, No. 5, Indonesia
- [3] Arya, S., O'Neill M. and Pincus, G. (1984). "Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines". Gulf Publishing Company, Houston.
- [4] Bhatia, K.G. (2008). "Foundation for Industrial Machines and Earthquake Effects". ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 495, Vol. 45, No. 1-2.
- [5] Hanlon, C.P. [2001]. "Compressor Handbook". McGRAW-HILL, United State of America.
- [6] Prakash, S. and Puri, V.K. (2006). "Foundation for Vibrating Machines". Journal of Structural Engineering, SERC, Madras, India.
- [7] Satiawan, B. (2023). "Pengaruh Tinggi Tertanam Pondasi Block Terhadap Karakteristik Dinamik Pondasi Mesin". Jurnal Konstruksia, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Indonesia.
- [8] H. K. Buwono, H. Khoeri, Badaruddin, D. Sofiana, and A. Setiawan, "Perilaku Oprit Jembatan Akibat Beban Kendaraan Terhadap Stabilitas Abutment Menggunakan Midas Soilworks," Jurnal Agregat, vol. 9, no. 2, pp. 1178–1184, 2024, doi: 10.30651/ag.v9i2.24234.
- [9] H. Khoeri, H. K. Buwono, D. Y. A. Jayanti, and A. Setiawan, "Kelayakan Struktur Bangunan Akibat Perubahan Beban Dengan Metode Linear Moving Load," Jurnal Agregat, vol. 9, no. 2, pp. 1191–1196, 2024, doi: 10.30651/ag.v9i2.24699.