



Analisis Dan Desain Dinamis Pondasi Dangkal Berdasarkan Data CPT

Putera Agung Maha Agung¹, Josua Sijabat², Nadia Shofi Khairunnisa³

¹Jurusan Teknik Sipil, Geoteknik, Politeknik Negeri Jakarta

²Quality Control, Proyek Hotel Bandara Terminal 3-Soekarno Hatta, PT. Hutama Karya

³Alumnus, Jurusan Teknik Sipil, Program Konstruksi Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

¹putera.agungmagung@sipil.pnj.ac.id*

Abstract

A generator set used at the building has to consider some environmental factors so that it would not affect the building structure system and not cause some noises as long as operation time. In order to avoid these disturbances, all foundation systems are not only analyzed and designed in the static calculation but also they must consider some impact factors due to dynamic loading. This study's purpose is to determine the dimensions of shallow foundation and specifications of rubber as a vibration damper in accordance with applicable regulations. The static calculation analyzes the immediate and consolidation settlements, and bearing capacity that occurred at the soil foundation using the Schmertmann method. The dynamic analysis calculates some magnitudes of frequency and or amplitude, and also attenuation of single and couple mode vibration in vertical, horizontal, longitudinal displacement directions, then also rocking, yawing, and pitching turning moment directions using the Lumped Parameter method from some references. Analysis and design obtained the dimensions of 3.7 x 1.7 x 0.7 m for shallow foundation system and allowable bearing capacity (q_{all}) indicated equals 4.10 kg/cm² based on static condition, and 6.20 kg/cm² according to static and dynamic conditions, respectively. Then, some assessments in static and dynamic calculations were also found the total settlement (D) = 0.49 mm, amplitude (A_z) = 6.6 x 10⁻⁶ m, (A_x) = 3.2 x 10⁻⁶ m, and (A_ϕ) = 1.7 x 10⁻⁶ rad. Generally, the resulting parameters from those analyses and design have fulfilled the existing standard and local government regulations.

Keywords: shallow foundation, settlement, bearing capacity, frequency/amplitude, attenuation.

Abstrak

Generator set yang digunakan pada gedung harus memperhatikan beberapa faktor lingkungan, sedemikian sehingga tidak mempengaruhi sistem struktur bangunan dan tidak menimbulkan kebisingan-kebisingan pada saat atau waktu operasi. Untuk menghindari beberapa gangguan tersebut, seluruh sistem pondasi tidak hanya dianalisis dan didesain dalam kondisi statis saja, akan tetapi juga harus mempertimbangkan beberapa faktor dampak akibat beban dinamis. Tujuan studi ini adalah menentukan dimensi-dimensi pondasi dangkal dan spesifikasi karet sebagai suatu peredam getaran sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dalam studi ini, perhitungan statis menganalisis penurunan segera dan konsolidasi, serta daya dukung tanah yang terjadi pada lapisan tanah pondasi dengan menggunakan metode Schmertmann. Analisis dinamis menghitung besaran frekuensi dan amplitudo, dan juga atenuasi vibrasi tunggal dan gabungan dalam arah pergerakan vertikal, horizontal, dan longitudinal; kemudian juga akibat putaran momen dari pergoyangan *rocking*, *yawing*, dan *pitching* dengan metode Lumped Parameter dari beberapa literatur. Analisis dan desain telah menghasilkan dimensi 3,7 * 1,7 * 0,7 m untuk sistem pondasi dangkal dan daya dukung ijin (q_{all}) menunjukkan = 4,10 kg/cm² berdasarkan kondisi statis dan 6,20 kg/cm² berdasarkan kondisi statis dan dinamis, secara berurutan. Kemudian, beberapa perkiraan di dalam perhitungan kondisi statis dan dinamis juga mendapatkan penurunan total (Δ) = 0,49 mm, amplitudo (A_z) = 6,6 x 10⁻⁶ m, (A_x) = 3,2 x 10⁻⁶ m, (A_ϕ) = 1,7 x 10⁻⁶ rad. Secara umum, parameter-parameter yang dihasilkan dari analisis dan desain tersebut telah memenuhi peraturan-peraturan standar dan pemerintah setempat yang ada.

Kata kunci: pondasi dangkal, penurunan, daya dukung, frekuensi/amplitudo, atenuasi.

Diterima Redaksi : 08-11-2020 | Selesai Revisi : 18-11-2020 | Diterbitkan Online : 04-12-2020

1. Pendahuluan

Pondasi merupakan suatu elemen struktur yang berfungsi untuk meneruskan beban dari struktur atas ke tanah dasar pondasi. Umumnya, bangunan-bangunan gedung menggunakan daya listrik yang besar untuk memfasilitasi/mendukung sistem listrik atau elektronik,

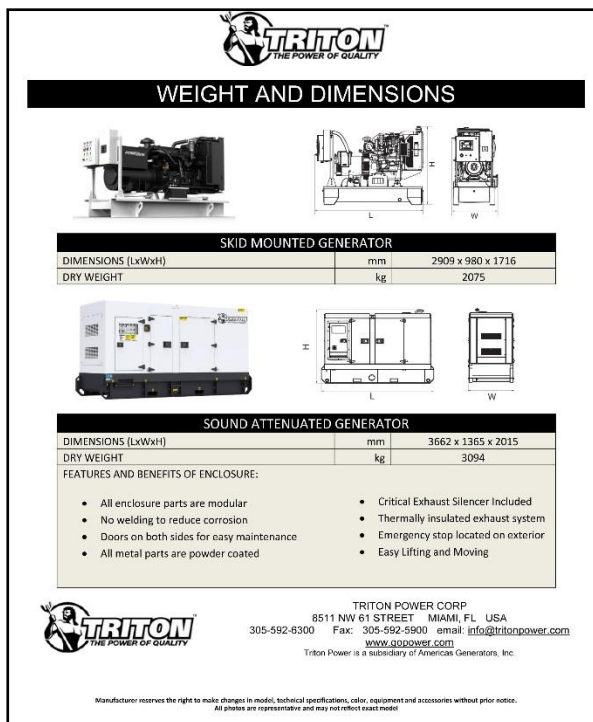
sehingga membutuhkan daya listrik yang besar. Untuk mendukung kebutuhan tersebut biasanya suatu bangunan menggunakan genset (*Generating-Set*). Selain itu, genset berfungsi juga sebagai cadangan daya listrik saat terjadi pemadaman atau pemutusan daya listrik dari PLN (sumber tenaga listrik pemerintah).

Contoh beberapa bangunan yang menggunakan genset sebagai daya listrik tambahan dan atau cadangan untuk memfasilitasi sistem elektronik yang besar adalah: gedung mall, rumah sakit, workshop dan lain-lain.

Salah satu tipe sistem struktur bawah untuk genset adalah pondasi dangkal untuk perletakan atau dudukan guna menopang genset. Dalam analisis dan desain harus dihitung dari 2 (dua) aspek pembebanan, yaitu: akibat beban statis akibat berat sendiri dan beban dinamis akibat getaran (vibrasi). Dalam studi ini, analisis secara statis tidak dibahas secara detail, dan lebih menekankan kepada analisis perhitungan dinamis.

Dalam studi ini, perhitungan statis menganalisis penurunan total dan daya dukung tanah lapisan tanah pondasi dengan menggunakan metode Schmertmann [5]. Analisis dinamis menghitung besaran frekuensi dan amplitudo, dan juga atenuasi vibrasi tunggal dan gabungan arah vertikal, horizontal, logitudinal, *rocking*, *yawing*, dan *pitching* dengan metode Lumped Parameter berdasarkan literatur yang ada [13, 15, 27].

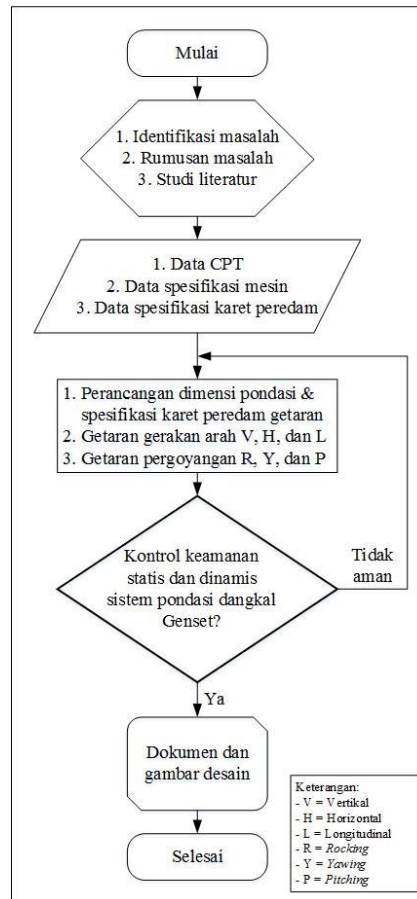
Pondasi dangkal yang dianalisis dan direncanakan adalah untuk memikul beban mesin Genset sebagaimana pilihan spesifikasi yang diperlihatkan Gambar 1. Mesin terdiri dari 2 (dua) tipe yang akan digunakan untuk mendukung daya listrik bangunan yang ditinjau, yaitu: tipe *skid mounted generator (SMG)* dan tipe *sound attenuated generator (SAG)*.



Gambar 1. Pemilihan spesifikasi mesin Genset (USA product) [26]

2. Metode Penelitian

Bagan alir studi dapat dijelaskan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2. Data tanah yang digunakan adalah hanya data Sondir atau *Cone Penetration Test (CPT)*. Dengan demikian, beberapa data desain yang diperlukan diperoleh dengan menggunakan metode korelasi antar parameter. Data tanah diperlihatkan dalam Gambar 3 dan selanjutnya, lokasi studi diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 2. Bagan alir studi desain pondasi dangkal untuk Genset

2.1 Interpretasi lapisan tanah di lokasi studi

Salah satu kelebihan uji lapangan Sondir atau CPT adalah kemampuannya menginterpretasikan lapisan tanah secara kontinu dengan kesalahan minimum. Dalam Gambar 2, diperlihatkan interpretasi lapisan tanah berdasarkan data sondir/CPT menurut referensi [18, 20, 21, 23]. Interpretasi lapisan-lapisan tanah dalam di dalam studi ini menggunakan Gambar 5, 6 dan 7. Semua lapisan tanah ditentukan berdasarkan data Sondir yang diplot pada gambar-gambar tersebut.

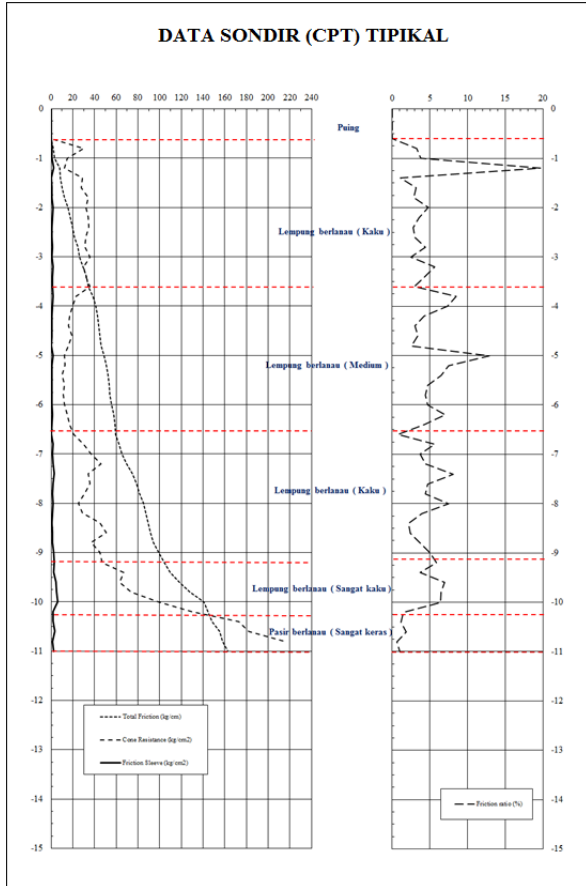
2.2 Analisis statis

2.2.1 Analisis penurunan segera dan konsolidasi

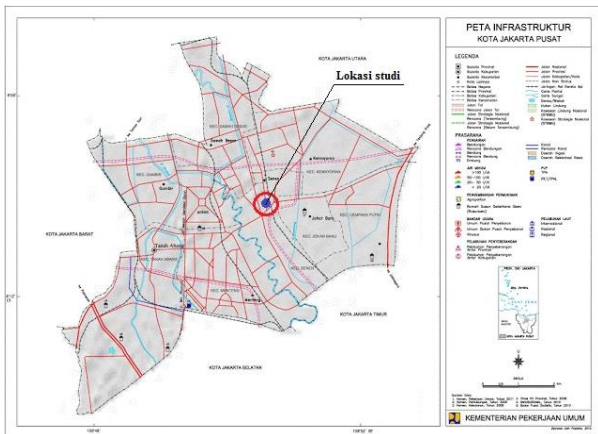
Penurunan akibat berat/beban sendiri dalam sistem pondasi terbagi menjadi 2 (dua), yaitu penurunan segera dan juga penurunan akibat konsolidasi.

Penurunan segera adalah penurunan yang terjadi secara langsung setelah lapisan tanah dibebani. Menurut Janbu, Bjerrum dan Kjaernsli [9, 11], penurunan segera dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q \cdot B}{E_s} \quad (1)$$

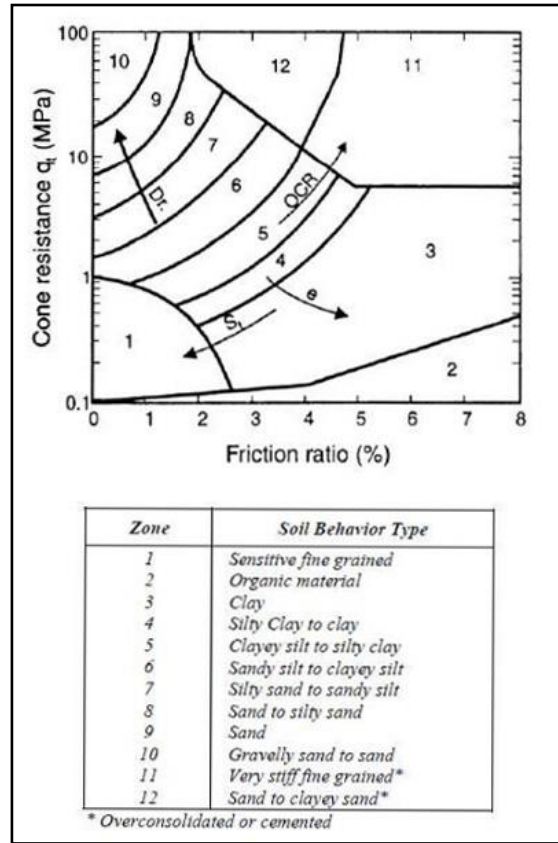


Gambar 3. Data hasil penyelidikan tanah (Sondir/CPT)

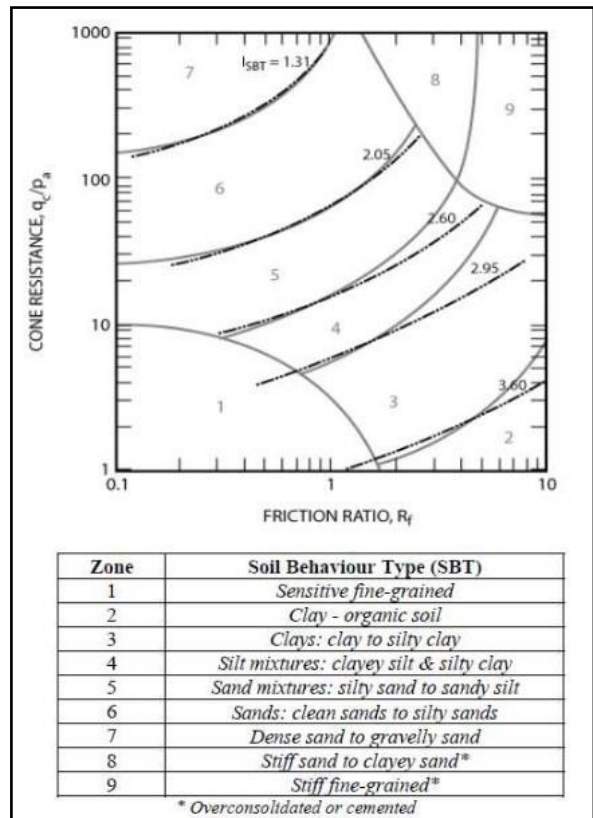


Gambar 4. Lokasi studi pondasi genset gedung di Jakarta Pusat

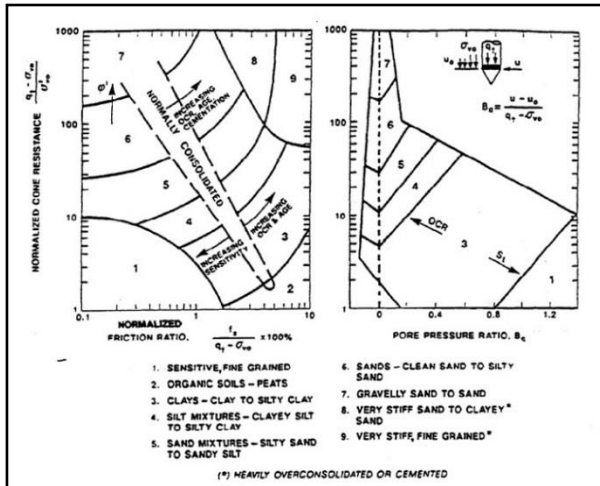
dengan: S_i = penurunan segera; B = lebar pondasi; E_s = modulus elastisitas (Tabel 1); μ_0 = factor koreksi (Gambar 8); μ_1 = faktor koreksi (Gambar 9); q = tekanan tanah netto pada pondasi dangkal.



Gambar 5. Lapisan tanah Sondir/CPT berdasarkan q_c dan R_f [18, 20]



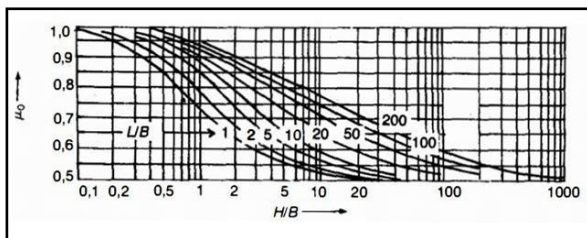
Gambar 6. Lapisan tanah Sondir atau CPT berdasarkan q_c/P_a dan R_f [21]



Gambar 7. Lapisan tanah Sondir atau CPT berdasarkan data yang dinormalisasikan [23]

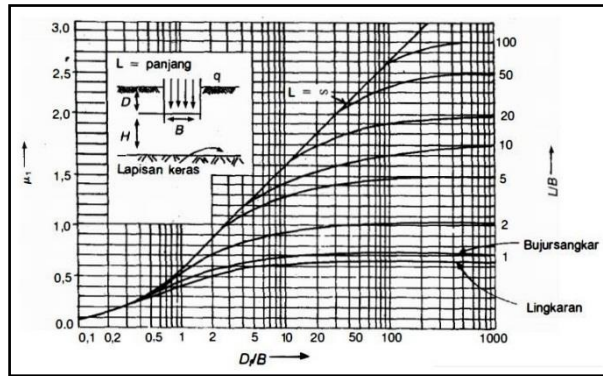
Tabel 1. Modulus elastisitas tanah (E_s) [6, 9, 17]

Jenis tanah	E_s (kN/m ²)
Lempung	
Sangat lunak	300 - 3000
Lunak	2000 - 4000
Sedang	4500 - 9000
Keras	7000 - 20000
Berpasir	30000 - 42500
Pasir	
Berlanau	5000 - 20000
Tidak padat	10000 - 25000
Padat	50000 - 100000
Pasir dan kerikil	
Padat	80000 - 200000
Tidak padat	50000 - 140000
Lanau	2000 - 20000
Loess	15000 - 60000
Cadas	140000 - 1400000



Gambar 8. Grafik koefisien geometris pondasi μ_0 [6, 9]

Penurunan konsolidasi terjadi akibat keluar air tanah melalui pori-pori tanah yang mengakibatkan penurunan dan perubahan angka pori. Penurunan konsolidasi terbagi menjadi dua, yaitu penurunan konsolidasi primer dan sekunder. Penurunan konsolidasi primer terbagi menjadi dua, yaitu konsolidasi normal (*normally consolidated*) dan terkonsolidasi berlebih (*overconsolidated*).



Gambar 9. Grafik koefisien geometris pondasi μ_1 [6, 9]

Beberapa data tanah, ada yang perlu di korelasi atau dicari pendekatannya dengan pendekatan-pendekatan yang ada. Terzaghi menyarankan beberapa data tanah sebagaimana diperlihatkan dalam Tabel 2. Pendekatan terhadap nilai indeks kompresi (C_c) menggunakan Tabel 3. Untuk menghitung besarnya penurunan konsolidasi normal bisa digunakan rumus [3]:

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \quad (2)$$

dengan: S_c = penurunan konsolidasi; C_c = nilai index kompresi pendekatan; e_0 = angka pori inisial/ awal; P_o = tekanan tanah (*overburden pressure*); ΔP = pertambahan akibat beban luar dengan teori 2 : 1.

Penurunan terkonsolidasi berlebih ditinjau berdasarkan 2 (dua) kondisi, yaitu:

$$1. P_o + \Delta P \leq P_c$$

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \quad (3)$$

$$2. P_o < P_c < P_o + \Delta P$$

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P_o}{P_c} \right) + \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \quad (4)$$

dengan: C_s = indeks pemuai (*swelling index*); P_c = tegangan pra-konsolidasi (*pre-consolidation pressure*).

Penurunan pondasi akibat beban statis tidak boleh sangat ekstrim, dimana dapat menimbulkan retak atau kerusakan/cacat pada sistem pondasi. Adapun beberapa kriteria izin dalam batas penurunan seperti yang diusulkan oleh Skempton dan Mac Donald [19]. Untuk daerah studi ini, penurunan pondasi dangkal tidak boleh melebihi 0,05 cm (0,5 mm) [22], terlihat dalam Tabel 4.

2.2.2 Daya dukung tanah metode Schmertmann [5, 24]
 Daya dukung akibat berat/beban sendiri fondasi dangkal dikorelasikan dengan tahanan ujung konus q_c dengan $D/B < 1,50$ [22] adalah:

1. Daya dukung batas untuk tanah non-kohefif:

a. Untuk telapak lajur:

$$q_{ult} = 28 - 0,0052(300 - q_c) \cdot 1,50 \quad (5)$$

b. Untuk telapak persegi:

$$q_{ult} = 48 - 0,0090(300 - q_c) \cdot 1,50 \quad (6)$$

Tabel 2. Pendekatan nilai n, e, w, γ_d dan γ_t terhadap data Sondir [6]

Jenis tanah	n	e	w	γ_d	γ_t
	(%)		(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)
Pasir seragam, tidak padat	46	0.85	32	14.3	18.9
Pasir seragam, padat	34	0.51	19	17.5	20.9
Pasir berbutir campuran, tidak padat	40	0.67	25	15.9	19.9
Pasir berbutir campuran, padat	30	0.43	16	18.6	21.6
Lempung lunak sedikit organik	66	1.9	70	-	15.8
Lempung lunak sangat organik	75	3	110	-	14.3

Tabel 3. Persamaan empiris untuk C_c [6]

Pedoman	Acuan	Jenis/model tanah
C _c = 0.007 (LL - 0.7)	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (<i>remolded</i>)
C _c = 0.01 (w _L)		Lempung Chicago
C _c = 1.15 (e _s - 0.27)	Nishida	Semua lempung
C _c = 0.30 (e _s - 0.27)	Hough	Tanah kohesi anorganik; lanau, lempung berlanau lempung
C _c = 0.0015 w _L		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
C _c = 0.0046 (LL - 9)		Lempung Brazilia
C _c = 0.75 (e _s - 15)		Tanah dengan plastisitas rendah
C _c = 0.208 e _s + 0.0083		Lempung Chicago
C _c = 0.156 e _s + 0.0107e _s		Semua lempung

Tabel 4. Batasan penurunan pondasi yang diizinkan [22]

No.	Jenis bangunan	Penurunan maksimum (cm)
1.	Bangunan umum	2,54
2.	Bangunan pabrik	3,81
3.	Gudang	5,08
4.	Pondasi mesin	0,05

2. Daya dukung batas untuk tanah kohesif:

a. Untuk lajur:

$$q_{ult} = 2 + 0,28 q_c \tag{7}$$

b. Untuk persegi:

$$q_{ult} = 5 + 0,34 q_c \tag{8}$$

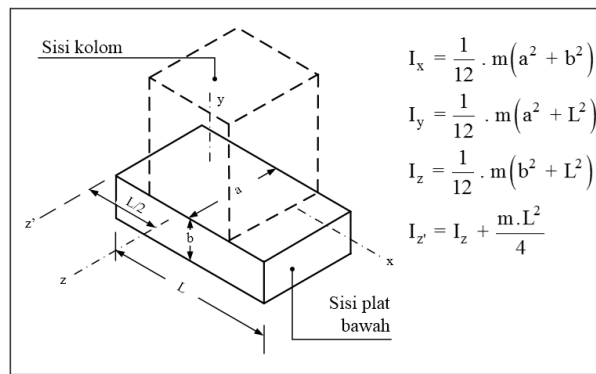
dengan: q_{ult} = daya dukung ultimit; q_c = tekanan konus rata-rata mulai B/2 di atas sampai 1,1 B di bawah alas telapak pondasi dangkal untuk D/B < 1,50.

2.2 Analisis dinamis

2.2.1 Pemilihan tipe pondasi

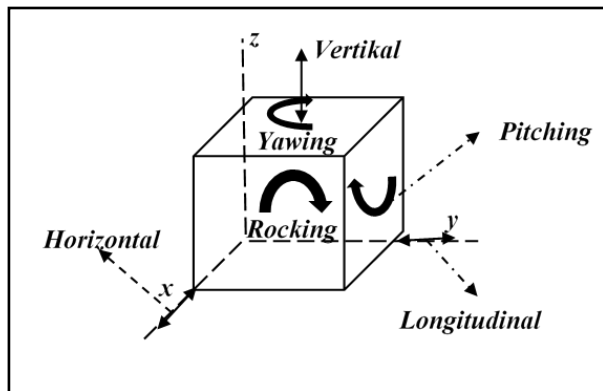
Pondasi mesin merupakan pondasi yang memikul mesin. Pondasi mesin dapat berupa pondasi dangkal dan pondasi dalam. Dalam kasus ini direncanakan pondasi mesin berupa pondasi dangkal. Adapun tipe-tipe pondasi dangkal untuk mesin [15, 16], yaitu tipe blok (*block type foundation*), pondasi kotak (*box or cassion type of foundation*), dan pondasi dinding (*wall type foundation*). Dalam perencanaan pondasi mesin akibat beban dinamis oleh adanya getaran mesin digunakan beberapa

pertimbangan, yaitu: getaran adalah gerak harmonik sederhana atau peristiwa gejala gerak bolak balik pada suatu sistem; waktu bagi benda untuk melakukan satu osilasi biasa disebut periode (T) dan banyaknya getaran dalam satu detik disebut frekuensi (F); jika frekuensi paksa sama (saat Genset dihidupkan pertama kali) dengan frekuensi alami sistem, sistem akan beresilasi dengan amplitudo yang jauh lebih besar daripada amplitudo gaya paksa, kejadian ini disebut suatu resonansi (R); bila energi mekanik gerak osilasi berkurang terhadap waktu, gerak dikatakan teredam (D); dan struktur pondasi dangkal sangat tergantung oleh momen inersia (I) bentuk struktur atau dinyatakan sebagai suatu angka yang menyatakan kelembaman suatu benda untuk melakukan rotasi. Di dalam studi ini dipilih tipe pondasi dangkal blok, sehingga I bisa diambil dari di dalam Gambar 10.



Gambar 10. Tipe blok dan besaran momen inersia (I) [5, 8, 15]

Dalam perencanaan pondasi dangkal untuk mesin Genset terdapat 6 derajat kebebasan (*degree of freedom/DOF*) [15], yaitu; vertikal, horizontal, *rocking*, longitudinal, *yawing*, *pitching* sebagaimana dalam Gambar 11. Namun, untuk studi ini ditinjau secara keseluruhan sesuai dengan tipe mesin Genset yang diusulkan untuk dipasang dalam gedung (Gambar 1).



Gambar 11. Derajat kebebasan sistem struktur analisis dinamis [15]

2.2.2 Analisis dinamis dalam arah gerak vertikal

Getaran yang mengakibatkan suatu pondasi bergerak ke atas dan ke bawah searah sumbu z. Untuk mengetahui

getaran vertikal pada pondasi mesin, berikut beberapa hal yang harus diperhitungkan [13, 28]:

1. Radius ekuivalen (r_z):

$$r_z = \sqrt{B \cdot L / \pi} \quad (9)$$

Dengan: L = lebar pondasi; B = panjang pondasi.

2. Koefisien kedalaman (η_z):

$$\eta_z = 1 + 0,60 (1 - \nu) \left(\frac{h}{r_z} \right) \quad (10)$$

Dengan: ν = rasio Poisson; h = kedalaman pondasi.

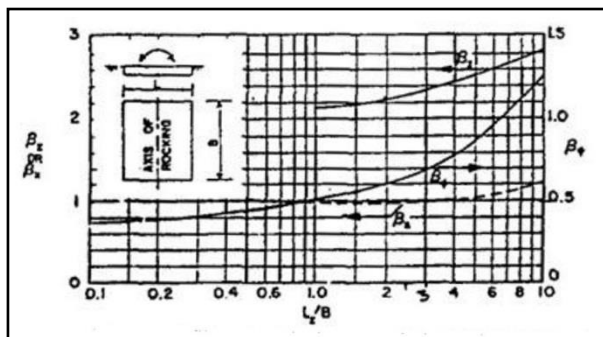
3. Koefisien pegas (k_z):

$$k_z = \frac{G}{1 - \nu} \cdot \beta_z \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot \eta_z \quad (11)$$

Dengan: G = modulus geser tanah (Tabel 5); β_z = faktor geometris letak pondasi (Gambar 12).

Tabel 5. Harga tipikal modulus geser (G) [1, 7, 10]

Jenis tanah	G (kg/cm ²)
Soft clay	2100-3500
Stiff clay	7000-14000
Very stiff to hard	> 14000
Medium dense sand	3500-10500
Dense sand	7000-14000
Medium dense gravel	10500-17500
Dense gravel	14000-28000



Gambar 12. Grafik geometris dasar pondasi [13, 28]

4. Rasio massa (B_z):

$$B_z = \frac{1 - \nu}{4} \cdot \frac{W}{\gamma \cdot r_z^3} \quad (12)$$

dengan: W = berat pondasi dengan mesin; γ = berat isi tanah (kg/m³).

5. Rasio redaman sesuai kedalaman pondasi (α_z):

$$\alpha_z = \frac{1 + 1,9(1 - \nu) \frac{h}{r_z}}{\sqrt{\eta_z}} \quad (13)$$

6. Rasio redaman sesuai lebar dan kedalaman (D_z):

$$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{B_z}} \cdot \alpha_z \quad (14)$$

7. Frekuensi natural (f_{nz}):

$$f_{nz} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (15)$$

dengan: m = massa sistem mesin Genset

8. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{nz} \cdot \sqrt{1 - 2D_z^2} \quad (16)$$

9. Gaya dinamis (F_0):

$$F_0 = m \cdot e \cdot \omega^2 \quad (17)$$

Dengan: e = eksentrisitas dari motor Genset, didapatkan dari perumusan oleh American Petroleum Institute Standard for Centrifugal Compressors (API Standard), yaitu:

$$e(\text{mil}) = \alpha \cdot \sqrt{12000/\omega} < 1,0 (\text{mil})$$

Pada kasus ini mesin Genset dianggap beroperasi pada kecepatan tetap dan juga nilai untuk gaya dinamis vertikal dan horizontal dianggap sama. Diambil nilai e = 1,0 mil = 1,54.10⁻⁵ m.

10. Rasio frekuensi (f):

$$f = \frac{f_0}{f_r} \quad (18)$$

10. Kecepatan sudut (ω_{nz}):

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (19)$$

11. Rasio kecepatan sudut (r_z):

$$r_z = \frac{\omega}{\omega_{nz}} \quad (20)$$

dengan: ω = kecepatan sudut mesin

12. Amplitudo (A_z):

$$A_z = \frac{F_0}{k_z \sqrt{(1 - r_z^2)^2 + (2 \cdot D_z \cdot r_z)^2}} \quad (21)$$

2.2.3 Analisis dinamis dalam arah gerak horizontal

Getaran horizontal adalah getaran yang mengakibatkan suatu pondasi bergerak arah sumbu x. Untuk mengetahui getaran lateral pada pondasi mesin, berikut hal yang harus diperhitungkan [4, 22]:

1. Radius ekuivalen (r_x):

$$r_x = \sqrt{B \cdot L / \pi} \quad (22)$$

2. Koefisien kedalaman (η_x):

$$\eta_x = 1 + 0,55 (1 - \nu) \left(\frac{h}{r_x} \right) \quad (23)$$

3. Koefisien pegas (k_x):

$$k_x = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \cdot \beta_x \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot \eta_x \quad (24)$$

4. Rasio massa (B_x):

$$B_x = \frac{7 - 8 \cdot \nu}{32(1 - \nu)} \cdot \frac{W}{\gamma \cdot r_x^3} \quad (25)$$

5. Rasio redaman sesuai kedalaman pondasi (α_x):

$$\alpha_x = \frac{1 + 1,9(1 - \nu) \frac{h}{r_x}}{\sqrt{\eta_x}} \quad (26)$$

6. Rasio redaman sesuai lebar dan kedalaman (D_x):

$$D_x = \frac{0,288}{\sqrt{B_x}} \cdot \alpha_x \quad (27)$$

7. Frekuensi natural (f_{nx}):

$$f_{nx} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad (28)$$

8. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{nx} \cdot \sqrt{1 - 2D_x^2} \quad (29)$$

9. Kecepatan sudut (ω_{nx}):

$$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad (30)$$

10. Rasio kecepatan sudut (r_x):

$$r_x = \frac{\omega}{\omega_{nx}} \quad (31)$$

11. Amplitudo (A_x):

$$A_x = \frac{F_0}{k_x \sqrt{(1-r_x^2) + (2 \cdot D_x \cdot r_x)^2}} \quad (32)$$

2.2.4 Analisis dinamis dalam arah goyangan *rocking*

Getaran rocking adalah getaran yang mengakibatkan suatu pondasi berputar terhadap sumbu y. Jika $\frac{\sqrt{f_{nx}^2} + \sqrt{f_0^2}}{f_{nx} \cdot f_0} \leq \frac{2}{3 \cdot f}$, maka kopel atau getaran gandeng bisa diabaikan atau dihitung terpisah [4, 22]. Untuk mengetahui getaran tunggal rocking pada pondasi mesin, berikut hal yang harus diperhitungkan adalah:

1. Radius ekuivalen (r_ϕ):

$$r_\phi = \sqrt[4]{B \cdot L^3 / 3\pi} \quad (33)$$

2. Koefisien kedalaman (η_ϕ):

$$\eta_\phi = 1 + 1,2(1-\nu) \left(\frac{h}{r_\phi}\right) + 1 + 0,2(2-\nu) \left(\frac{h}{r_\phi}\right)^2 \quad (34)$$

3. Koefisien pegas (k_ϕ):

$$k_\phi = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta_\phi \cdot B \cdot L^2 \cdot \eta_\phi \quad (35)$$

4. Momen akibat gaya dinamis pada sumbu y (M_y):

$$M_y = F_0 \text{ (tinggi pondasi + tinggi pusat rotasi mesin - titik berat sistem arah vertikal)} \quad (36)$$

5. Rasio massa (B_ϕ):

$$B_\phi = \frac{3 \cdot (1-\nu) \cdot M_y}{8 \cdot \gamma \cdot r_\phi^3} \quad (37)$$

Dengan: M_y = momen massa mesin terhadap sumbu y sesuai nilai I_y . I_y adalah momen inersia berdasarkan bentuk prisma segiempat (*rectangular prism*) dari tabel [13, 22] merupakan kumulatif sisi/bagian plat bawah dan bagian kolom pondasi dangkal seperti diperlihatkan dalam Gambar 10.

6. Rasio redaman sesuai kedalaman pondasi (α_ϕ):

$$\alpha_\phi = \frac{1 + 0,7(1-\nu) \frac{h}{r_\phi} + 1 + 0,6(2-\nu) \left(\frac{h}{r_\phi}\right)^3}{\sqrt{\eta_\phi}} \quad (38)$$

7. Rasio redaman sesuai lebar dan kedalaman (D_ϕ):

$$D_\phi = \frac{0,15 \cdot \alpha_\phi}{(1 + \eta_\phi \cdot \beta_\phi) \sqrt{\eta_\phi \cdot B_\phi}} \cdot \alpha_\phi \quad (39)$$

8. Frekuensi natural ($f_{n\phi}$):

$$f_{n\phi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_\phi}{m}} \quad (40)$$

9. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{n\phi} \cdot \sqrt{1 - 2D_\phi^2} \quad (41)$$

10. Kecepatan sudut ($\omega_{n\phi}$):

$$\omega_{n\phi} = \sqrt{\frac{k_\phi}{m}} \quad (42)$$

11. Rasio kecepatan sudut (r_ϕ):

$$r_\phi = \frac{\omega}{\omega_{n\phi}} \quad (43)$$

12. Amplitudo (A_ϕ):

$$A_\phi = \frac{M_y}{k_\phi \sqrt{(1-r_\phi^2) + (2 \cdot D_\phi)^2}} \quad (44)$$

2.2.5 Analisis dinamis dalam arah gerak longitudinal

Getaran longitudinal adalah getaran yang mengakibatkan suatu pondasi bergerak arah sumbu y. Getaran longitudinal pada pondasi mesin dihitung [7]:

1. Radius ekuivalen (r_y):

$$r_y = \sqrt{B \cdot L / \pi} \quad (45)$$

2. Koefisien pegas (k_y):

$$k_y = \frac{32(1-\nu) G \cdot r_y}{7 - 8\nu} \quad (46)$$

3. Rasio massa (B_y):

$$B_y = \frac{7 - 8\nu}{32(1-\nu)} \cdot \frac{m}{\gamma \cdot r_y^3} \quad (47)$$

4. Rasio redaman sesuai lebar pondasi (D_y):

$$D_y = \frac{0,2875}{\sqrt{B_y}} \quad (48)$$

5. Frekuensi natural (f_{ny}):

$$f_{ny} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_y}{m}} \quad (49)$$

6. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{ny} \cdot \sqrt{1 - 2D_y^2} \quad (50)$$

7. Kecepatan sudut (ω_{ny}):

$$\omega_{ny} = \sqrt{\frac{k_y}{m}} \quad (51)$$

8. Rasio kecepatan sudut (r_y):

$$r_y = \frac{\omega}{\omega_{ny}} \quad (52)$$

9. Amplitudo (A_y):

$$A_y = \frac{F_0}{k_y \sqrt{(1-r_y^2)^2 + (2 \cdot D_y \cdot r_y)^2}} \quad (53)$$

2.2.6 Analisis dinamis dalam arah goyangan *yawing*1. Radius ekuivalen (r_ψ):

$$r_\psi = \sqrt{\frac{B \cdot L (B^2 + L^2)}{6 \cdot \pi}} \quad (54)$$

2. Koefisien pegas (k_ψ):

$$k_\psi = \frac{16 \cdot G \cdot r_\psi^2}{3} \quad (55)$$

3. Rasio massa (B_ψ):

$$B_\psi = \frac{M_z}{\gamma \cdot r_\psi^5} \quad (56)$$

Dengan: M_z = momen massa mesin terhadap sumbu z sesuai nilai I_z . I_z diambil berdasarkan bentuk prisma segiempat dari Gambar 10 [13, 22].

4. Rasio redaman sesuai lebar pondasi (D_ψ):

$$D_\psi = \frac{0,50}{1 + 2 \cdot B_\psi} \quad (57)$$

5. Frekuensi natural ($f_{n\psi}$):

$$f_{n\psi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_\psi}{m}} \quad (58)$$

9. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{n\psi} \cdot \sqrt{1 - 2D_\psi^2} \quad (59)$$

6. Kecepatan sudut ($\omega_{n\psi}$):

$$\omega_{n\psi} = \sqrt{\frac{k_\psi}{m}} \quad (60)$$

7. Kecepatan sudut terendam ($\omega_{n\psi}'$):

$$\omega_{n\psi}' = \omega_{n\psi} \sqrt{1 - D_\psi^2} \quad (61)$$

8. Frekuensi natural terendam ($f_{n\psi}'$):

$$f_{n\psi}' = \frac{\omega_{n\psi}}{2\pi} \quad (62)$$

9. Rasio kecepatan sudut (r_ψ):

$$r_\psi = \frac{\omega}{\omega_{n\psi}} \quad (63)$$

10. Amplitudo (A_ψ):

$$A_\psi = \frac{M_z}{k_\psi \sqrt{(1-r_\psi^2)^2 + (2.D_\psi)^2}} \quad (64)$$

2.2.7 Analisis dinamis dalam arah goyangan *pitching*

Getaran *pitching* adalah getaran yang mengakibatkan suatu pondasi berputar terhadap sumbu x. Untuk mengetahui getaran tunggal *pitching* harus dihitung [7]:

1. Radius ekivalen (r_p):

$$r_p = \sqrt[4]{B \cdot L^3 / 3\pi} \quad (65)$$

2. Koefisien pegas (k_p):

$$k_p = \frac{8 \cdot G \cdot r_p^3}{3 \cdot (1-\nu)} \quad (66)$$

3. Rasio massa (B_p):

$$B_p = \frac{3 \cdot (1-\nu) \cdot M_x}{8 \cdot \gamma \cdot r_p^3} \quad (67)$$

Dengan: M_x = momen massa mesin terhadap sumbu x sesuai nilai I_x . I_x diambil dari Gambar 10 [4, 22].

4. Rasio redaman sesuai lebar pondasi (D_p):

$$D_p = \frac{0,15}{(1+B_p) \cdot \sqrt{B_p}} \quad (68)$$

5. Frekuensi natural (f_{np}):

$$f_{np} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_p}{m}} \quad (69)$$

6. Frekuensi resonansi (f_r):

$$f_r = f_{np} \cdot \sqrt{1-2D_p^2} \quad (70)$$

7. Kecepatan sudut (ω_{np}):

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{k_p}{m}} \quad (71)$$

8. Rasio kecepatan sudut (r_p):

$$r_p = \frac{\omega}{\omega_{np}} \quad (72)$$

9. Amplitudo (A_p):

$$A_p = \frac{M_x}{k_p \sqrt{(1-r_p^2)^2 + (2.D_p)^2}} \quad (73)$$

2.2.8 Koefisien pegas tanah tunggal dan gabungan

Kombinasi getaran translasi dan *rocking* mengakibatkan pondasi memiliki pergerakan translasi dan gaya horizontal tunggal dan gabungan yang mengakibatkan perputaran sudut [13], perhitungan getaran *rocking* dan horizontal dapat dihitung dengan:

1. Koefisien pegas arah horizontal/lateral (k_x) tunggal
Persamaan untuk mencari koefisien pegas tanah arah horizontal adalah [3, 10, 21]:

$$k_x = 2(1+\nu) \cdot G \cdot \beta_x \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot \eta_x \quad (74)$$

Dengan: β_x = faktor geometri pondasi (Gambar 12)

2. Koefisien pegas tanah *rocking* (k_ϕ) tunggal

Koefisien pegas tanah *rocking* dapat dirumuskan sebagai berikut [13, 22]:

$$k_\phi = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta_\phi \cdot B \cdot L \cdot \eta_\phi \quad (75)$$

3. Koefisien pegas tanah horizontal dan *rocking* ($k_{x\phi}$)

Faktor yang mempengaruhi koefisien pegas tanah adalah *rocking* dan horizontal (*koefisien crossing*). Koefisien pegas tanah *rocking* dan horizontal dapat dirumuskan [3, 10]:

$$k_{x\phi} = -G \cdot r_0 \left(L \cdot C_{x1} + \frac{G_s}{G} \cdot \frac{t}{r_0} \left(L - \frac{t}{2} \right) \cdot S_{x1} \right) \quad (76)$$

Dengan: G = modulus geser tanah; L = titik berat sistem; C_{x1} = konstanta kekakuan dan redaman (Tabel 6); G_s = modulus geser tanah samping; G = modulus geser tanah dasar; t = tinggi/tebal pondasi; r_0 = radius ekuivalen rata-rata; S_{x1} = konstanta kekakuan dan redaman (terlihat juga pada Tabel 6).

Tabel 6. Nilai $C_{\phi 1}$, $C_{\phi 2}$, C_{x1} , C_{x2} , $S_{\phi 1}$, $S_{\phi 2}$, S_{x1} , S_{x2} [3, 7]

Jenis tanah		$C_{\phi 1}$	$C_{\phi 2}$	C_{x1}	C_{x2}	$S_{\phi 1}$	$S_{\phi 2}$	S_{x1}	S_{x2}
Samping	Dasar								
Lempung	Lempung	4,3	0,7	5,1	3,2	2,5	1,8	4,1	10,6
Lempung	Pasir	3,3	0,5	4,7	2,8	2,5	1,8	4,1	10,6
Pasir	Lempung	4,3	0,7	5,1	3,2	2,5	1,8	4	9,1
Pasir	Pasir	3,3	0,5	4,7	2,8	2,5	1,8	4	9,1

2.2.9 Peredam getaran tanah tunggal dan gabungan

1. Redaman arah horizontal/lateral (c_x) tunggal

Redaman arah horizontal dapat dirumuskan [4, 8]:

$$-c_x = r_0^4 \sqrt{\gamma \cdot G} \left(C_{x2} + \frac{G_s}{G} \cdot \frac{t}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \cdot \gamma_s}{G \cdot \gamma}} \cdot S_{x2} \right) \quad (77)$$

Dengan: γ = berat volume tanah dasar; γ_s = berat volume tanah samping; S_{x2} dan C_{x2} = konstanta kekakuan dan redaman (Tabel 6).

2. Redaman arah *rocking* (c_ϕ)

Redaman arah *rocking* tunggal dapat dirumuskan sebagai berikut [4, 10]:

$$-c_\phi = r_0^4 \sqrt{\gamma \cdot G} \left[C_{\phi 2} + \left(\frac{L}{r_0} \right)^2 + \frac{t}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \cdot \gamma_s}{G \cdot \gamma}} \right] \left[S_{\phi 2} + \left(\frac{t^2}{3 \cdot r_0^2} + \frac{L^2}{r_0^2} + \frac{t \cdot L}{r_0^2} \right) \cdot S_{x2} \right] \quad (78)$$

Dengan: $C_{\phi 2}$; $S_{\phi 2}$; dan S_{x2} = faktor kekakuan dan redaman (Tabel 6).

3. Redaman arah horizontal/lateral dan *rocking* ($c_{x\phi}$)

Redaman arah horizontal/lateral dan *rocking* dapat dirumuskan [4, 10]:

$$-c_{x\phi} = -r_0^2 \sqrt{\gamma \cdot G} \left(L \cdot C_{x2} + \frac{t}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \cdot \gamma_s}{G \cdot \gamma}} \cdot \left(L - \frac{t}{2} \right) S_{x2} \right) \quad (79)$$

Dengan: S_{x2} dan C_{x2} = konstanta kekakuan dan redaman (Tabel 6).

Besar amplitudo gabungan *rocking* dan horizontal dapat dihitung dengan memasukkannya ke dalam persamaan matriks [4, 10]:

$$\begin{bmatrix} A & B & C & -D \\ -B & A & D & C \\ C & -D & E & F \\ D & C & -F & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{x2} \\ A_{\phi 1} \\ A_{\phi 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_0 \\ 0 \\ -M_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (80)$$

Atau: $[S] \{A\} = \{H\}$

Dengan ketentuan sebagai berikut:

$$A = (m \cdot \omega^2 - k_x) \quad (81)$$

$$B = C_x \cdot \omega \quad (82)$$

$$C = k_x \cdot L - k_{x\phi} \quad (83)$$

$$D = (C_x \cdot L - C_{x\phi}) \cdot \omega \quad (84)$$

$$E = I \cdot C_\phi \cdot \gamma \cdot \omega^2 - k_\phi + 2 \cdot k_{x\phi} \cdot L - k_x \cdot L^2 \quad (85)$$

$$D = (C_\phi - 2 \cdot C_{x\phi} + C_x \cdot L^2) \cdot \omega \quad (86)$$

2.2.10 Desain karet/pegas peredam arah vertikal [8]

1. Kekuatan pegas peredam (k_{zt})

$$k_{zt} = k_s \cdot \alpha \quad (87)$$

Dengan: k_z = konstanta pegas arah vertikal; α = Rasio dinamik (rasio antara dinamis dan statis = 1,30); k_s = konstanta pegas statis.

2. Frekuensi karet/pegas peredam (f_{dzt})

$$f_{dzt} = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_z \cdot \sum \text{karet} \cdot g}{W}} \quad (88)$$

3. Faktor transmisi (*transmissibility factor*)

$$T_r = \frac{1}{\left[\frac{f}{f_{dzt}} \right]^2 - 1} \quad (89)$$

4. Beban dinamis tersalur

$$W_{din} = F_{din} \cdot T_r \quad (90)$$

2.2.11 Desain karet/pegas peredam arah horizontal [8]

1. Kekuatan pegas peredam (k_{xt})

$$k_{xt} = \frac{1}{7} k_{zt} \quad (91)$$

2. Untuk frekuensi karet/pegas peredam; faktor transmisi; beban dinamis tersalur adalah sama atau identik dengan arah vertikal.

3. Peredam getaran (*vibration isolator*)

Peredam Getaran (*vibration isolator*) adalah suatu material yang sifatnya dapat meredam atau menahan getaran. Peredam getaran sendiri terbuat dari berbagai macam bahan seperti: *natural rubber*, *neoprone*, zat fluida dan sebagainya. Dalam kasus ini generator set digunakan peredam dengan menggunakan peredam getaran berbahan natural rubber. Analisis pemilihan yang digunakan adalah [10, 15, 22]. Dalam pemilihan karet peredam didasarkan atas nilai atau besarnya pengaruh karet di dalam meredam getaran yang terjadi akibat operasi mesin generator set. Berikut faktor transmisi (*transmissibility factor*) dirumuskan [15]:

$$T_r = \frac{\sqrt{1 + (2 \cdot D)^2}}{\sqrt{(1 - r^2) + (2 \cdot D)^2}} \quad (92)$$

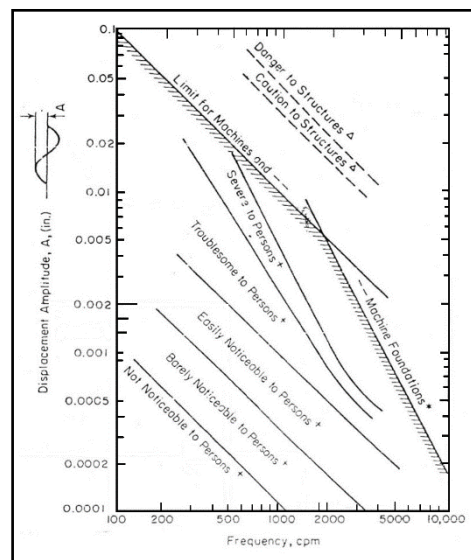
Dengan: D = Rasio redaman total; r = Rasio frekuensi; T_r = faktor transmisi. Nilai T_r direncanakan 2% atau 0.02, maka nilai redaman diasumsikan $D = 0$ untuk mempermudah perhitungan, maka persamaannya menjadi:

$$T_r = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right]} \quad (93)$$

2.2.10 Angka keamanan untuk statis dan dinamis

Dalam perencanaan pondasi mesin beberapa faktor keamanan ditinjau berdasarkan aspek-aspek lingkungan Berikut tabel dan grafik untuk nilai keamanan perencanaan pondasi mesin.

- Syarat keamanan terhadap daya dukung dan penurunan [22] statis terhadap dinamis:
 - Tegangan statis < 50% daya dukung izin (q_{all})
 - Tegangan dinamis < 75% daya dukung izin (q_{all})
 - Frekuensi operasi harus kurang lebih 20% dari frekuensi resonansi.
- Syarat keamanan amplitudo vertikal [15]
- Syarat keamanan amplitudo horizontal [2, 3]
- Syarat keamanan menurut KepMenNeg KLH [12]
- Syarat keamanan seluruh struktur pondasi [15]

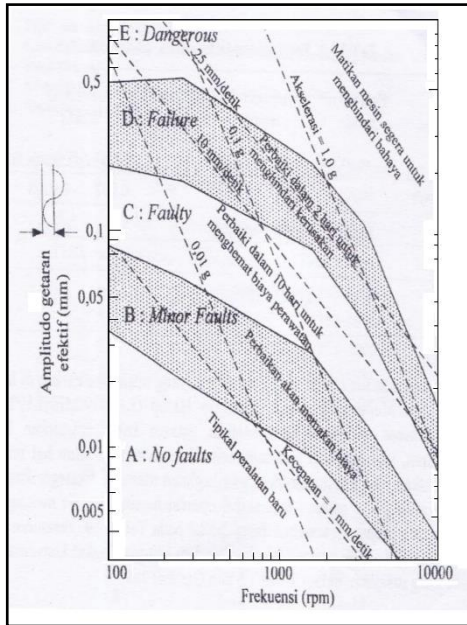


Gambar 13. Amplitudo izin untuk getaran vertikal [13]

Tabel 7. Kriteria kecepatan getaran horizontal [2]

Kecepatan horizontal (in/sec)	Keadaan mesin
< 0,005	Extremely smooth
0,005 - 0,010	Very smooth
0,10 - 0,02	Smooth
0,02 - 0,04	Very good
0,04 - 0,08	Good
0,08 - 0,16	Fair
0,16 - 0,315	Slightly rough
0,315 - 0,630	Rough
> 0,63	Very rough

Getaran pada struktur yang berdekatan dapat diabaikan jika amplitudo yang terjadi pada pondasi kurang dari 0,2 mm atau $A_{ijin} \leq 0,2$ mm. Kriteria design pondasi mesin berdasarkan beban statis yaitu pondasi tidak boleh mengalami penurunan tanah yang berlebihan [15]. Kriteria design pondasi mesin berdasarkan beban dinamis adalah pondasi tidak boleh mengalami resonansi dan getaran yang diakibatkan oleh mesin tidak boleh mengganggu ataupun memberi efek buruk terhadap orang dan peralatan di sekitarnya.



Gambar 14. Kriteria getaran/vibrasi izin untuk pondasi mesin [2]

6. Syarat keamanan lainnya

Penurunan yang diijinkan untuk pondasi terpisah pada tanah lempung, yaitu sebesar 65 mm [19].

Tabel 8. Baku tingkat getaran mekanik untuk kenyamanan dan kesehatan (10^{-6} m) [12]

Frekuensi	Nilai tingkat getaran (10^{-6} meter)			
	Tidak Mengganggu	Mengganggu	Tidak Nyaman	Menyakitkan
4	< 100	100 - 500	> 500 - 1000	> 1000
5	< 80	80 - 350	> 350 - 1000	> 1000
6.3	< 70	70 - 275	> 275 - 1000	> 1000
8	< 50	50 - 160	> 160 - 500	> 500
10	< 37	37 - 120	> 120 - 300	> 300
12.5	< 32	32 - 90	> 90 - 220	> 220
16	< 25	25 - 60	> 60 - 120	> 120
20	< 20	20 - 40	> 40 - 85	> 85
25	< 17	17 - 30	> 30 - 50	> 50
31.5	< 12	12 - 20	> 20 - 30	> 30
40	< 9	9 - 15	> 15 - 20	> 20
50	< 8	8 - 12	> 12 - 15	> 15
3	< 6	6 - 9	> 9 - 12	> 12

Tabel 9. Baku tingkat getaran mekanik untuk kenyamanan dan kesehatan (mm/detik) [12]

Parameter	Satuan	Frekuensi (Hz)	Batas getaran, peak, mm/detik			
			Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
Kecepatan Getaran	mm/detik	4	< 2	< 2 - 27	> 27 - 140	> 140
		5	< 7.5	< 7.5 - 25	> 25 - 130	> 130
Frekuensi	Hz	6.3	< 7	< 7 - 21	> 21 - 110	> 110
		8	< 6	< 6 - 19	> 19 - 100	> 100
		10	< 5.2	< 5.2 - 16	> 16 - 90	> 90
		12.5	< 4.8	< 4.8 - 15	> 15 - 80	> 80
		16	< 4	< 4 - 14	> 14 - 70	> 70
		20	< 3.8	< 3.8 - 12	> 12 - 67	> 67
		25	< 3.2	< 3.2 - 10	> 10 - 60	> 60
		31.5	< 3	< 3 - 9	> 9 - 53	> 53
40	< 2	< 2 - 8	> 8 - 50	> 50		
50	< 1	< 1 - 7	> 7 - 42	> 42		

Keterangan:
 Kategori A : Tidak menimbulkan kerusakan.
 Kategori B : Kemungkinan keretakan plesteran (retak/terlepas pada dinding pemikul beban)
 Kategori C : Kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Spesifikasi mesin Genset

Data spesifikasi mesin yang dipilih dijadikan sebagai data perhitungan beban dinamis pada analisis dan perencanaan pondasi dangkal dinamis. Berikut disajikan data spesifikasi mesin generator set lengkap yang digunakan di dalam perencanaan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 1, yaitu: merk: Perkins (USA); model: 1306A-E87TAG4; engine speed: 1500 rpm; engine power output at rated: 255 kWm; cooling: radiator cooled; total displacement : 8.7 liter; compression ratio: 16.9 : 1; oil capacity: 26.4 liter; coolant capacity: 24.2 liter; massa motor : 377 kg; standby: 250 kVA/200 kW; berat : 2075 kg; tinggi : 1.716 m; panjang : 2.909 m; lebar : 0.98 m [26].

3.2 Penyusunan parameter tanah

Data tanah yang digunakan pada perencanaan pondasi mesin adalah data hasil korelasi berdasarkan data CPT (Tabel 10), oleh karena data lain tidak tersedia, seperti: angka pori inisial / awal (e_0) = 1,90; indeks kompresi / pemampatan konsolidasi (C_c) = 1,87; modulus geser (G) = $3,5 \cdot 10^6$ kg/m²; redaman (D) internal lapisan tanah lempung diambil = 0,05 dan sebagainya menggunakan tabel-tabel di dalam pembahasan sebelumnya. Hasil-hasil korelasi diperlihatkan Tabel 11.

Tabel 10. Data CPT dalam angka

DITCH CONE PENETRATION TEST												
Project	: Gedung			Date	: -							
Test No.	: S-4			Tested by	: -							
Site name	: Gedung RPIIS - Salemba			Weather	: -							
Location	: Salemba, Jakarta pusat			CPI	: -							
PERHITUNGAN DATA SONDIR												
Depth (m)	Penetration			F (kN)	Lekat Friciton (kN)	Friciton (kN)	Friciton Ratio (F ₁) (%)	S Total Friciton (kN)	Skewe (kN)	Q10	Probabilitas Lapisan tanah	Probabilitas Lapisan tanah
	C (kg)	C+F (kN)	C/F									
0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
-0.20	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
-0.40	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
-0.60	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
-0.80	30	43	12	0.87	19.44	1.24	19.44	3.24	19.44	1.90	Lempung Berlemba	
-1.00	15	32	7	0.57	11.34	3.78	31.54	3.15	31.54	3.15	Paat Berlemba	
-1.20	12	41	29	2.35	46.98	19.58	79.68	7.97	79.68	7.97	Lempung Berlemba	
-1.40	29	33	4	0.32	6.88	1.12	86.32	8.63	86.32	8.63	Paat Berlemba	
-1.60	28	39	11	0.89	17.83	3.18	104.58	10.46	104.58	10.46	Lempung Berlemba	
-1.80	14	46	12	0.87	19.44	2.86	124.50	12.45	124.50	12.45	Lempung Berlemba	
-2.00	32	51	19	1.54	39.78	4.81	156.04	15.60	156.04	15.60	Lempung	
-2.20	34	49	15	1.22	24.16	3.57	180.94	18.09	180.94	18.09	Lempung Berlemba	
-2.40	35	47	12	0.87	19.44	2.78	200.90	20.09	200.90	20.09	Lempung Berlemba	
-2.60	30	44	12	0.87	19.44	3.08	220.78	22.08	220.78	22.08	Lempung Berlemba	
-2.80	31	48	17	1.38	27.54	4.44	249.00	24.90	249.00	24.90	Lempung Berlemba	
-3.00	36	47	11	0.89	17.83	2.48	267.26	26.73	267.26	26.73	Lempung Berlemba	
-3.20	30	51	21	1.70	34.02	5.67	302.12	30.21	302.12	30.21	Lempung	
-3.40	32	49	17	1.38	27.54	4.30	330.34	33.03	330.34	33.03	Lempung Berlemba	
-3.60	36	49	13	1.05	21.06	2.93	351.92	35.19	351.92	35.19	Lempung Berlemba	
-3.80	25	47	24	1.94	38.88	8.45	391.76	39.18	391.76	39.18	Lempung Berlemba	
-4.00	20	38	18	1.48	29.16	7.29	421.64	42.16	421.64	42.16	Lempung Berlemba	
-4.20	17	29	9	0.73	13.58	4.29	436.58	43.66	436.58	43.66	Paat Berlemba	
-4.40	16	23	6	0.49	9.72	3.04	446.54	44.65	446.54	44.65	Lempung	
-4.60	19	27	8	0.65	12.96	3.41	459.82	45.98	459.82	45.98	Paat Berlemba	
-4.80	16	21	5	0.41	8.10	2.53	468.12	46.81	468.12	46.81	Paat Berlemba	
-5.00	12	31	19	1.54	39.78	12.83	499.66	49.97	499.66	49.97	Lempung Berlemba	
-5.20	13	25	12	0.87	19.44	7.40	519.58	51.96	519.58	51.96	Paat Berlemba	
-5.40	10	18	8	0.65	12.96	6.40	532.86	53.29	532.86	53.29	Lempung	
-5.60	12	19	7	0.57	11.34	4.75	544.48	54.45	544.48	54.45	Lempung	
-5.80	11	17	6	0.49	9.72	4.42	554.44	55.44	554.44	55.44	Lempung	
-6.00	12	19	7	0.57	11.34	4.75	566.00	56.60	566.00	56.60	Paat Berlemba	
-6.20	15	29	13	1.05	21.06	7.02	587.64	58.76	587.64	58.76	Paat Berlemba	
-6.40	17	26	9	0.73	13.58	4.29	602.58	60.26	602.58	60.26	Paat Berlemba	
-6.60	21	33	2	0.16	3.24	6.77	605.90	60.59	605.90	60.59	Paat Berlemba	
-6.80	30	51	21	1.70	34.02	5.67	640.76	64.08	640.76	64.08	Lempung	
-7.00	37	66	17	1.38	27.54	3.72	668.98	66.90	668.98	66.90	Lempung	
-7.20	46	71	25	2.03	49.50	4.40	710.48	71.05	710.48	71.05	Paat	
-7.40	34	68	34	2.75	55.06	8.10	766.92	76.69	766.92	76.69	Horas	
-7.60	36	67	21	1.70	34.02	4.75	801.78	80.18	801.78	80.18	Lempung	
-7.80	31	48	17	1.38	27.54	4.40	830.00	83.00	830.00	83.00	Lempung Berlemba	
-8.00	28	48	21	1.48	29.16	7.45	868.18	86.82	868.18	86.82	Paat Berlemba	
-8.20	29	43	34	1.23	22.68	3.91	893.42	89.34	893.42	89.34	Lempung Berlemba	
-8.40	45	57	12	0.97	19.44	2.16	911.54	91.13	911.54	91.13	Lempung	
-8.60	51	66	15	1.22	24.30	2.38	936.24	93.62	936.24	93.62	Paat	
-8.80	37	54	17	1.38	27.54	3.72	964.46	96.45	964.46	96.45	Lempung	
-9.00	45	73	28	2.27	43.36	5.04	1010.94	101.09	1010.94	101.09	Paat	
-9.20	47	81	34	2.75	55.06	5.86	1067.18	106.74	1067.18	106.74	Paat	
-9.40	67	98	31	2.51	50.22	3.75	1118.84	111.88	1118.84	111.88	Paat	
-9.60	65	117	54	4.37	93.48	6.90	1208.48	120.85	1208.48	120.85	Paat	
-9.80	78	133	59	4.71	95.58	6.40	1296.42	129.64	1296.42	129.64	Paat	
-10.00	90	177	79	6.32	136.36	6.38	1435.86	143.59	1435.86	143.59	Paat	
-10.20	130	154	24	1.94	38.88	1.50	1475.74	147.57	1475.74	147.57	Paat	
-10.40	173	198	25	2.03	49.50	1.17	1517.24	151.72	1517.24	151.72	Paat	
-10.60	182	224	42	3.46	68.04	1.87	1586.96	158.70	1586.96	158.70	Paat	
-10.80	215	232	17	1.38	27.54	0.64	1615.18	161.52	1615.18	161.52	Paat	
-11.00	221	250	29	2.35	46.98	1.06	1663.32	166.33	1663.32	166.33	Paat	

Tabel 11 Parameter tanah tipikal yang digunakan di dalam analisis dan perencanaan pondasi dangkal mesin Genset

Lapisan 1: Lempung berlanau/lanau berlempung			Kedalaman: 0,00 – 2,00 [m]
Data Sondir / CPT berdasarkan uji lapangan adalah posisi S-4			q_c (sondir/CPT) = 0 – 24 [kg/cm ²]
1. Berat volume tanah asli (γ_s)	16 – 17		kN/m ³
2. Berat volume tanah jenuh (γ_{sat})	17 – 18		kN/m ³
3. Permeabilitas (k)	$8,6 \cdot 10^{-9} - 1,7 \cdot 10^{-8}$		m/detik
4. Modulus elastisitas Young (E)	32,7 – 130,9		kN/m ²
5. Angka Poisson (ν)	0,4 – 0,5		-
6. Kohesi (c)	29,4 – 39,2		kN/m ²
7. Sudut geser dalam (ϕ)	5,0 – 7,5		°
Lapisan 2: Lanau berpasir/lanau			Kedalaman: 2,20 – 4,20 [m]
Data Sondir / CPT berdasarkan uji lapangan adalah posisi S-4			q_c (sondir/CPT) = 20 – 36 [kg/cm ²]
1. Berat volume tanah asli (γ_s)	17 – 18		kN/m ³
2. Berat volume tanah jenuh (γ_{sat})	18 – 19		kN/m ³
3. Permeabilitas (k)	$6,7 \cdot 10^{-6} - 2,9 \cdot 10^{-7}$		m/detik
4. Modulus elastisitas Young (E)	60,7 – 288,3		kN/m ²
5. Angka Poisson (ν)	0,3 – 0,4		-
6. Kohesi (c)	19,6 – 40,0		kN/m ²
7. Sudut geser dalam (ϕ)	8,5 – 10,5		°
Lapisan 3: Lempung berlanau/lanau berlempung			Kedalaman: 4,20 – 6,20 [m]
Data Sondir / CPT berdasarkan uji lapangan adalah posisi S-4			q_c (sondir/CPT) = 20 – 36 [kg/cm ²]
1. Berat volume tanah asli (γ_s)	17 – 18		kN/m ³
2. Berat volume tanah jenuh (γ_{sat})	18 – 19		kN/m ³
3. Permeabilitas (k)	$8,1 \cdot 10^{-9} - 5,3 \cdot 10^{-9}$		m/detik
4. Modulus elastisitas Young (E)	20,7 – 152,7		kN/m ²
5. Angka Poisson (ν)	0,4 – 0,5		-
6. Kohesi (c)	39,2 – 48,9		kN/m ²
7. Sudut geser dalam (ϕ)	6,5 – 11,2		°
Lapisan 4: Pasir kelanauan/lanau kepasiran			Kedalaman: 6,20 – 11,20 [m]
Data Sondir / CPT berdasarkan uji lapangan adalah posisi S-4			q_c (sondir/CPT) = 20 – 36 [kg/cm ²]
1. Berat volume tanah asli (γ_s)	17 – 18		kN/m ³
2. Berat volume tanah jenuh (γ_{sat})	18 – 19		kN/m ³
3. Permeabilitas (k)	$3,1 \cdot 10^{-6} - 2,7 \cdot 10^{-5}$		m/detik
4. Modulus elastisitas Young (E)	390,7 – 663,9		kN/m ²
5. Angka Poisson (ν)	0,1 – 0,4		-
6. Kohesi (c)	2,2 – 7,3		kN/m ²
7. Sudut geser dalam (ϕ)	19,5 – 37,8		°

3.3 Data hasil perhitungan dinamis

Data hasil perhitungan dinamis dalam arah gerak vertikal; horizontal; arah goyangan *rocking*; arah gerak longitudinal; arah goyangan *yawing*; dan arah goyangan *pitching* diperlihatkan dalam Tabel 12.

Tabel 12. Data hasil perhitungan dinamis dalam arah gerak vertikal; horizontal; arah goyangan *rocking*; arah gerak longitudinal; arah goyangan *yawing*; dan arah goyangan *pitching*

Dalam arah gerakan vertikal													
r_v (m)	η_v	k_v (kg/m)	B_v	α_v	D_v	D_{max}	f_v (Hz)	Γ (Hz)	F_v (kg)	Γ	m_{ec} (rad/sec)	r	A_v (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,4	1,1	$4,4 \cdot 10^7$	0,5	1,4	1,1	1,1	31,5	4,5	211	11,2	197,6	0,8	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Dalam arah gerakan horizontal													
r_h (m)	η_h	k_h (kg/m)	B_h	α_h	D_h	D_{max}	f_h (Hz)	Γ (Hz)	F_h (kg)	Γ	m_{ec} (rad/sec)	r	A_h (m)
1,4	1,4	$2,9 \cdot 10^7$	0,4	2,0	0,5	0,9	25,5	3,6	211	13,8	161,1	0,97	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Dalam arah goyangan rocking													
r_r (m)	η_r	k_r (kg/m)	B_r	α_r	D_r	D_{max}	f_{θ} (Hz)	Γ (Hz)	M_r (kgm)	Γ	m_{θ} (rad/sec)	r	A_{θ} (rad)
1,2	1,4	$4,7 \cdot 10^7$	0,03	1,2	0,5	0,9	5,1	7,2	109	5,9	205,1	0,8	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Dalam arah gerakan longitudinal													
r_l (m)	η_l	k_l (kg/m)	B_l	α_l	D_l	D_{max}	f_l (Hz)	Γ (Hz)	F_l (kg)	Γ	m_{ec} (rad/sec)	r	A_l (m)
1,4	0	$2,6 \cdot 10^7$	0,05	0	1,4	1,4	24,2	0	0	0	152,2	0	0
Dalam arah goyangan yawing													
r_y (m)	η_y	k_y (kg/m)	B_y	α_y	D_y	D_{max}	f_{θ} (Hz)	Γ (Hz)	M_y (kgm)	Γ	m_{θ} (rad/sec)	r	A_{θ} (rad)
1,5	0	$6,6 \cdot 10^7$	0,1	0	0,4	0,4	38,5	0	0	0	242,6	0	0
Dalam arah goyangan pitching													
r_p (m)	η_p	k_p (kg/m)	B_p	α_p	D_p	D_{max}	f_p (Hz)	Γ (Hz)	M_p (kgm)	Γ	m_{θ} (rad/sec)	r	A_{θ} (rad)
1,2	0	$3,0 \cdot 10^7$	0,03	0	0,5	0,9	26,2	0	0	0	166,3	0	0
Dalam arah goyangan gabungan (couple mode) antara vertikal; horizontal/lateral dan rocking													
r_v (m)	r_h (m)	r_r (m)	k_v (kg/m)	k_h (kg/m)	k_{ec} (kg/m.det)	v_v (lg.m.det)	c_v (kg.det)	c_h (kg.det)	A_{v1} (m)	A_{v2} (m)	A_{h1} (rad)	A_{h2} (rad)	A_{θ} (rad)
1,4	1,2	1,3	$2,6 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^7$	$-1,7,9 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$-1,7 \cdot 10^7$	$-2,2 \cdot 10^7$	$-7,8 \cdot 10^7$	$-1,3 \cdot 10^7$	$-2,9 \cdot 10^7$	$-2,9 \cdot 10^7$
Amplitudo dalam arah goyangan gabungan (couple mode) antara vertikal; horizontal/lateral dan rocking													
A_{v1} (m)	A_{v2} (m)	A_{h1} (rad)	A_{h2} (rad)	A_{θ} (rad)	A_{vmax} (m)	A_{hmax} (rad)	$A_{\theta max}$ (rad)	A_{vmin} (m)	A_{hmin} (rad)	$A_{\theta min}$ (rad)			
2,3 \cdot 10^{-4}	1,7 \cdot 10^{-4}	4,0 \cdot 10^{-4}	3,2 \cdot 10^{-4}	6,6 \cdot 10^{-4}	3,2 \cdot 10^{-4}								

3.4 Pergerakan (*displacement*) statis dan dinamis:

1. Kontrol penurunan tanah pada kondisi statis: Mengacu pada batas penurunan maksimum [19, 27], ternyata penurunan total yang terjadi masih dalam batas aman yaitu sebesar $0,49 \text{ mm} < 0,50 \text{ mm}$.
2. Kontrol keamanan gerakan tunggal (*single*) dan gabungan (*couple mode*) pada kondisi dinamis: Kontrol keamanan diperlihatkan dalam Tabel 13.

Tabel 13. Kontrol keamanan untuk gerakan tunggal dan gabungan (*couple mode*)

Metode analisis	Tipe getaran	
	Tunggal	Gabungan (<i>couple mode</i>)
1	2	3
[15]	$(A_z) = 1,0 \cdot 10^{-4}$ (inchi)	$(A_z) = 2,6 \cdot 10^{-4}$ (inchi)
Kesimpulan	“Not noticeable to Persons”	“Not noticeable to Persons”
[3]	$(v) = 0,02$ (inchi/detik)	$(v) = 0,04$ (inchi/detik)
Kesimpulan	“Extremely smooth”	“Smooth”
[2]	$(A_z) = 2,6 \cdot 10^{-4}$ (mm)	$(A_z) = 6,6 \cdot 10^{-4}$ (mm)
Kesimpulan	“No faults”	“No faults”
[12]	$(A_z) = 2,6 \cdot 10^{-4}$ (mm) $(A_x) = 3,9 \cdot 10^{-3}$ (mm) $(v_{\text{vertikal}}) = 0,4$ (mm/detik) $(v_{\text{lateral}}) = 0,02$ (mm/detik)	$(A_z) = 6,6 \cdot 10^{-4}$ (mm) $(A_x) = 3,2 \cdot 10^{-3}$ (mm) $(v_{\text{vertikal}}) = 1,1$ (mm/detik) $(v_{\text{lateral}}) = 0,02$ (mm/detik)
Kesimpulan	“Kategori A = tidak mengganggu dan tidak merusak”	“Kategori A = tidak mengganggu dan tidak merusak”

3.5 Kontrol terhadap daya dukung statis dan dinamis:

1. Akibat beban statis:

$50\% q_{all} \geq q_{(beban\ luar\ statis)} \rightarrow 4,1\ kg/cm^2 \geq 0,20\ kg/cm^2$
 \rightarrow "Aman".

2. Beban statis dan dinamis:

$75\% q_{all} \geq q_{(beban\ statis +\ dinamis)} \rightarrow 6,2\ kg/cm^2 \geq 0,20\ kg/cm^2$
 \rightarrow "Aman."

3.6 Perencanaan karet peredam (*damping rubber*)

Data hasil diperlihatkan dalam Tabel 14.

Tabel 14. Desain dan analisis karet/pegas peredam

Dalam arah gerakan vertikal			
k_{zt} (kg/cm)	f_{dzt} (rpm)	T_r (%)	W_{din} (kg)
1	2	3	4
1287	203	2	4,2
Dalam arah gerakan horizontal			
183	76	0,3	0,5

3.7 Desain getaran tunggal dengan *vibration isolator*

Data hasil diperlihatkan dalam Tabel 15.

Tabel 15. Data hasil perhitungan dinamis dalam arah gerak vertikal; horizontal; arah goyangan *rocking* dengan *vibration isolator*

Dalam arah gerakan vertikal dengan <i>vibration isolator</i>													
r_x (m)	η_x (rpm)	k_x (kg/m)	B_x	α_x	D_x	D_{stat}	f_{nc} (Hz)	f_r (Hz)	f	ω_{rov} (rad/det)	r	F_r (kg)	A_r (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,4	1,1	$4,1 \cdot 10^7$	0,3	1,4	1,1	1,1	21,5	4,5	11,2	197,6	0,8	211	$5,2 \cdot 10^{-6}$
Dalam arah gerakan horizontal dengan <i>vibration isolator</i>													
r_x (m)	η_x (rpm)	k_x (kg/m)	B_x	α_x	D_x	D_{stat}	f_{nc} (Hz)	f_r (Hz)	f	ω_{rov} (rad/det)	r	F_r (kg)	A_r (m)
1,4	1,4	$2,9 \cdot 10^7$	0,4	2,0	0,9	0,9	25,5	3,6	13,8	161,1	0,9	211	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Dalam arah goyangan <i>rocking</i> dengan <i>vibration isolator</i>													
r_θ (m)	η_θ (rpm)	k_θ (kg/m)	B_θ	α_θ	D_θ	D_{stat}	f_{nc} (Hz)	f_r (Hz)	f	ω_{rov} (rad/det)	r	M_r (kgm)	A_r (m)
1,2	1,4	$4,7 \cdot 10^7$	0,02	1,2	0,9	0,9	51,1	7,2	6,9	205,1	0,8	0,3	$4,8 \cdot 10^{-9}$
Dalam arah goyangan gabungan (<i>couple mode</i>) antara vertikal; horizontal/lateral dan <i>rocking</i> dengan <i>vibration isolator</i>													
r_x (m)	r_θ (m)	$F_{\theta 0}$ (m)	k_x (kg/m)	k_θ (kg/m)	$k_{\theta 0}$ (kg.m.det)	c_θ (kg.m.det)	c_x (kg/det)	c_θ (kg/det)	A_{x1} (m)	A_{x2} (m)	$A_{\theta 1}$ (rad)	$A_{\theta 2}$ (rad)	
1,4	1,2	1,3	$2,9 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^7$	$-1,7 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^6$	$-1,7 \cdot 10^6$	$-4,8 \cdot 10^8$	$-1,7 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^8$	$-2,2 \cdot 10^8$	
Amplitudo dalam arah goyangan gabungan (<i>couple mode</i>) antara vertikal; horizontal/lateral dan <i>rocking</i> dengan <i>vibration isolator</i>													
			A_x (m)	A_θ (rad)	$A_{x(rocks)}$ (m)	$A_{x(rocks)}$ (m)	$A_{x(rocks)}$ (m)	$A_{x(rocks)}$ (m)	$A_{x(rocks)}$ (m)	$A_{x(rocks)}$ (m)			
			$5,2 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$					

3.8 Desain penulangan pondasi dangkal untuk Genset

Desain tulangan menggunakan standar [25]. Berdasarkan [25] dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Data-data untuk struktur beton bertulang;

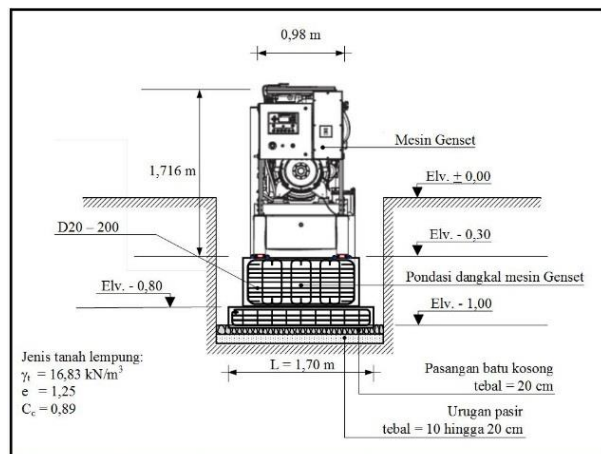
Kuat tekan beton = 30 Mpa; kuat leleh baja = 400 Mpa; berat volume (γ) beton bertulang = 2400 kg/m³; panjang = 3.5 m; tinggi : 0.6 m; lebar : 1.5 m; berat pondasi = 7560 kg; berat mesin = 2075 kg; beban dinamis = 4,22 kg; tulangan pokok = D 20.

2. Hasil perhitungan desain:

Analisis dan desain penulangan untuk pondasi diperlihatkan dalam Tabel 16 berdasarkan SNI 1726-2012 [25].

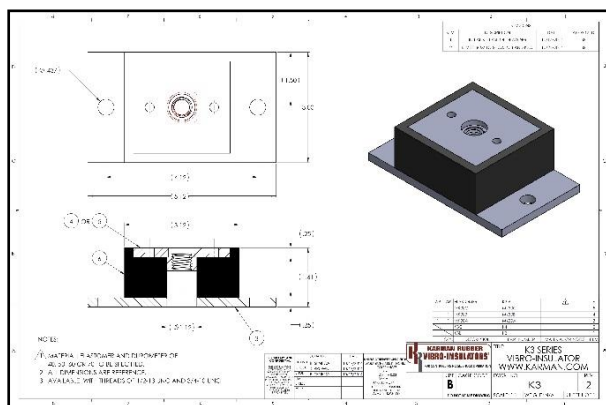
Tabel 16. Desain penulangan pondasi dangkal

Analisis pembebanan			Analisis penulangan				
d (mm)	q (kg/m ²)	M _{maks} (Nmm)	J _d (mm)	A _{s(perlu)} (mm ²)	D _{min}	Jarak tulangan pokok (mm)	Diambil tulangan pokok
1	2	3	4	5	6	7	8
515	2754	$24,1 \cdot 10^6$	437,8	171	0,0035	1837	D20-200



Gambar 15. Hasil analisis dan perencanaan pondasi genset

4. Kontrol perhitungan karet peredam vibration isolator. Dari hasil perhitungan didapatkan spesifikasi karet peredam Karman K3-C51 dapat meredam getaran yang terjadi diperlihatkan dalam Gambar 16.



Gambar 16. Hasil desain dan perencanaan karet/pegas peredam [14]

5. Kontrol terhadap penurunan tanah akibat pondasi: Penurunan yang terjadi masih dalam batas-batas yang diijinkan.

Daftar Rujukan

- [1] Anastasopoulos I, Kontoroupi T. 2014. Simplified approximate method for analysis of rocking systems accounting for soil inelasticity and foundation uplifting. *Soil Dyn Earthq Eng* 2014;56:28–43.
- [2] Blake, M.P. 1964. New Vibration Standards for Maintenance. *Hydrocarbon Processing Petroleum Refiner*, Vol.43, No.1, pp 111-114.
- [3] Baxter, R.L., Bernhard, D.L., 1967. *Vibration Tolerances for Industry*, in: *ASME Paper 67-PEM-14, Plant Engineering and Maintenance Engineer*. Detroit, Michigan.
- [4] Beredugo, Y.O. and Novak, M. 1972. Coupled horizontal and rocking vibration of embedded footings. *Canadian Geotechnical Journal*, 9(4): pp. 477-497.
- [5] Braja, M.D. 2011. "Principles of Foundation Engineering, SI", 7th edition, Global Engineering: Christopher M. Shortt.
- [6] Bowles, J.E. 1977. *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc. International Edition.
- [7] El Ganainy, H, El Naggat M.H. 2009. Efficient 3D nonlinear Winkler model for shallow foundations. *Soil Dyn Earthq Eng* 2009;29:123648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.02.002>.
- [8] Febrianto. 2011. *Perencanaan dan Pelaksanaan Pondasi Mesin Generator PT EPFM* [Skripsi]. Makasar: Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- [9] Hardiyatmo, H., C. 2011. *Analisa dan Perancangan Fondasi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [10] Irsyam, M, Sahadewa A, dan Darjanto H. 2008. *Dinamika tanah dan Fondasi Mesin*. Bandung: ITB.
- [11] Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli B. 1956. *Veiledning ved losning av fundamentingsoppgaver*. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 16, 93 p. (in Norwegian).
- [12] KepMen Negara KLH. 1996. No.: KEP-49/MENLH/11/1996. *Tentang Buku Tingkat Getaran*.
- [13] Kutter BL, Moore M, Hakhameshi M, Champion C. 2016. Rationale for shallow foundation rocking provisions in ASCE 41-13. *Earthq Spectra* 32, pp. :1097–1119. <http://dx.doi.org/10.1193/121914EQS215M>.
- [14] Karman rubber vibro-insulator. 2018. *Karman Rubber Company*. 2331 Copley Road Akron, OH 44320. USA
- [15] Prakash, S. and Puri, V.K. 1988. *Foundation for Machines Analysis and Design*. John Wiley & Sons, New York.
- [16] Richart, F. E. 1962. Foundation vibrations. *Trans. ASCE*, 111, pp. 863-898.
- [17] Rocscience Inc. 2016. *RS2– 2D finite element program for soil and rock applications*.
- [18] Robertson, P.K., and Campanella, R.G. 1986a. Interpretation of cone penetration tests – Part I (sand). *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 718-733.
- [19] Skempton, A.W and Mac Donald, W.H. 1956. Allowable Settlement of Building. *Proceeding Institute of Civil Engineers, Part III*, Vol. 5, pp. 727 – 768.
- [20] Robertson, P.K., and Campanella, R.G. 1986b. Interpretation of cone penetration tests – Part II (clay). *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 734-745.
- [21] Robertson, P.K. 2010. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotech. J.*, 46(11):1337–1355.
- [22] Sigit, A.S. 1996. *Buku Ajar Pondasi Dinamis*. Surabaya: ITS.
- [23] Schneider, J.A., Randolph, M.F., Mayne, P.W., and Ramsey, N. 2008. Analysis of Factors Influencing Soil Classification Using Normalized Piezocone Tip Resistance and Pore Pressure Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11), pp: 1569-1586.
- [24] Schmertmann, J. H. 1978. *Guidelines for cone penetration test, performance and design U.S. Department of Transportation*, Washington, DC, Report No. FHWA-TS-78-209, 145 p.
- [25] SNI 1726. 2012. *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Badan Standardisasi Nasional. ICS 91.120.25;91.080.01.
- [26] Specification of Triton Generating Set. 2018. www.gopwer.com
- [27] Wayne, C.T. 1992. *Foundation Design*. Prentice Hall of India Private Limited, M-97 Connaught Circus, New Delhi-110001.
- [28] Zhang J, Tang Y. 2007. *Finite element modeling of shallow foundations on nonlinear soil medium*. Struct., Los Angeles.