

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penyelidikan tanah

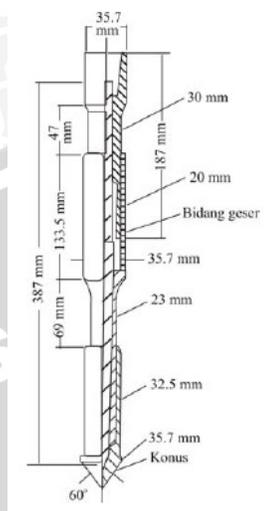
Penyelidikan kondisi bawah tanah di tempat merupakan prasyarat bagi perancangan elemen bangunan bawah (*substructure*). Tujuan dari penyelidikan tanah ialah menentukan sifat stratifikasi dan teknik dari tanah yang mendasari suatu tempat, secara praktis. Sifat-sifat utama yang ditinjau adalah karakteristik kekuatan, deformasi, dan hidrolis (Bowles, 1998). Dari penyelidikan tanah akan didapatkan data sampel tanah dari lokasi proyek serta nilai penetrasi dari tanah tersebut. Selain penyelidikan tanah di tempat (lapangan), dilakukan pula uji laboratorium. Sifat-sifat fisik tanah dapat dipelajari pula dari hasil uji laboratorium pada contoh-contoh tanah yang diambil dari pengeboran (Hardiyatmo, 2002).

2.1.1 Uji penetrasi konus (CPT)

Jenis tanah pada lokasi yang akan digunakan untuk pembangunan *clarifier* Desa Ngerong merupakan tanah pasir pada kedalaman 3,2 meter. Untuk memperoleh variasi kepadatan tanah pasir yang tidak padat, uji sondir merupakan cara penyelidikan yang sangat bermanfaat. Nilai-nilai tahanan kerucut statis atau tahanan konus (qc) yang diperoleh dari pengujian, dapat dikorelasikan secara langsung dengan kapasitas dukung tanah dan penurunan pada pondasi-pondasi dangkal dan pondasi tiang (Hardiyatmo, 2002).

Uji penetrasi kerucut statis atau uji sondir banyak digunakan di Indonesia (Hardiyatmo, 2002). *Cone Penetration Test* adalah suatu uji sederhana yang dipakai untuk lempung lunak dan pasir halus sampai pasir setengah kasar. Pengujian ini tidak cocok diterapkan pada tanah kerikil dan lempung kaku maupun keras (Bowles, 1998). CPT merupakan suatu penyelidikan tanah tanpa melakukan pengambilan sampel tanah. Pengujian CPT dilakukan dengan melakukan mendorong konus (menurut ASTM D 3441 mempunyai ujung 60° dan diameter dasar = 35,7 mm dengan luas irisan lintang 10 cm^2) ke dalam tanah dengan kecepatan 10 mm/detik s.d 20 mm/detik. Konus yang digunakan

di lapangan memiliki standar ukuran. Gambar 2.1 merupakan contoh standar ukuran konus yang digunakan dalam penyelidikan tanah di lapangan.



Gambar 2. 1 Rincian Konus Ganda (SNI 2827-2008)

Nilai-nilai tahanan kerucut statis atau tahanan konus (q_c) yang didapatkan dari hasil pengujian CPT dapat dikorelasikan secara langsung dengan kapasitas dukung tanah dan penurunan pada pondasi-pondasi dangkal dan pondasi tiang (Hardiyatmo, 2002).

2.2 Teori umum pondasi

Menurut (Sosrodarsono & Nakazawa, 2000) dalam merencanakan macam pondasi yang digunakan, ada beberapa kondisi-kondisi yang perlu menjadi bahan pertimbangan antara lain :

1. Keadaan tanah pondasi;
2. Batasan-batasan akibat konstruksi di atasnya (*superstructure*);
3. Batasan-batasan dari sekelilingnya;
4. Waktu dan biaya pekerjaan.

Seperti yang kita ketahui bahwa, keadaan tanah pondasi merupakan keadaan yang paling penting. Beberapa jenis pondasi terkait dengan kondisi tanah yang bersangkutan diantaranya :

- a) Bila tanah pendukung pondasi terletak pada permukaan tanah atau 2 sampai 3 meter di bawah permukaan tanah maka jenis pondasi yang digunakan adalah pondasi telapak (*spread foundation*);
- b) Bila tanah pendukung pondasi terletak pada kedalaman sekitar 10 meter di bawah permukaan tanah maka pondasi yang digunakan adalah pondasi tiang atau pondasi tiang apung;
- c) Bila tanah pendukung pondasi terletak pada kedalaman sekitar 20 meter di bawah permukaan tanah dan tidak boleh terjadi penurunan maka pondasi yang digunakan pondasi tiang pancang

2.2.1 Perencanaan pondasi blok statis

Jenis pondasi yang akan digunakan dalam perencanaan bangunan *clarifier* di desa Ngerong adalah pondasi blok statis. Pondasi blok statis merupakan salah satu jenis pondasi dangkal. Pondasi dangkal digunakan jika kedalaman tanah keras tidak terlalu jauh dari permukaan tanah.

Sebagai salah satu jenis dari pondasi telapak, pondasi blok merupakan suatu pondasi yang mendukung bangunan secara langsung pada tanah pondasi bilamana terdapat lapisan tanah yang cukup tebal dengan kualitas yang baik dan mampu mendukung bangunan itu pada permukaan tanah atau sedikit di bawah permukaan tanah.

Pendimensian dari pondasi pada umumnya disesuaikan dengan dimensi beban yang bangunan yang harus didukung. Perkiraan ukuran ini dilakukan sebelumnya karena kelayakan dari ukuran yang telah diperikirkakan memiliki pengaruh yang besar dalam efisiensi pekerjaan perencanaan.

2.2.2 Analisis beban

Clarifier merupakan salah satu bangunan yang ada pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) pada pengolahan limbah secara kimia. Clarifier merupakan bagian penting dalam proses industri tersebut. Bak Clarifier merupakan tangki yang berfungsi untuk memisahkan flok yang terbentuk pada proses koagulasi dan flokulasi. Bak clarifier ini dapat dirancang berbentuk segi empat, segi empat panjang maupun silinder.

Di dalam analisis beban, agar pondasi statis dan dinamis dapat dibandingkan secara seimbang maka, gaya yang ditimbulkan akibat adanya aktifitas mesin harus diperhitungkan pula. Oleh karena pondasi blok direncanakan dengan analisis beban statis,

statik ekivalensi beban dinamis akibat adanya aktifitas mesin harus dilakukan. Sehingga analisis beban yang dilakukan sudah sebanding yakni beban struktural meliputi berat bangunan *clarifier* dan mesin (*scraper*), dan gaya dinamis mesin.

2.2.2.1 Statis ekivalensi beban akibat aktifitas mesin

Bangunan *clarifier* merupakan suatu bangunan yang menerapkan prinsip sentrifugasi. Sentrifugasi adalah memanfaatkan prinsip gaya sentrifugal untuk mengendapkan suatu campuran partikel. Alat untuk sentrifugasi ini biasa disebut pemusing atau mesin sentrifugal (*centrifuge*). Prinsip kerja mesin *clarifier* adalah apabila memisahkan suatu campuran dengan gaya sentrifugal (gerak memutar menjauhi pusat putaran) sehingga akan terbentuk endapan dan di bagian atasnya suatu cairan akan memisah dari endapan tersebut (Magdalena dan Arly, 2013).

Adanya prinsip sentrifugasi pada mesin inilah yang mengakibatkan timbulnya beban dinamis. Menurut Nawrotzki, Hüffmann, dan Uzunoglu (2008) dalam *Static and Dynamic Analysis of Concrete Turbine* untuk jenis pondasi dengan geometri yang sederhana, analisa beban statis ekivalen lebih mudah untuk diterapkan dibandingkan analisa dinamis. Statik ekivalensi beban dari gaya tidak seimbang pada mesin dapat dihitung sebagai berikut :

$$F = v \cdot F(t) \quad (2.1)$$

$$F = \frac{1}{|1-\eta^2|} \cdot F(t) \quad (2.2)$$

$$F_{max} = 15 \cdot F(t) \quad (2.3)$$

Dengan :

F = gaya statis

F(t) = gaya tak seimbang akibat aktifitas mesin

Dimana η adalah perbandingan antara frekuensi operasi mesin (f_m) dengan frekuensi natural pondasi (f_n) :

$$\eta = \frac{f_m}{f_n} \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan konsep di atas, dapat dilakukan perhitungan statis ekuivalensi beban untuk bangunan *clarifier*.

2.3 Daya dukung

2.3.1 Daya dukung pondasi blok statis

Analisis daya dukung tanah mempelajari kemampuan tanah untuk mendukung beban struktur/bangunan atas pondasi. Daya dukung menyatakan kuat geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu kuat geser yang dapat dibangkitkan oleh tanah sepanjang bidang gesernya (Suroso, Munawir, & Indrawahyuni, 2007).

2.3.1.1 Analisis daya dukung dua sifat lempung yang berbeda

Vesic (1970) menyarankan persamaan kapasitas dukung ultimit untuk pondasi yang terletak di tanah lempung, yang tanahnya terdiri dari dua lapis, yaitu lempung lunak pada bagian atas dan lempung kaku pada bagian bawah atau sebaliknya.

Persamaan kapasitas dukung ultimit, bila tanah yang di atas lebih lunak daripada yang di bawahnya dinyatakan oleh :

$$q_u = c_1 \cdot N_m + D_f \cdot \gamma \quad (2.5)$$

dengan :

- c_1 : kohesi lapisan lempung atas
- N_m : faktor kapasitas dukung
- D_f : kedalaman pondasi
- γ : berat volume tanah di lapisan atas

Nilai-nilai N_m relatif aman untuk pondasi yang sangat kaku dan harus dipakai dengan hati hati bila pondasinya fleksibel.

c_2/c_1	B/H						
	2	4	6	8	10	20	∞
1	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14
1,5	5,14	5,31	5,45	5,59	5,70	6,14	7,71
2	5,14	5,43	5,69	5,92	6,13	6,95	10,28
3	5,14	5,59	6,00	6,38	6,74	8,16	15,42
4	5,14	5,69	6,21	6,69	7,14	9,02	20,56
5	5,14	5,76	6,35	6,90	7,42	9,66	25,70
10	5,14	5,93	6,69	7,43	8,14	11,40	51,40
∞	5,14	6,14	7,14	8,14	9,14	14,14	∞

Gambar 2. 2a Faktor kapasitas dukung N_m dari Vesic untuk pondasi empat persegi panjang dengan $L/B \leq 5$

c_2/c_1	B/H						
	4	6	8	10	20	40	∞
1	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17
1,5	6,17	6,34	6,49	6,63	6,76	7,25	9,25
2	6,17	6,46	6,73	6,98	7,20	8,10	12,34
3	6,17	6,63	7,05	7,45	7,82	9,36	18,51
4	6,17	6,73	7,26	7,75	8,23	10,24	24,68
5	6,17	6,80	7,40	7,97	8,51	10,88	30,85
10	6,17	6,96	7,74	8,49	9,22	12,58	61,70
∞	6,17	7,17	8,17	9,17	10,17	15,17	∞

Gambar 2.2b Faktor kapasitas dukung N_m dari Vesic untuk pondasi bujur sangkar dan lingkaran dengan $L/B = 1$

2.4 Penurunan

Penurunan (*settlement*) merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menunjukkan gerakan titik tertentu pada bangunan terhadap titik referensi yang tetap (Hardiyatmo, 2002). Penurunan pada tanah berbutir halus dapat dibagi menjadi 3 komponen yakni penurunan konsolidasi primer, konsolidasi sekunder dan penurunan segera (*immediate settlement*). Bila dinyatakan dalam persamaan :

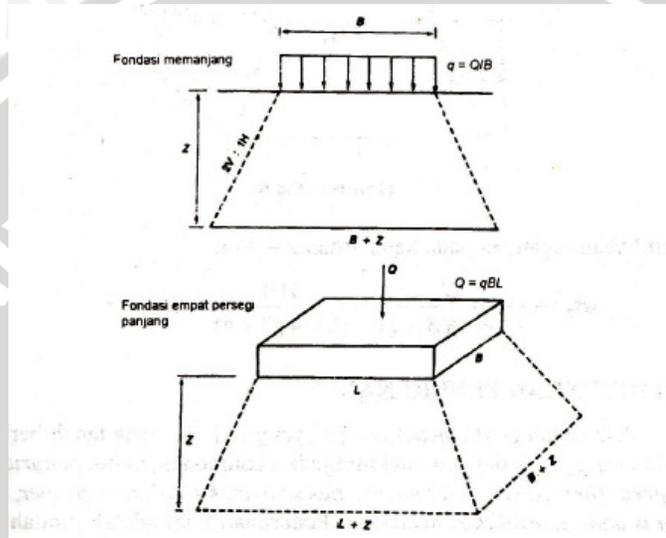
$$S = S_c + S_s + S_i \tag{2. 6}$$

dengan :

- S : penurunan total
- S_c : penurunan konsolidasi primer
- S_s : penurunan konsolidasi sekunder
- S_i : penurunan segera

2.4.1 Analisis penurunan dengan menggunakan metode penyebaran 2V : 1H

Metode ini merupakan salah satu cara pendekatan yang sangat sederhana untuk menghitung penyebaran tegangan akibat pembebanan yang diberikan oleh Boussinesq. Caranya adalah dengan membuat garis penyebaran 2 vertikal dibanding 1 horizontal (2V : 1H). Beban pondasi (Q) dianggap didukung oleh pyramid yang mempunyai kemiringan sisi 2V : 1H.



Gambar 2. 3 Cara penyebaran tegangan 2V : 1H

Untuk pondasi empat persegi panjang :

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{(L+z)(B+z)} \tag{2. 7}$$

atau

$$\Delta\sigma_z = \frac{qLB}{(L+z)(B+z)} \tag{2. 8}$$

dengan :

$\Delta\sigma_z$: tambahan tegangan vertikal pada kedalaman z (kN/m²)

Q : beban total (kN)

q : beban terbagi rata (kN/m²)

L : panjang luasan beban (m)

B : lebar luasan beban (m)

z : kedalaman (m)

2.4.2 Penurunan segera

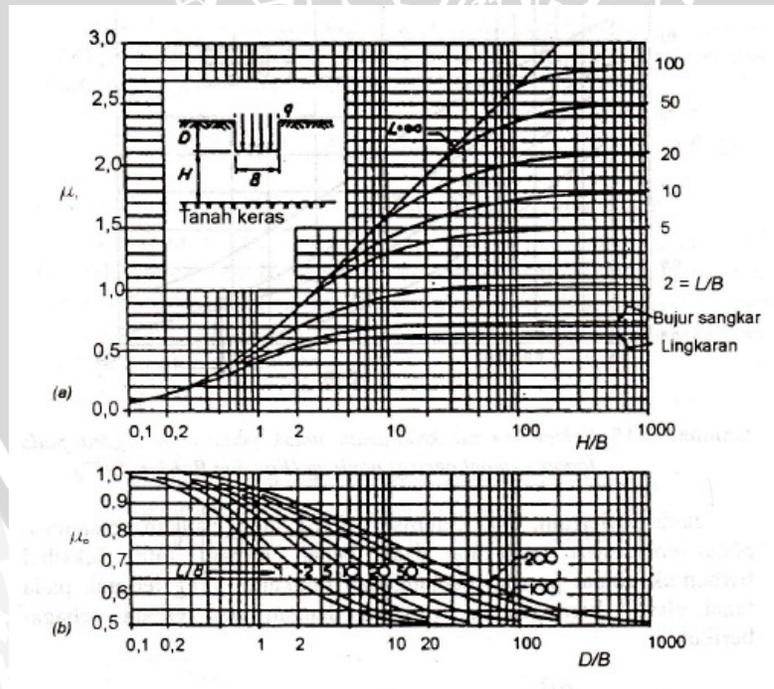
2.4.2.1 Penurunan segera pada lapisan tanah pendukung yang dibatasi tanah keras

Janbu, Bjerrum, dan Kjaernsli (1956), mengusulkan persamaan *penurunan-segera* rata-rata pada beban terbagi rata fleksibel berbentuk empat persegi panjang dan lingkaran yang terletak pada tanah elastis, homogen, dan isotropis dengan tebal terbatas sebagai berikut :

$$S_i = \mu_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{qB}{E} \tag{2.9}$$

dengan :

- S_i : penurunan segera rata-rata
- μ_1 : faktor koreksi untuk lapisan tanah dengan tebal terbatas H
- μ_0 : faktor koreksi untuk kedalaman pondasi D_f
- B : lebar pondasi empat persegi panjang atau diameter lingkaran
- q : tekanan pondasi netto
- E : modulus elastisitas tanah



Gambar 2. 4 Grafik untuk menentukan nilai μ_1 dan μ_0

Perhitungan penurunan segera, dilakukan dengan membagi tanah ke dalam beberapa lapisan tanah yang terbatas. Jika regangan tiap lapisan dapat dihitung maka, dapat diperoleh penurunan segera totalnya.

2.4.2.2 Penurunan segera berdasarkan uji sondir (CPT)

Penurunan pondasi pada tanah granuler dapat dihitung dari hasil uji kerucut statis.

De Beer dan Marten mengusulkan persamaan angka kompresi (C) sebagai berikut :

$$C = \frac{1,5 q_c}{p_0'} \quad (2.10)$$

dimana :

q_c : tahanan kerucut statis atau tahanan konus sondir

p_0' : tekanan *overburden* efektif rata-rata atau tegangan efektif di tengah-tengah lapisan yang ditinjau.

Nilai C ini kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan Terzaghi untuk penurunan lapisan tanah yang ditinjau yaitu :

$$S_i = \frac{H}{c} \ln \frac{p_0' + \Delta p}{p_0} \quad (2.11)$$

dengan :

S_i : penurunan akhir (m) dari lapisan setebal H (m)

$\Delta p = \Delta \sigma_z$: tambahan tegangan vertikal di tengah-tengah lapisan yang ditinjau terhadap tekanan pondasi netto.

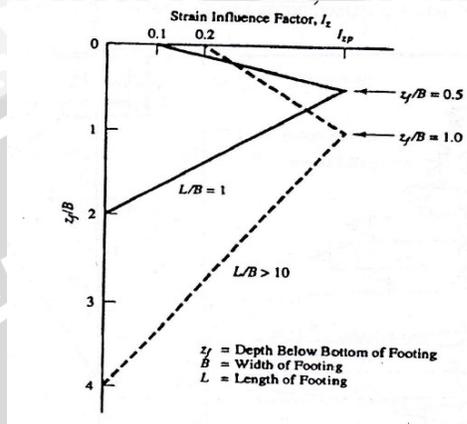
Dalam menentukan angka pemampatan (C), diperlukan nilai q_c rata-rata. Penurunan di setiap lapisan yang tertekan oleh beban pondasi dihitung terpisah, dan hasilnya ditambahkan bersama-sama. Hasil ini merupakan penurunan total dari seluruh lapisan tanah.

Selain dengan menggunakan metoda penyebaran, analisis penurunan juga dapat didasarkan pada metoda Metoda Schmertmann (1970, 1978, dan Schmertmann et.al 1978). Pada metode ini, ditentukan pengaruh mulai dasar pondasi sampai kedalaman 2B untuk pondasi bujur sangkar atau lingkaran dan 4B untuk pondasi menerus serta faktor pengaruh regangan yang bervariasi terhadap kedalaman. Untuk menghitung besarnya faktor ini dihitung harga puncak dari faktor pengaruh regangan I_{zp} .

$$I_{zp} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{q - \sigma'_{zD}}{\sigma'_{zp}}} \quad (2.12)$$

$q' = q - \sigma'_{zD}$ = tegangan netto pada dasar pondasi

σ'_{zp} = tegangan vertikal efektif mula-mula pada kedalaman puncak



Gambar 2.5 Faktor pengaruh regangan (*Strain Influence Factor*)

Menghitung penurunan :

$$\delta = C_1 C_2 C_3 (q - \sigma'_{zD}) \sum \frac{I_z H}{E_s} \quad (2.13)$$

$$C_1 = \text{faktor kedalaman} = 1 - 0,5 \left(\frac{\sigma'_{zD}}{q - \sigma'_{zD}} \right) \quad (2.14)$$

$$C_2 = \text{faktor rangkai} = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

$$C_3 = \text{faktor bentuk} = 1,03 - 0,03 \frac{L}{B} \geq 0,73$$

2.4.3 Penurunan izin

Perencanaan pondasi dibutuhkan untuk dapat memperkirakan besarnya penurunan maksimum yang terjadi. Skempton dan MacDonald (1955) menyarankan batas-batas penurunan maksimum seperti pada tabel di bawah ini :

Tabel 2.1 Batas penurunan maksimum

Jenis Pondasi	Batas Penurunan Maksimum (mm)
Pondasi terpisah pada tanah lempung	65
Pondasi terpisah pada tanah pasir	40
Pondasi rakit pada tanah lempung	65–100
Pondasi rakit pada tanah pasir	40–65

Sumber: Hary Christady, 1996:200

2.5 Teori umum pondasi mesin

Pondasi merupakan elemen yang berfungsi untuk meneruskan beban di atasnya dan berat pondasi itu sendiri ke dalam tanah yang terletak di bawahnya (Bowles, 1998). Pondasi mesin merupakan elemen struktur yang digunakan untuk meneruskan beban dari mesin di atas pondasi ke dalam tanah. Perencanaan pondasi mesin umumnya lebih kompleks daripada pondasi yang hanya menerima beban statis saja. Pada pondasi mesin, selain memperhitungkan gaya statis yang berasal dari berat mesin dan berat pondasi itu sendiri, gaya dinamis yang dihasilkan oleh mesin juga diperhitungkan. Sehingga, pondasi mesin memerlukan prosedur disain yang lebih khusus (Irsyam, Sahadewa, & Darjanto, 2012).

2.5.1 Klasifikasi mesin

Mesin merupakan beban dinamis yang harus ditopang oleh pondasi. Berdasarkan pola gaya yang dihasilkan oleh mesin di atas pondasi, mesin dapat dikategorikan sebagai berikut :

1) Mesin bolak balik (*reciprocating machines*)

Merupakan mesin yang menghasilkan beban bolak balik akibat mekanisme engkol. Pada mesin jenis ini umumnya memiliki kecepatan operasi <1200 rpm misalnya mesin uap, motor bakar, dan kompresor.

2) Mesin impak (*impact machines*)

Mesin impak merupakan mesin yang menghasilkan beban kejut. Mesin jenis ini memiliki kecepatan operasi 60-120 rpm. Contoh dari mesin ini adalah *forging hammer*.

3) Mesin rotasi (*rotating machines*)

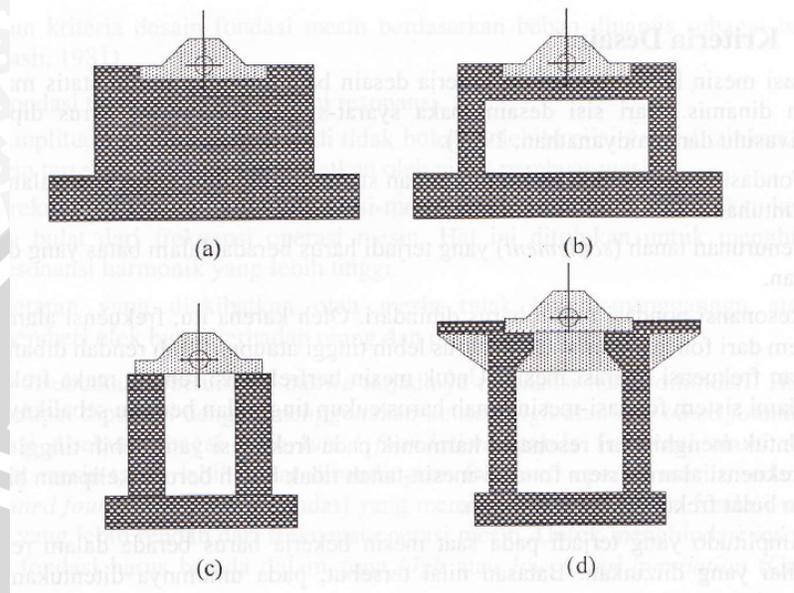
Mesin jenis ini memiliki kecepatan putaran yang tinggi yaitu berkisar >3000 rpm. Contoh dari mesin ini adalah turbogenerator, turbine, dan rotary compressor.

2.5.2 Tipe pondasi mesin

Berdasarkan bentuk strukturalnya, pondasi mesin dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu :

- a) Pondasi blok berupa pedestal beton
- b) Pondasi boks ataupun *caisson* berbentuk pondasi blok berongga

- c) Pondasi dinding (*wall*) dengan bentuk sepasang dinding sebagai dukungan mesin
- d) Pondasi rangka (*fame*) yang terdiri atas kolom penopang vertikal dan rangka horizontal.



Gambar 2. 6 Tipe-tipe Pondasi Mesin

Pemilihan jenis pondasi disesuaikan dengan beban yang bekerja di atasnya. Untuk mesin yang menghasilkan beban massa yang kecil digunakan pondasi blok yang memiliki massa ringan dan frekuensi naturalnya tinggi. Pada umumnya pondasi blok digunakan untuk mesin bolak balik dan mesin impak yang memiliki frekuensi rendah. Akan tetapi, pada dua jenis mesin tersebut yang bekerja pada frekuensi tinggi dan mesin rotasi umumnya digunakan pondasi rangka. Penggunaan pondasi tiang sebagai pondasi mesin dapat digunakan untuk beberapa kondisi tertentu (Irsyam, Sahadewa, & Darjanto, 2012).

2.6 Kriteria desain pondasi mesin

Di dalam melakukan perencanaan, desain pondasi harus memenuhi kriteria-kriteria yang disyaratkan yaitu :

- 1) Untuk beban statis
 - Daya dukung \geq tegangan tanah yang terjadi.
 - Pondasi tidak boleh mengalami penurunan tanah yang berlebihan atau penurunan yang terjadi \leq penurunan yang diijinkan.

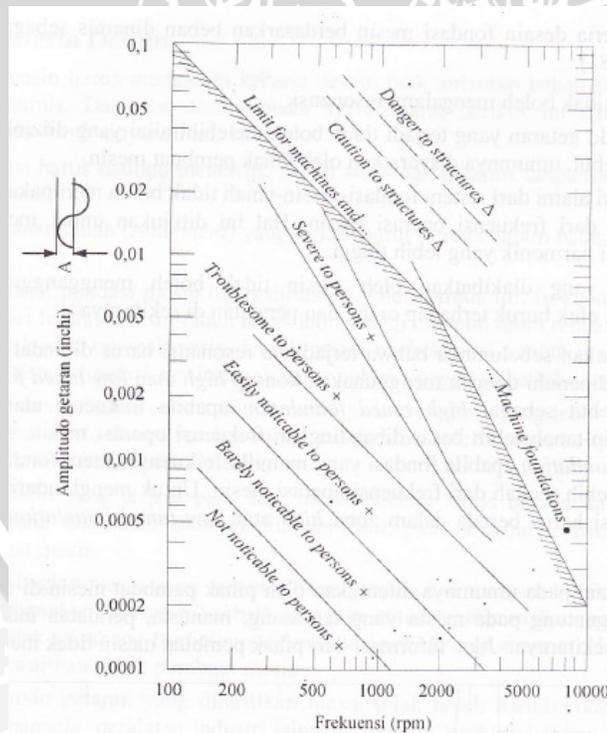
2) Untuk beban dinamis

1. Pondasi tidak boleh mengalami resonansi (frekuensi mesin = frekuensi alami sistem mesin-pondasi tanah)

Pada perencanaan pondasi mesin, ketentuan umum yang harus dipenuhi untuk menghindari resonansi :

- a) Frekuensi resonansi dari sistem pondasi-tanah < setengah frekuensi operasi mesin kecepatan tinggi (≥ 1000 rpm)
 - b) Untuk mesin kecepatan rendah ($< 350 - 400$ rpm) frekuensi resonansi dari sistem pondasi – tanah \geq dua kali frekuensi operasi
 - c) Kenaikan berat pondasi akan menurunkan frekuensi resonansi
 - d) Kenaikan r_0 akan menaikkan frekuensi resonansi pondasi
 - e) Kenaikan modulus geser tanah G , akan menaikkan frekuensi resonansi pondasi
2. Amplitudo getaran yang terjadi tidak boleh melebihi nilai yang diizinkan.

Hubungan antara amplitudo dan frekuensi mesin dapat dilihat pada gambar 2.6 :



Gambar 2. 7 Kriteria Getaran Richart (1962)

Nilai amplitudo ijin untuk beberapa jenis mesin Barkan (1962)

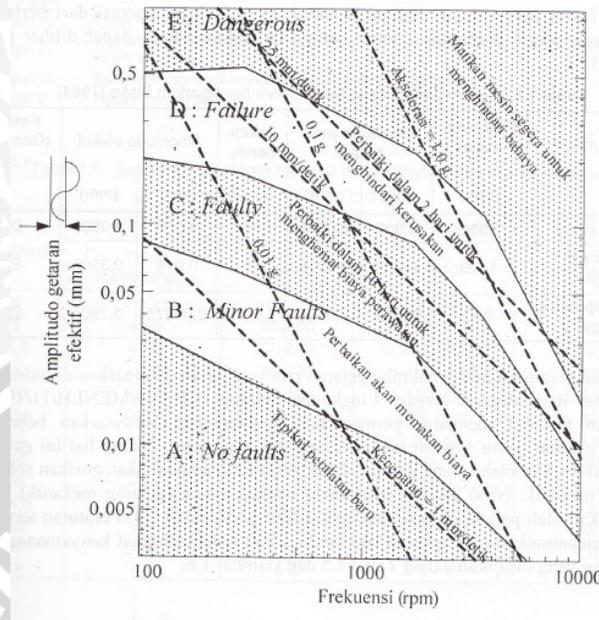
Tabel 2. 2 Nilai Amplitudo Izin Untuk Beberapa Jenis Mesin

Jenis	Amplitudo Izin
Mesin berfrekuensi rendah	0,02-0,025
Mesin <i>hammer</i>	0,1-0,12
Mesin berfrekuensi tinggi	
a. 3000 rpm	
Getaran Vertikal	0,002-0,003
Getaran Horizontal	0,004-0,005
b. 1500 rpm	
Getaran Vertikal	0,004-0,006
Getaran Horizontal	0,007-0,009

Sumber : Irsyam, Sahadewa, dan Darjanto : 2012

3. Frekuensi alami dari sistem pondasi-mesin-tanah tidak boleh merupakan kelipatan bulat dari frekuensi operasi mesin. Hal ini ditujukan untuk menghindari resonansi harmonik yang lebih tinggi.
4. Getaran yang diakibatkan oleh mesin tidak boleh mengganggu ataupun memberi efek buruk terhadap orang dan peralatan di sekitarnya. Getaran yang mengganggu bergantung pada amplitudo saat mesin berjalan. Kriteria operasi untuk mesin dibagi menjadi lima yaitu dari kriteria A sampai E yang dijabarkan sebagai berikut :
 - E : Berbahaya (mesin harus dimatikan)
 - D : Mendekati bahaya (perbaikan secepatnya)
 - C : Kerusakan berat (segera diperbaiki)
 - B : Kerusakan kecil
 - A : Tidak ada kerusakan (kondisi mesin relatif baru).

Kriteria operasi mesin tersebut dapat digambarkan pada gambar 2.7 yang menunjukkan hubungan antara frekuensi dan amplitudo getaran efektif.



Gambar 2. 8 Kriteria Getaran Mesin Rotasi Blake 1964

Selain kriteria-kriteria di atas, dalam mendesain pondasi ada beberapa parameter yang harus dipenuhi yaitu :

1. Data mesin meliputi :
 - Lay Out mesin
 - Frekuensi operasi
 - Gaya tak seimbang (*unbalanced force*)
 - Titik kerja gaya
 - Amplitudo vibrasi yang diijinkan
2. Data parameter dinamis tanah meliputi :
 - Modulus Geser (*Shear Modulus*)
 - Damping
 - Poisson's Ratio

2.7 Parameter dinamis tanah

Parameter dinamis tanah diperlukan untuk menganalisis permasalahan tanah yang menerima beban dinamis. Beberapa parameter tanah yang diperlukan adalah :

1. Modulus geser

Modulus geser tanah merupakan perbandingan antara tegangan geser τ dengan regangan geser γ .

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2. 15}$$

Faktor faktor yang mempengaruhi modulus geser tanah adalah :

- Jenis tanah
- *Confining pressure / stress level*
- *Strain level*
- Derajat kejenuhan
- Frekuensi dan jumlah siklus beban
- Besar beban dinamis
- *Dynamic prestrain*

Untuk mendapatkan nilai modulus geser dapat digunakan metoda :

- Rumus empiris
- Metoda uji laboratorium
- Metoda uji lapangan

Pada pembahasan, modulus geser tanah dinamis G akan ditentukan dengan menggunakan data tes lapangan yaitu dengan harga $N - SPT$. Imai (1977) memberikan hubungan antara nilai N dan kecepatan gelombang geser v_s (m/sec) dengan rumus :

$$v_s = 91 N^{0.337} \tag{2. 16}$$

$$G = \rho \cdot v_s^2 \tag{2. 17}$$

Untuk nilai $N-SPT$ dapat diperoleh dengan mengkorelasikan nilai tahanan konus dengan rasio antara $\frac{q_c}{N}$ menurut De Alencar Velloso (1959) pada tabel sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Korelasi $N-SPT$ dengan tahanan konus

Tipe tanah	Hubungan rasio $n = \frac{q_c}{N}$
Clay and silty clay	0,35

Sandy clay and silty sand	0,2
Sandy silt	0,35
Fine sand	0,6
Sand	1,00

Sumber : Kara dan Gündüz (2014)

Selain menggunakan nilai N-SPT nilai kecepatan gelombang geser dapat diperoleh dengan mengkorelasikan antara kecepatan gelombang geser v_s dengan tahanan konus (q_c) secara langsung yakni menurut Widjojo A. Prakoso (2010) :

$$V_s = 111,21 \cdot q_c^{0,37} \quad (2.18)$$

dimana :

V_s = kecepatan gelombang geser (m/sec)

q_c = tahanan konus (Mpa)

2. Damping

Tanah dapat dianggap memiliki perilaku elastis sempurna dalam rentang regangan amplitudo yang cukup rendah. Di luar rentang regangan tersebut, perilaku tanah menjadi inelastis. Perilaku inelastis tanah dalam menerima beban siklis ditunjukkan dengan terjadinya disipasi energy redaman tanah (*soil damping*). Energi yang terdisipasi akan berubah menjadi energi lain misalnya panas, bunyi, maupun perpindahan permanen. Gerakan pondasi-tanah mengalami redaman akibat kehilangan energi :

- Absorpsi energi dalam massa tanah (*material damping*)
- Absorpsi energi sehubungan dengan geometri tanah-pondasi (*geometric damping*)

3. Poisson's Ratio

Pada material elastis yang mengalami gaya satu arah, di samping terjadi regangan pada arah gaya juga terjadi regangan dalam setiap arah tegak lurus gaya. Rasio antara regangan tegak lurus arah gaya dengan regangan searah gaya tersebut merupakan angka Poisson yang umumnya dilambangkan dengan ν atau μ . Angka poisson memperlihatkan

sensitivitas yang rendah terhadap jenis tanah dan angka pori. Namun, konstanta ini akan sangat dipengaruhi oleh derajat kejenuhan dan kondisi *drainage* dari tanah. Untuk keperluan praktis, nilai angka Poisson dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 2. 4 Nilai angka Poisson untuk beberapa jenis material

Jenis	ν
Lempung	0,5
Pasir	0,30-0,35
Batuan	0,15-0,25

Sumber : Srinivasulu (1976 : 39)

2.8 Metode analisa akibat beban dinamis

Dalam perencanaan pondasi mesin, ada 3 metode yang dapat digunakan untuk menghitung amplitudo dan frekuensi (Novak, 1977) yaitu :

1. Metode berdasarkan pegas linear tanpa beban (*Linear Elastic Weightless Spring Method*)
2. Metode berdasarkan teori linear elastis (*Elastic-Half Space*)
3. Metode berdasarkan pendekatan massa yang tergumpal (*Lumped Parameter System*)

2.8.1 Metode *Linear Elastic Weightless Spring Method*

Pada metode ini, tanah dianggap pegas. Redaman dimasukkan sebagai nilai yang belum dicari atau diabaikan. Walaupun redaman tidak terlalu berpengaruh terhadap frekuensi resonansi sistem akan tetapi, redaman memberi pengaruh cukup signifikan pada amplitudo saat terjadi resonansi. Selama zona resonansi dapat dihindarkan dalam perencanaan pondasi, pengaruh redaman pada amplitudo saat frekuensi kerja juga kecil bila dibanding dengan amplitudo yang ada saat resonansi.

2.8.2 Metode *Elastic Half-Space*

Pendekatan yang telah dikembangkan untuk melakukan analisis pondasi mesin-blok terhadap beban dinamis dikenal dengan *elastic-half space*. Pada metode ini, tanah dianggap selalu dalam keadaan elastik, yaitu tanah berada dalam tingkat regangan kecil.

Oleh karena itu, pendekatan ini hanya dapat diaplikasikan pada kasus pondasi yang mengalami amplitudo getaran kecil.

Pendekatan metode *elastic-half space* didasarkan pada asumsi-asumsi :

1. Pondasi bersifat rigid
2. Pondasi berbentuk silindris
3. Dasar pondasi terletak di atas *semiinfinite elastic half space* material
4. Reaksi tanah dasar tidak tergantung pada kedalaman penanaman pondasi
5. Reaksi tanah samping dihasilkan oleh material elastik yang tidak bergantung pada tanah dasar
6. Terjadi ikatan yang kuat (*perfectly bonded*) antara bagian samping pondasi dengan tanah di sekelilingnya.

2.8.3 Metode *Lumped Parameter System*

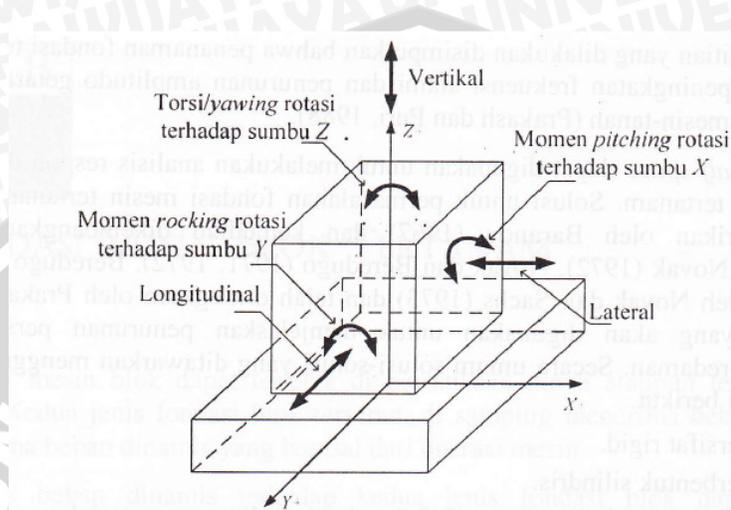
Sistem *lumped parameter system* dapat digunakan untuk menganalisis respon getaran dari pondasi mesin yang terletak pada permukaan tanah (*non-embedded foundation*). Pada sistem ini, pondasi dianggap sebagai pondasi kaku (*rigid*) sehingga hanya mengalami *rigid body motion*. Konsep penting dalam sistem *lumped parameter* adalah pondasi mesin dimodelkan sebagai sistem lumped massa, pegas, dan redaman.

2.9 Pondasi blok sebagai pondasi mesin

Persamaan yang diturunkan pada metode *Elastic Half Space* mengasumsikan bahwa pondasi terletak di atas permukaan tanah dan tidak tertanam. Namun, pada kenyataan yang ada pada lapangan, pondasi mesin selalu dalam keadaan tertanam di dalam tanah. Penanaman ini memberikan pengaruh pada konstanta pegas, faktor redaman dan frekuensi natural sehingga pada akhirnya akan mempengaruhi amplitudo getaran. Sebuah pondasi mesin dianggap sebagai pondasi kaku (*rigid*) sehingga hanya mengalami *rigid body motion* (Irsyam, Sahadewa, & Darjanto, 2012). Jika pondasi tersebut mengalami pembebanan oleh gaya ataupun momen dinamis maka, pondasi tersebut akan memiliki kemungkinan bergetar dalam enam moda yang berbeda meliputi :

- a. Translasi searah sumbu Z (arah vertikal)
- b. Translasi searah sumbu X (horizontal)
- c. Translasi searah sumbu Y (longitudinal)

- d. Rotasi terhadap sumbu X atau *pitching*
- e. Rotasi terhadap sumbu Y atau *rocking*
- f. Rotasi terhadap sumbu Z atau *yawing/torsional*



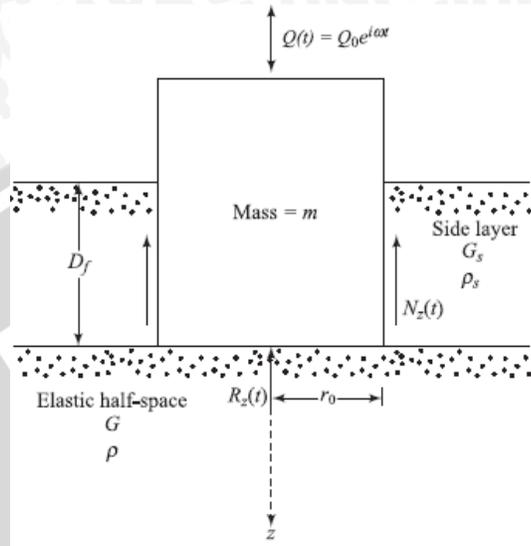
Gambar 2. 9 Enam jenis moda getaran pada pondasi blok (Richart, 1962)

2.10 Analisis dinamis

Adanya aktifitas mesin mengakibatkan adanya gaya tak berimbang. Akibat adanya gaya tak berimbang tersebut, pondasi mesin akan mempunyai enam derajat kebebasan dan frekuensi alami yang masing-masing berhubungan dengan tiap-tiap arah getaran seperti pada penjelasan 2.8.

2.10.1 Analisa vertikal

Respon dinamis vibrasi vertikal kaku silindris telah dipelajari oleh Novak dan Beredugo (1972).



Gambar 2. 10 Pondasi silindris kaku tertanam – vibrasi vertikal

Berdasarkan penurunan rumus (Novak dan Beredugo, 1972) diperoleh konstanta pegas dan koefisien damping sebagai berikut :

$$k_z = G \cdot r_0 \left(C_1 + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot S_1 \right) \tag{2. 19}$$

$$c_z = \frac{G \cdot r_0}{\omega} \left(C_2 + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot S_2 \right) \tag{2. 20}$$

Dapat diasumsikan dengan pendekatan :

$$C_1 = \bar{C}_1 = \text{konstan};$$

$$S_1 = \bar{S}_1 = \text{konstan};$$

$$C_2 = a_0 \cdot \bar{C}_2 \text{ dimana } \bar{C}_2 = \text{konstan};$$

$$\bar{S}_2 = a_0 \cdot \bar{S}_2 \text{ dimana } \bar{S}_2 = \text{konstan};$$

Sehingga, persamaan 2.10 dan 2.11 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$k_z = G \cdot r_0 \left(\bar{C}_1 + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot \bar{S}_1 \right) \tag{2. 21}$$

$$c_z = r_0^2 \sqrt{\rho \cdot G} \left(\bar{C}_2 + \bar{S}_2 \frac{D_f}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot \rho_s}{G \cdot \rho}} \right) \tag{2. 22}$$

Perhitungan Respons Sistem Pondasi

a) Damping Ratio

$$D_z = \left(\frac{1}{2\sqrt{b}} \right) \frac{(\bar{c}_2 + \bar{s}_2 \frac{Df}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{G \rho}})}{\sqrt{\bar{c}_1 + \frac{G_s Df}{G r_0} \bar{s}_1}} \quad (2.23)$$

Dimana : $b = \frac{m}{\rho \cdot r_0^3}$

Harga \bar{c}_1 , \bar{c}_2 , \bar{s}_1 , dan \bar{s}_2 :

Poisson's ratio, μ	\bar{c}_1^a	\bar{c}_2^a	\bar{s}_1^b	\bar{s}_2^b
0.0	3.9	3.5	2.7	6.7
0.25	5.2	5.0	2.7	6.7
0.5	7.5	6.8	2.7	6.7

^a Validity range: $0 \leq a_0 \leq 1.5$

^b Validity range: $0 \leq a_0 \leq 2$

b) Frekuensi Alami Tak Tereadam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (2.24)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (2.25)$$

c) Amplitudo Vibrasi Pada Resonansi

Untuk Constant Force : $A_{z(res)} = \frac{Q_0}{k_z} \frac{1}{2D_z \sqrt{1-2D_z^2}}$ (2.26)

Untuk Rotating Mass : $A_{z(res)} = \frac{m_1 \cdot e}{m} \frac{1}{2D_z \sqrt{1-2D_z^2}}$ (2.27)

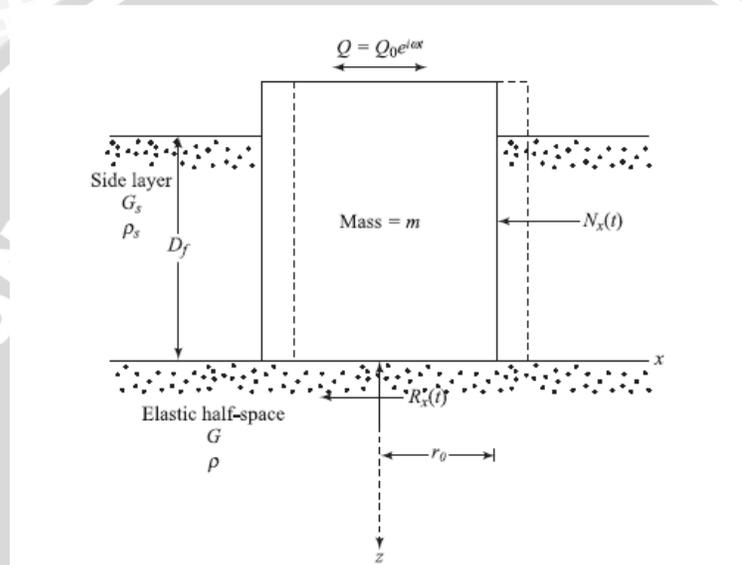
d) Amplitudo selain Pada Frekuensi selain Resonansi

Constant Force: $A_z = \frac{\frac{Q_0}{k_z}}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4D_z^2(\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}}$ (2.28)

$$\text{Rotating Mass : } A_z = \frac{\frac{m_1 \cdot e}{m} \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4D_z^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)}} \quad (2. 29)$$

2.10.2 Analisis horizontal (sliding)

Respon dinamis dari pondasi kaku silindris tertanam terhadap vibrasi horizontal telah dianalisis oleh Novak dan Beredugo (1972). Gambar 2.10 menunjukkan pondasi yang dipengaruhi vibrasi horizontal.



Gambar 2. 11 Pondasi silindris kaku tertanam – vibrasi horizontal

Berdasarkan analisis, diperoleh pegas dan koefisien damping sebagai berikut :

$$k_x = G \cdot r_0 \left(\bar{C}_{x1} + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot \bar{S}_{x1} \right) \quad (2. 30)$$

$$c_x = r_0^2 \sqrt{\rho \cdot G} \left(\bar{C}_{x2} + \bar{S}_{x2} \frac{D_f}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot \rho_s}{G \cdot \rho}} \right) \quad (2. 31)$$

Dengan harga \bar{C}_{x1} , \bar{C}_{x2} , \bar{S}_{x1} , dan \bar{S}_{x2} :

Poisson's ratio μ	Parameter	
0	$\bar{C}_{x1} = 4.3;$	$\bar{C}_{x2} = 2.70$
0.5	$\bar{C}_{x1} = 5.1;$	$\bar{C}_{x2} = 3.15$
0	$\bar{S}_{x1} = 3.6;$	$\bar{S}_{x2} = 8.20$
0.25	$\bar{S}_{x1} = 4.0;$	$\bar{S}_{x2} = 9.10$
0.4	$\bar{S}_{x1} = 4.1;$	$\bar{S}_{x2} = 10.6$

Perhitungan Respon Pondasi

a) Damping Ratio

$$D_x = \frac{c_x}{2\sqrt{k_x \cdot m}} \quad (2.32)$$

b) Frekuensi Alami Tak Tereadam

$$\omega_x = \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad (2.33)$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad (2.34)$$

Setelah ω_x dan D_x dihitung maka, amplitudo vibrasi pondasi dapat dihitung seperti pondasi di atas permukaan tanah.

c) Amplitudo Vibrasi pada saat Resonansi

$$\text{Untuk Constant Force : } A_{x(res)} = \frac{Q_0}{k_x} \frac{1}{2D_x \sqrt{1-2D_x^2}} \quad (2.35)$$

$$\text{Untuk Rotating Mass : } A_{x(res)} = \frac{m_1 \cdot e}{m} \frac{1}{2D_x \sqrt{1-2D_x^2}} \quad (2.36)$$

Dimana :

m_1 = total rotating mass

e = eksentrisitas masing-masing rotating mass

d) Amplitudo Vibrasi pada Frekuensi selain Resonansi

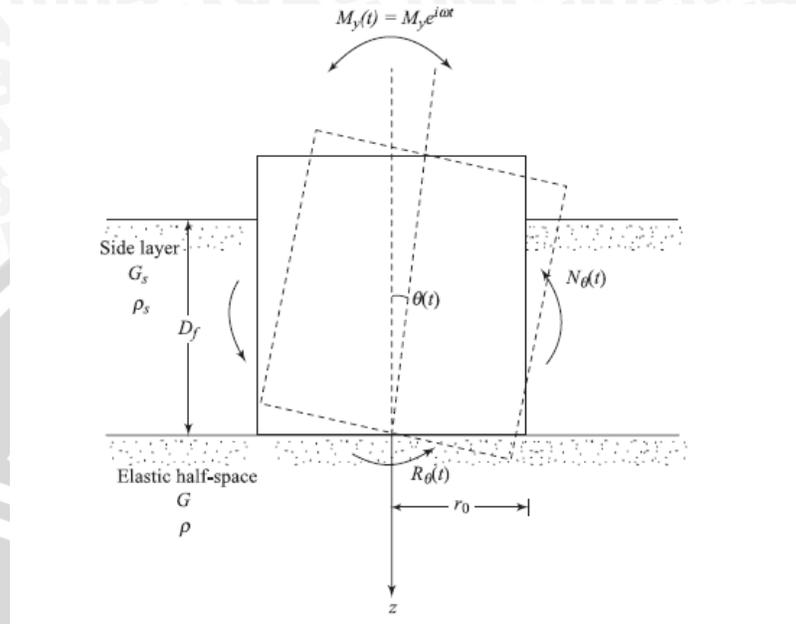
$$\text{Constant Force: } A_x = \frac{\frac{Q_0}{k_x}}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4D_x^2(\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}} \quad (2.37)$$

$$\text{Rotating Mass : } A_x = \frac{\frac{m_1 \cdot e}{m} (\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4D_x^2(\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}} \quad (2.38)$$



2.10.3 Analisis rocking

Gambar 2.9 menunjukkan analisis vibrasi rocking yang telah dilakukan oleh Novak dan Beredugo (1972).



Gambar 2. 12 Pondasi silindris kaku tertanam – vibrasi rocking

Hasil dari analisis didapatkan :

$$k_{\theta} = G \cdot r_0^3 \left(\bar{C}_{\theta 1} + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot \left(\bar{S}_{\theta 1} + \frac{D_f^2}{3 \cdot r_0^2} \cdot \bar{S}_{x1} \right) \right) \tag{2. 39}$$

$$c_{\theta} = r_0^4 \sqrt{\rho} \cdot G \left(\bar{C}_{\theta 2} + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot \left(\bar{S}_{\theta 2} + \frac{D_f^2}{3 \cdot r_0^2} \cdot \bar{S}_{x2} \right) \right) \tag{2. 40}$$

Dengan harga \bar{S}_{x1} , dan \bar{S}_{x2} seperti analisis terhadap vibrasi horizontal:

Poisson's ratio μ	Parameter	
0	$\bar{C}_{x1} = 4.3;$	$\bar{C}_{x2} = 2.70$
0.5	$\bar{C}_{x1} = 5.1;$	$\bar{C}_{x2} = 3.15$
0	$\bar{S}_{x1} = 3.6;$	$\bar{S}_{x2} = 8.20$
0.25	$\bar{S}_{x1} = 4.0;$	$\bar{S}_{x2} = 9.10$
0.4	$\bar{S}_{x1} = 4.1;$	$\bar{S}_{x2} = 10.6$

Untuk $\mu = 0$

$$\bar{C}_{\theta 1} = 2.5 \quad \bar{C}_{\theta 2} = 0.43$$

Untuk sebarang harga μ :

$$\bar{S}_{\theta 1} = 2.5 \quad \bar{S}_{\theta 2} = 1.8$$

a) Frekuensi Alami Tak Tereadam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_0}} \tag{2.41}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega_n \tag{2.42}$$

b) Damping ratio

$$D_\theta = \frac{c_\theta}{2\sqrt{k_\theta \cdot I_0}} \tag{2.43}$$

Dengan momen inersia massa :

$$I_0 = \frac{W}{g} \left(\frac{r_0^2}{4} + \frac{h^2}{3} \right) \tag{2.44}$$

c) Frekuensi Alami Tereadam/Frekuensi Resonansi

$$\text{Untuk Constant Force : } f_m = f_n \sqrt{1 - 2D_\theta^2} \tag{2.45}$$

$$\text{Untuk Rotating Mass : } f_m = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2D_\theta^2}} \tag{2.46}$$



Selanjutnya, amplitudo vibrasi dapat dihitung berdasarkan persamaan pada pondasi di atas tanah

d) Amplitudo Vibrasi pada saat Resonansi

$$\text{Untuk Constant Force : } \theta_{(res)} = \frac{M_y}{k_\theta} \frac{1}{2D_\theta \sqrt{1-2D_\theta^2}} \quad (2.47)$$

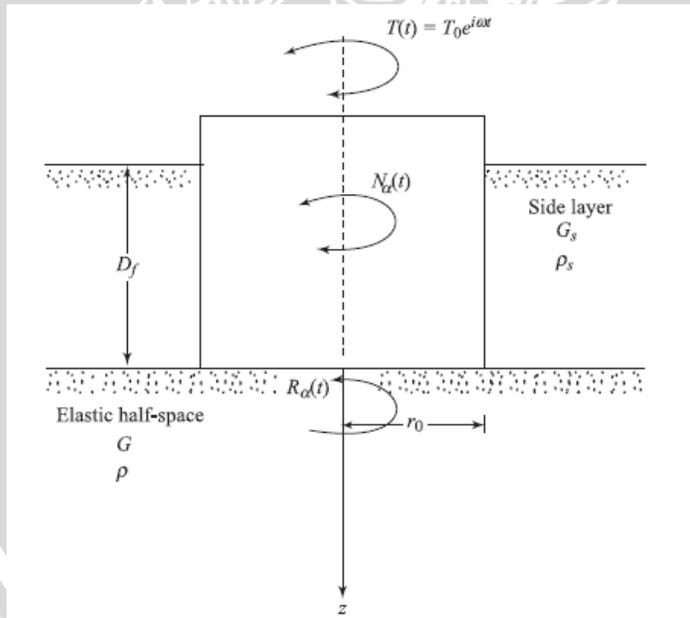
$$\text{Untuk Rotating Mass : } \theta_{(res)} = \frac{m_1 \cdot e_{z1}}{I_0} \frac{1}{2D_\theta \sqrt{1-2D_\theta^2}} \quad (2.48)$$

e) Amplitudo Vibrasi pada Frekuensi selain Resonansi

$$\text{Constant Force: } \theta_{(res)} = \frac{\frac{M_y}{k_\theta}}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4D_\theta^2(\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}} \quad (2.49)$$

$$\text{Rotating Mass : } \theta_{(res)} = \frac{\frac{(\frac{m_1 \cdot e_{z1}}{I_0}) / (\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4D_\theta^2(\frac{\omega^2}{\omega_n^2})}} \quad (2.50)$$

2.10.4 Analisis torsi



Gambar 2.13 Pondasi silindris kaku tertanam – vibrasi torsi

Novak dan Sachs (1973), menghasilkan konstanta pegas dan koefisien damping sebagai berikut :

$$k_a = G \cdot r_0^3 \left(\bar{C}_{a1} + \frac{G_s \cdot D_f}{G \cdot r_0} \cdot \bar{S}_{a1} \right) \quad (2.51)$$

$$c_a = r_0^2 \sqrt{\rho} \cdot G \left(\bar{C}_{a2} + \bar{S}_{a2} \frac{Df}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot \rho_s}{G \cdot \rho}} \right) \quad (2.52)$$

Dengan harga parameter $\bar{C}_{\alpha 1}$, $\bar{C}_{\alpha 2}$, $\bar{S}_{\alpha 1}$, dan $\bar{S}_{\alpha 2}$:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{C}_{\alpha 1} = 4.3 \\ \bar{C}_{\alpha 2} = 0.7 \end{array} \right\} \text{ for } 0 \leq a_0 \leq 2.0$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{S}_{\alpha 1} = 12.4 \\ \bar{S}_{\alpha 2} = 2.0 \end{array} \right\} \text{ for } 0 \leq a_0 \leq 0.2$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{S}_{\alpha 1} = 10.2 \\ \bar{S}_{\alpha 2} = 5.4 \end{array} \right\} \text{ for } 0.2 \leq a_0 \leq 2.0$$

Untuk keperluan praktis, nilai konstanta kekakuan dan redaman ditentukan dengan persamaan-persamaan di bawah ini :

$$k_a = G \cdot r_0^3 \left(4,3 + \frac{G_s \cdot Df}{G \cdot r_0} \cdot 10,2 \right) \quad (2.53)$$

$$c_a = r_0^2 \sqrt{\rho} \cdot G \left(0,7 + 5,4 \frac{Df}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot \rho_s}{G \cdot \rho}} \right) \quad (2.54)$$

Perhitungan Respon Pondasi

a) Damping Ratio

$$D_a = \frac{1}{2\sqrt{B_\alpha}} \frac{\left(\bar{C}_{a2} + \bar{S}_{a2} \frac{Df}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot \rho_s}{G \cdot \rho}} \right)}{\left(\bar{C}_{a1} + \frac{G_s \cdot Df}{G \cdot r_0} \cdot \bar{S}_{a1} \right)} \quad (2.55)$$

Dimana :

$$B_\alpha = \text{mass ratio massa} = \frac{J_{zz}}{\rho \cdot r_0^5}$$

b) Frekuensi Alami Tak Teredam

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_\alpha}{J_{zz}}} \quad (2.56)$$

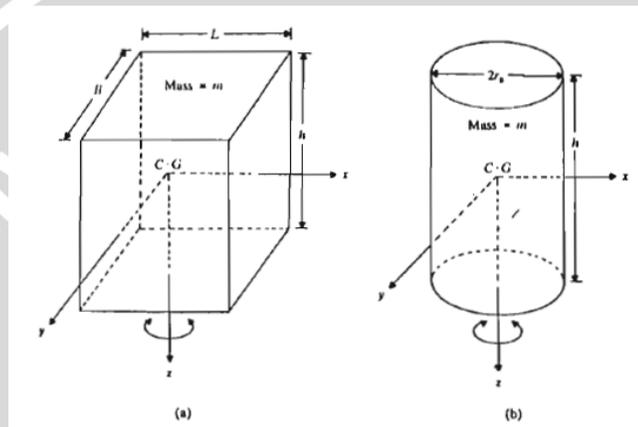
J_{zz} merupakan momen inersia massa terhadap sumbu z.

c) Amplitudo vibrasi dan frekuensi resonansi

Untuk Constant Force :
$$a_{(res)} = \frac{T_0}{k_a} \frac{1}{2D_a \sqrt{1-D_a^2}} \tag{2.57}$$

Untuk Rotating Mass :
$$\alpha_{(res)} = \frac{m_1 e (\frac{x}{2})}{J_{zz}} \frac{1}{2D_a \sqrt{1-D_a^2}} \tag{2.58}$$

Momen inerti massa terhadap sumbu z



Gambar 2.14 Momen Inersia Massa (J_{zz})

(a)
$$J_{zz} = \frac{m}{12} (L^2 + B^2)$$

(b)
$$J_{zz} = \frac{m \cdot r_0^2}{2}$$

2.11 Daya dukung akibat beban dinamis

Dalam analisis daya dukung akibat beban dinamis, ada beberapa faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan seperti besarnya variasi beban, durasi beban, dan respon kecepatan regangan (*strain rate*) tanah selama deformasi.

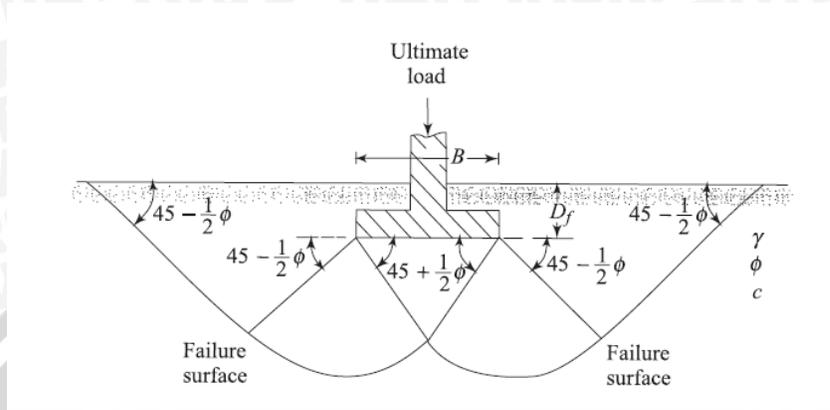
A. Daya dukung tanah pasir

Daya dukung statis untuk pondasi dangkal untuk beban vertikal adalah :

$$q_u = cN_c S_c d_c + qN_q S_q d_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma \tag{2.59}$$

Pada tanah pasir $c = 0$ sehingga :

$$q_u = qN_q S_q d_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma \quad (2.60)$$



Gambar 2.15 Pola Keruntuhan Pondasi Dangkal

Faktor daya dukung :

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.61)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (2.62)$$

Faktor bentuk :

$$S_q = 1 + \left(\frac{B}{L} \right) \tan \phi \quad (2.63)$$

$$S_\gamma = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.64)$$

Faktor kedalaman

$$\text{Untuk } \frac{D_f}{B} \leq 1 \quad d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \left(\frac{D_f}{B} \right) \quad (2.65)$$

$$d_\gamma = 1$$

$$\text{Untuk } \frac{D_f}{B} > 1 \quad d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right) \quad (2.66)$$

$$d_\gamma = 1$$

ϕ (deg)	N_q	N_γ	ϕ (deg)	N_q	N_γ
0	1.00	0.00	26	11.85	12.54
1	1.09	0.07	27	13.20	14.47
2	1.20	0.15	28	14.72	16.72
3	1.31	0.24	29	16.44	19.34
4	1.43	0.34	30	18.40	22.40
5	1.57	0.45	31	20.63	25.99
6	1.72	0.57	32	23.18	30.22
7	1.88	0.71	33	26.09	35.19
8	2.06	0.86	34	29.44	41.06
9	2.25	1.03	35	33.30	48.03
10	2.47	1.22	36	37.75	56.31
11	2.71	1.44	37	42.92	66.19
12	2.97	1.69	38	48.93	78.03
13	3.26	1.97	39	55.96	92.25
14	3.59	2.29	40	64.20	109.41
15	3.94	2.65	41	73.90	130.22
16	4.34	3.06	42	85.38	155.55
17	4.77	3.53	43	99.02	186.54
18	5.26	4.07	44	115.31	224.64
19	5.80	4.68	45	134.88	271.76
20	6.40	5.39	46	158.51	330.35
21	7.07	6.20	47	187.21	403.67
22	7.82	7.13	48	222.31	496.01
23	8.66	8.20	49	265.51	613.16
24	9.60	9.44	50	319.07	762.89
25	10.66	10.88			

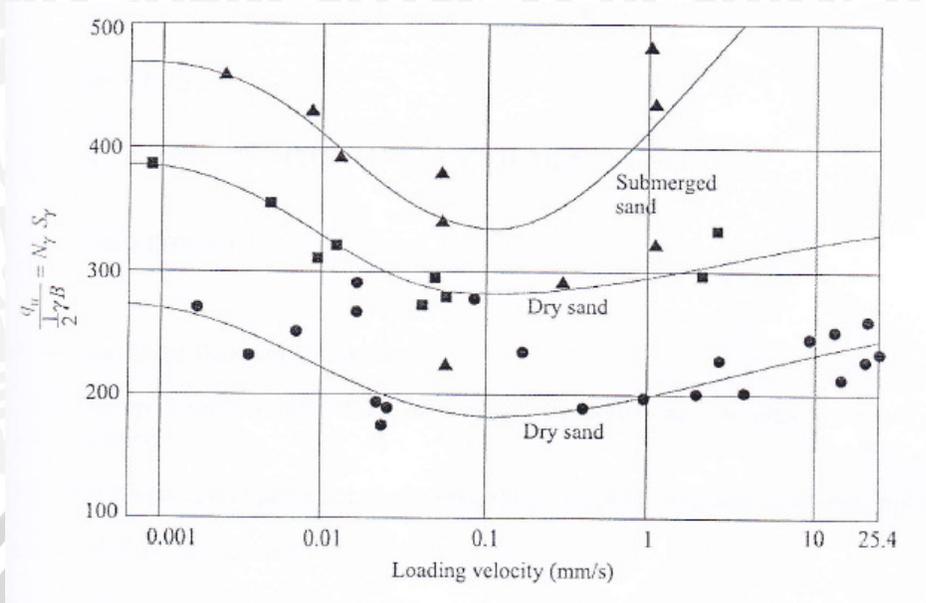
* After Vesic (1973)

Sumber : Das dan Ramana : 2011

Untuk daya dukung dinamis pada tanah pasir, Vesic, Banks, dan Woodward (1965) melakukan penelitian dengan menggunakan model pondasi berdiameter 4 in (101,6 mm). pondasi berada di atas tanah pasir padat kering jenuh ($D_f = 0$). Kecepatan pembebanan 10^{-5} sampai 10 in/sec. Untuk $D_f = 0$, $q = 0$, dan $d_\gamma = 1$ maka ;

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad \text{atau} \quad \frac{q_u}{\frac{1}{2} \gamma \cdot B} = N_\gamma \cdot S_\gamma$$

Variasi daya dukung dari statis sampai kejut menurut penelitian tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



Dari hasil tersebut, diperoleh kesimpulan umum sebagai berikut :

1. Pondasi diatas pasir dan percepatan amplitudo maksimum ≤ 13 g maka pondasi mengalami keruntuhan *general shear*.
2. Pondasi diatas pasir dan percepatan amplitudo maksimum > 13 g maka pondasi mengalami keruntuhan *Punching shear*.
3. Restrain dalam efek overburden pressure selama pembebanan dinamis menyebabkan *punching shear*.
4. $q_{u \text{ dyn}}$ dapat diperkirakan dengan harga $\phi_{\text{dyn}} = \phi - 2$
5. Daya dukung mengalami peningkatan bersamaan dengan peningkatan kecepatan pembebanan.
6. Kenaikan daya dukung secara cepat terjadi karena berkembangnya *excess pore water pressure*
7. Pondasi yang terletak di atas tanah lepas terjadi *liquefaction*

B. Daya dukung tanah lempung

Untuk rumus yang digunakan untuk menghitung daya dukung akibat beban dinamis adalah sebagai berikut :

untuk $D_f / B \leq 1$, menggunakan rumus,

$$q_u = 5,14 cu \left[1 + 0,1946 \left(\frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0,4 \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] + q \quad (2. 67)$$

untuk $D_f/B > 1$, menggunakan rumus,

$$q_u = 5,14 cu \left[1 + 0,1946 \left(\frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0,4 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right) \right] + q \quad (2. 68)$$

Untuk memperkirakan daya dukung dinamis perlu dipertimbangkan efek strain rate pada penentuan c_u . Berbeda dengan pasir, pada saat menerima beban dinamis, kohesi pada saat kondisi undrained meningkat. Carroll (1963) mengusulkan :

$$\frac{c_{u_{dyn}}}{c_{u_{stat}}} = 1,5 \quad (2. 69)$$

2.12 Penurunan

Penurunan yang terjadi pada pondasi mesin bisa berupa penurunan akibat beban dinamis berupa getaran akibat adanya aktifitas mesin maupun akibat berat sendiri bangunan mesin atau disebut juga beban statis. Walaupun frekuensi operasi mesin pada bangunan *clarifier* cukup rendah, penurunan terhadap beban dinamis juga tetap diperhitungkan untuk keamanan.

2.12.1 Penurunan akibat beban statis

Penurunan akibat beban statis hanya dipengaruhi oleh berat bangunan dan mesin yang didukungnya. Perhitungan penurunan ini merupakan penurunan akibat konsolidasi primer dan sekunder yang terjadi pada tanah. Analisis perhitungan yang digunakan sama dengan analisis penurunan akibat beban statis pada pondasi blok statis.

2.12.2 Penurunan akibat beban dinamis

Dalam *Technical Engineering and Design Guides as Adapted From The US Army Corps of Engineer, No.9* yang berjudul *Settlement Analysis* penurunan akibat beban dinamis dapat dianalisa dengan menggunakan beberapa langkah-langkah perhitungan berikut ini :

Pertama- tama, nilai kepadatan relatif (D_r) tiap lapisan harus diketahui. Nilai kepadatan relatif tanah (D_r) dapat ditentukan berdasarkan tabel 2.5 berikut :

Tabel 2. 5 Penjelasan Mengenai Deposit Tanah

Kepadatan Relatif	Penjelasan Mengenai Deposit Tanah
0–15	Sangat lepas
15–50	Lepas
50–70	Sedang
70–85	Padat
85–100	Sangat Padat

Sumber: Braja M. Das,1998

Selanjutnya, dihitung frekuensi getaran :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{60} \tag{2. 70}$$

Percepatan getaran dalam g pada dasar pondasi

$$\alpha_0 = \frac{\omega^2 \cdot A_{max}}{12 \cdot (32.2)} \tag{2. 71}$$

Dengan A_{max} = amplitudo maksimum

Percepatan getaran pada pertengahan lapisan :

$$d_m > R ; a_j = a_0 \left(\frac{R}{d_m}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2. 72}$$

$$d_m \leq R ; a_j = a_0 \tag{2. 73}$$

dengan:

d_m = jarak dari dasar pondasi ke pertengahan lapisan tanah (ft)

R = jari-jari ekuivalen pondasi (ft)

$$R = \sqrt{\frac{L \cdot B}{\pi}}$$

Percepatan kritis pada tiap lapisan:

$$\alpha_{kritis} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{D_m}{100}\right)}{\beta v} \tag{2. 74}$$

dengan:

D_m = kepadatan relatif pada percepatan = 0 (%)

β_v = koefisien pemadatan getaran

β_v = tergantung pada kadar air W :

$$W < 5\% \quad \rightarrow \beta_v = 0.2 + 0.12 W$$

$$5 \leq \beta_v \leq 18\% \quad \rightarrow \beta_v = 0.77 + 0.006 W$$

β_v menurun jika kadar air lebih besar 18%

Estimasi kepadatan relatif akhir:

$$a_j > a_{kritis} \quad D_{rf} = 100 (1 - e^{-\beta_v(a_{kritis}+a)}) \quad (2.75)$$

$$a_j \leq a_{kritis} \quad D_{rf} = D_m \quad (2.76)$$

Perubahan kepadatan relatif:

$$\Delta D_r = D_{rf} - D_m$$

Penurunan yang terjadi:

$$\rho_v = 0.0025 \frac{\Delta D_r}{100} \gamma_{do} \cdot H \quad (2.77)$$

dengan:

γ_{do} = berat jenis tanah tiap lapisan (lbs/ft³)

H = kedalaman relatif (ft)

Apabila percepatan yang terjadi kurang dari percepatan kritis, kepadatan relatif akhir sama dengan kepadatan relatif awal sehingga tidak terjadi penurunan pada tanah.

2.13 Peredam getaran untuk pondasi mesin

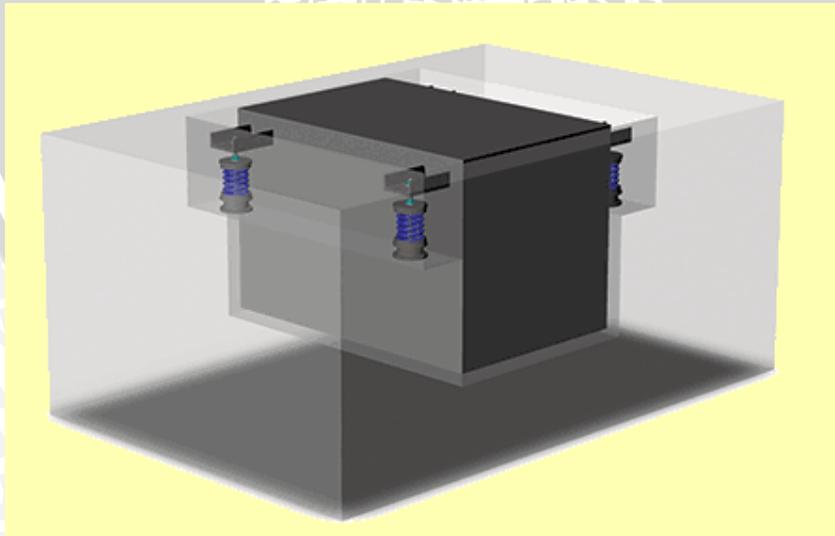
Pondasi terisolasi biasanya digunakan untuk melindungi mesin atau peralatan dari getaran yang masuk dan beban kejut. Sedangkan, massa inersia biasanya digunakan untuk menambah massa ke mesin untuk mengontrol gerakan dan untuk meningkatkan redaman pada area sekitar mesin.

Kumparan pegas (*Coil Spring Mount*), elastomer peredam (*Elastomeric Isolation Elements*), material peredam pondasi (*Foundation Isolation Material*), dan peningkat getaran (*Vibration Mounts*) adalah beberapa alat atau material yang biasa digunakan sebagai elemen peredam di bawah pondasi blok.

Pondasi terisolasi dan inersia massa digunakan untuk :

1. Meningkatkan kekakuan mesin
 2. Mengurangi gerakan mesin dan mengurangi distribusi beban
 3. Memungkinkan penggunaan kekakuan sistem yang lebih rendah
 4. Meningkatkan massa redaman
 5. Menurunkan pusat gravitasi untuk meningkatkan stabilitas
 6. Meningkatkan tapak mesin (*foot print*) dari mesin agar dapat menyebar keluar area beban.
- a. Kumparan pegas (*Coil Spring Mount*)

Kumparan pegas (*Coil Spring Mount*) dirancang untuk isolator pondasi maupun aplikasi struktur beton lainnya. Frekuensi alami yang dimiliki biasanya berkisar antara 2.5 sampai 6 Hz untuk peredam getaran dan beban kejut efektif.

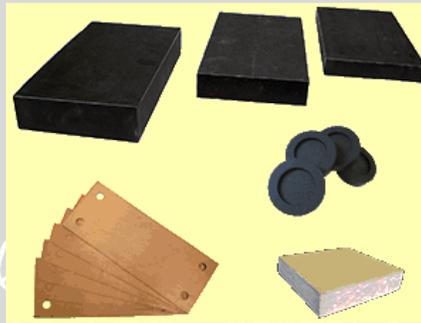


Gambar 2. 16 *Coil Spring Mounts*

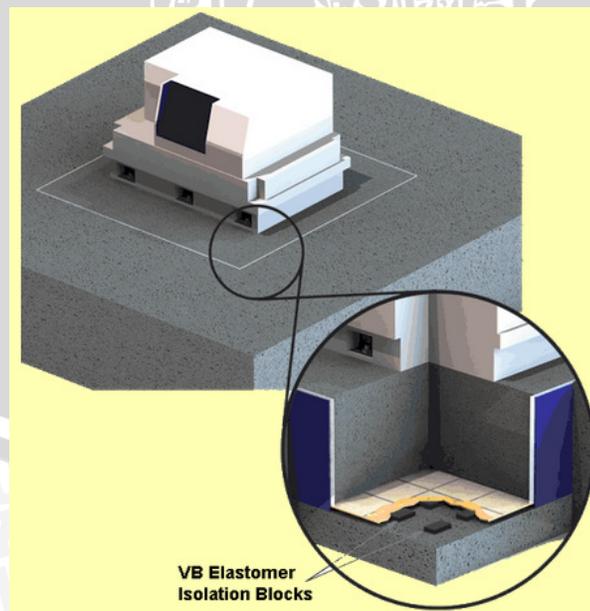
b. Bantalan Elastomer (*Elastomeric Cushions and Pads*)

Bantalan elastomer digunakan di bawah slab beton dan pondasi terisolasi untuk mendukung peralatan yang sensitif dan yang membutuhkan perlindungan dari getaran dan beban kejut. Bantalan ini juga melindungi daerah sekitarnya dari getaran dan beban kejut.

Blok peredam elastomer memiliki berat sendiri berkisar antara 8 sampai dengan 47 lbs dan dapat dikonfigurasi untuk memiliki frekuensi dinamis alami setara dengan 7,5 Hz.



Gambar 2. 17 Bantalan Elastomer



Gambar 2. 18 Pemasangan elastomer pada pondasi blok

c. Material peredam (*Foundation Isolation Material*)

Material peredam dapat berupa busa isolator dasar. Pemasangannya dapat dilihat pada gambar sebagai berikut :



Gambar 2. 19 Pemasangan material peredam



Gambar 2. 20 Tahap akhir pemasangan material peredam



Gambar 2. 21 Hasil akhir mesin dan pondasi yang telah terpasang

