

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Tanah adalah pendukung pondasi bangunan, atau bahan konstruksi dari bangunan itu sendiri. Dilihat dari bangunan yang dibuat diatas atau dibawah permukaan tanah, maka harus dibuat pondasi yang dapat memikul beban bangunan atau gaya yang bekerja pada bangunan itu. Pondasi adalah salah satu dari konstruksi bangunan yang terletak dibagian bawah sebuah konstruksi, pondasi mempunyai peran penting terhadap sebuah bangunan, dimana pondasi menanggung semua beban konstruksi bagian atas ke lapisan tanah yang berada di bagian bawahnya (*Sardjono,1988*).

Pondasi sebagai struktur bawah dapat di bagi menjadi dua yaitu pondasi dalam dan pondasi dangkal. Pemilihan tipe pondasi tergantung kepada struktur atau beban yang di atasnya termasuk dengan beban ringan atau beban berat dan bergantung terhadap kondisi tanah sekitarnya. Maka untuk beban ringan atau beban relatif kecil dan secara langsung menerima beban bangunan biasanya digunakan pondasi dangkal dan untuk beban bangunan yang berat dan besar serta meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang sangat dalam digunakan pondasi dalam.

Pondasi mesin merupakan pondasi yang digunakan untuk menopang beban dinamis berupa getaran yang dihasilkan oleh mesin yang berada diatas pondasi tersebut. Untuk pondasi yang menopang beban dinamis digunakan perhitungan yang jelas berbeda dengan pondasi yang hanya menopang beban statis, dimana

harus memperhatikan adanya beban dinamis akibat kerja mesin selain beban statis yang ada. Desain pondasi mesin yang menggunakan tipe blok didasarkan atas dua keadaan yaitu pondasi blok tidak tertanam dan pondasi blok tertanam. Pada penelitian ini akan menganalisa pondasi blok tertanam dengan variasi panjang, lebar pondasi dan kedalaman tertanam.

Pondasi mesin berbeda dengan pondasi pada umumnya, pondasi ini cukup rumit karena mencakup analisis geoteknik, analisis struktur dan analisis dinamik. Pada analisa geoteknik sangat dibutuhkan untuk pondasi mesin ini, dikarenakan beban yang akan diterima tanah relatif naik turun.

Pondasi mesin membutuhkan beberapa pertimbangan, karena pondasi ini memberikan beban dinamik kepada tanah yaitu beban ketika mesin dalam keadaan beroperasi dan beban statis seperti berat pondasi sendiri, dan berat mesin. Dan pada umumnya beban dinamik sendiri lebih kecil daripada beban statisnya sendiri. Selain itu pada pondasi mesin sendiri sangat terpengaruhi dengan dimensi pondasi dan berat pondasi sendiri. Terdapat persyaratan dimana beban pondasi sendiri harus 2-3 kali lebih berat dari berat mesin, dan berat pondasi juga harus 3-5 kali lipat berat mesin ketika dalam keadaan aktif (*Suresh C.Arya,1979*).

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas maka rumusan masalah adalah menganalisa beban centrifugal machine terhadap pondasi blok berdasarkan :

1. Bagaimana Nilai izin amplitudo pada pondasi blok ?
2. Bagaimana nilai redaman terhadap kecepatan operasi mesin?

### **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Pondasi yang akan dianalisa adalah pondasi tipe blok.
2. Mesin centrifugal yang dibahas adalah mesin yang memiliki frekuensi sangat tinggi  $> 1000$  rpm.
3. Hanya meninjau nilai izin amplitudo, frekuensi natural dan redaman.
4. Tidak meninjau perhitungan daya dukung tanah.

### **1.4 Tujuan Penulisan**

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penulisan skripsi ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh beban centrifugal machine terhadap pondasi blok.
2. Untuk mengetahui nilai izin amplitudo dan frekuensi natural yang ditimbulkan oleh mesin pondasi tipe blok.
3. Untuk mengetahui nilai redaman terhadap kecepatan operasi mesin.

### **1.5 Manfaat Penulisan**

Manfaat dari penulisan skripsi adalah :

1. Dapat mengetahui pengaruh beban mesin terhadap pondasi blok.
2. Mengetahui nilai izin amplitudo dan frekuensi natural yang di akibatkan oleh mesin.
3. Dapat mengetahui nilai redaman tanah pada kecepatan operasi mesin.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan ini menggunakan metode studi kepustakaan atau *studi literatur*. Studi literatur bisa didapat dari berbagai sumber baik dari jurnal, buku, internet, dokumentasi dan pustaka. Metode studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelola bahan penulisan (*Zed,2008 dan Nursalam,2016*).

Metode penulisan ini terdapat uraian tentang metode yang digunakan, sumber data, kriteria pengumpulan data, langkah atau strategi pengumpulan data dan analisis data. Tahapan penulisan dimulai dari analisis hasil berisi uraian yang lengkap tentang cara menganalisis konsep yang diteliti.

Untuk memahami dengan jelas tentang pembahasan dan penulisan skripsi ini, maka dalam penulisan harus tertata dengan baik dan benar. Penulisan skripsi ini terdiri dari 5 Bab dimana setiap Bab terdapat beberapa sub-Bab pembahasan. Adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut :

- **BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini berisikan tentang gambar umum dari permasalahan yang akan dibahas. Dalam pendahuluan skripsi terdapat beberapa sub-Bab, yaitu latar belakang, rumusan masalah, dan batasan masalah.

- **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas tentang ringkasan tertulis atau pendapat para ahli dari jurnal, buku dan dokumen lain yang mendeskripsikan teori serta informasi baik yang lalu maupun saat ini yang berkaitan dengan pondasi mesin tipe blok.

- **BAB III : ANALISA DATA**

Bab ini berisikan tentang alur evaluasi data, mulai dari tahap awal pengumpulan data sampai mendapatkan hasil analisa perhitungan dan pembahasan.

- **BAB IV : EVALUASI DATA**

Bab ini akan membahas tentang hasil evaluasi data yang telah dilakukan untuk menghasilkan suatu kesimpulan.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisikan tentang kesimpulan yang didapat dari analisa beban centrifugal machine terhadap pondasi blok dan melampirkan saran dari penulisan selama skripsi ini.

- **DAFTAR PUSTAKA**

Daftar pustaka yang berisikan berbagai sumber bacaan dan tulisan ilmiah untuk dijadikan dasar informasi yang menjadi rujukan dalam melakukan penelitian.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pondasi Mesin**

Pondasi adalah suatu konstruksi pada bagian dasar struktur atau bangunan (*sub-structure*) yang berfungsi meneruskan beban dari bagian atas struktur atau bangunan (*upper structure*) ke lapisan tanah dibawahnya tanpa mengakibatkan keruntuhan geser tanah dan penurunan (*settlement*) tanah atau pondasi yang berlebihan (*DR.Ir. Suhardjito, 1998*).

Perencanaan pondasi mesin memiliki permasalahan yang lebih kompleks dibandingkan dengan pondasi yang harus menahan beban statis (yang berasal dari berat mesin dan berat pondasi). Perancangan pondasi mesin harus mempertimbangkan beban dinamis (yang berasal dari getaran mesin) disamping beban statis. Dimana harus mengetahui bagaimana cara beban di transmisikan dari mesin, dan harus mengetahui masalah yang timbul akibat perilaku dinamika dari pondasi dan di bawah pondasi.

Dalam analisis pondasi mesin, metode analisis yang umum digunakan menganggap tanah masih berperilaku elastis. Asumsi tersebut sangat beralasan mengingat tingkat getaran yang terjadi masih berada dalam rentang regangan kecil (*small strain*). Respon getaran dari sistem pondasi mesin tanah diwakili oleh parameter frekuensi alami sistem dan amplitudo getaran. Kedua besaran tersebut dianggap sebagai parameter terpenting yang harus ditentukan dalam perencanaan pondasi mesin. Selanjutnya, energi gelombang akibat beban dinamis yang dirambatkan melalui tanah juga harus dibatasi agar tidak menimbulkan efek buruk

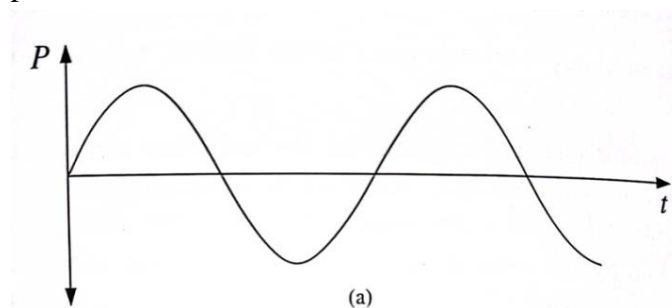
terhadap lingkungan sekitarnya. Idealnya semakin kecil amplitudo getaran maka akan semakin baik desain pondasi mesin tersebut.

## 2.2 Tipe dari Pondasi Mesin

Dalam mendesain pondasi mesin terdiri dari 2 type mesin yaitu *centrifugal machine* dan *reciprocating machine*. *Centrifugal machine* atau *rotating* terjadi pada semua peralatan atau equipment yang berputar seperti pompa, motor, electric generator, semua jenis turbine baik steam turbine maupun gas turbine. Sedangkan *reciprocating* yang berasal dari kata *reciprocate* yang artinya membalas atau tepatnya bergerak maju-mundur pada satu garis lurus, prinsip kerja ini terjadi pada semua (*engine*) baik diesel engine maupun otto engine ataupun gas engine.

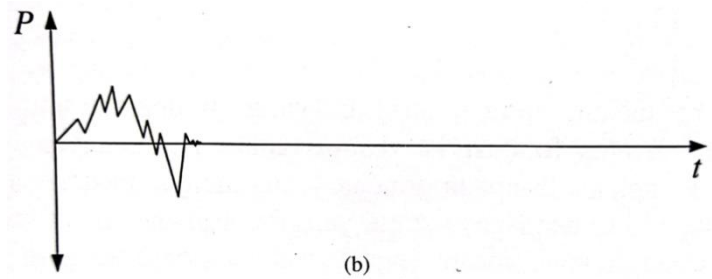
Tipe pondasi mesin berdasarkan pola gaya yang dihasilkan oleh mesin di atas pondasi, (*Prakash dan Puri, 1988*) dibagi menjadi tiga kategori, yaitu :

- a. Mesin bolak-balik (*reciprocating machines*) seperti mesin uap, motor bakar, dan kompresor. Karakteristik gaya dinamis dari mesin ini terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 2.1.



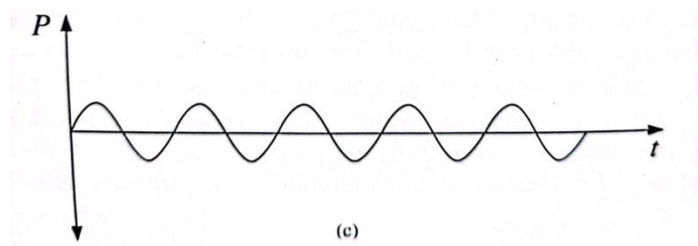
Gambar 2.1 Karakteristik gaya dinamis dari mesin bolak-balik  
(Sumber : *Prakash dan Puri, 1988*)

- b. Mesin impact (*impact machines*), sebagai contoh mesin tempa. Gambar 2.2 memperlihatkan karakteristik gaya dinamis dari mesin impact terhadap waktu.



Gambar 2.2 Karakteristik gaya dinamis dari mesin impact  
(Sumber : Prakash dan Puri,1988)

- c. Mesin rotasi (*rotating or centrifugal machines*) seperti turbin, turbogenerators, dan rotating compressors. Karakteristik gaya dinamis dari mesin rotasi terhadap waktu dapat dilihat dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Karakteristik gaya dinamis dari mesin rotasi  
(Sumber : Prakash dan Puri,1988)

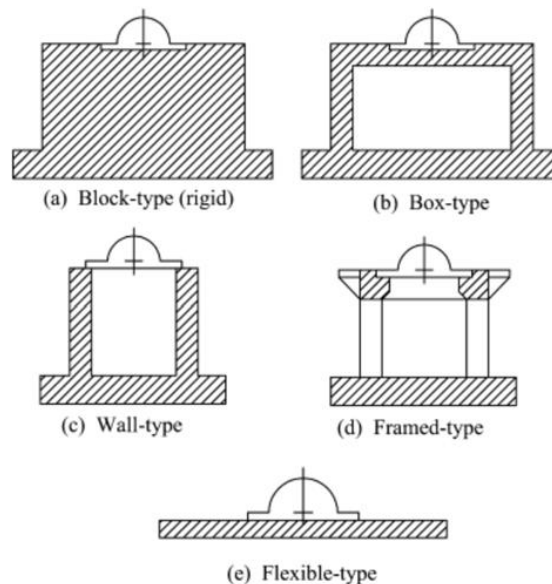
Tipe dari pondasi mesin dapat dibedakan dengan beberapa klasifikasi, dimana masing-masing klasifikasi mempunyai type-typenya sendiri. Ketiga klasifikasi tersebut adalah :

1. Klasifikasi pondasi didasarkan atas kriteria perancangan :
  - a. Memproduksi gaya bentur atau tumbuk (*impact forces*) seperti : gaya tumbuk dan gaya tekan.
  - b. Memproduksi gaya periodik seperti : *recciprocating engines* (kompresor)
  - c. Mesin-mesin dengan kecepatan tinggi seperti : turbines, rotary compressor.
  - d. Mesin tambahan lainnya.



2. Klasifikasi pondasi didasarkan atas bentuk struktur :

- a. Pondasi type blok terdiri dari dudukan dari beton, dimana mesin akan diletakkan.
- b. Pondasi type box atau caisson terdiri dari blok beton yang berlubang ditengahnya dan menahan mesin diatasnya.
- c. Pondasi type dinding terdiri dari sepanjang dinding yang menahan mesin diatasnya.
- d. Pondasi type rangka terdiri dari kolom vertikal menahan konstruksi rangka horizontal diatasnya, dimana mesin akan diletakkan.
- e. Nonrigid or flexible type.



Gambar 2.4 Type Pondasi Mesin

(Sumber : Kasewara, 1998 :394)

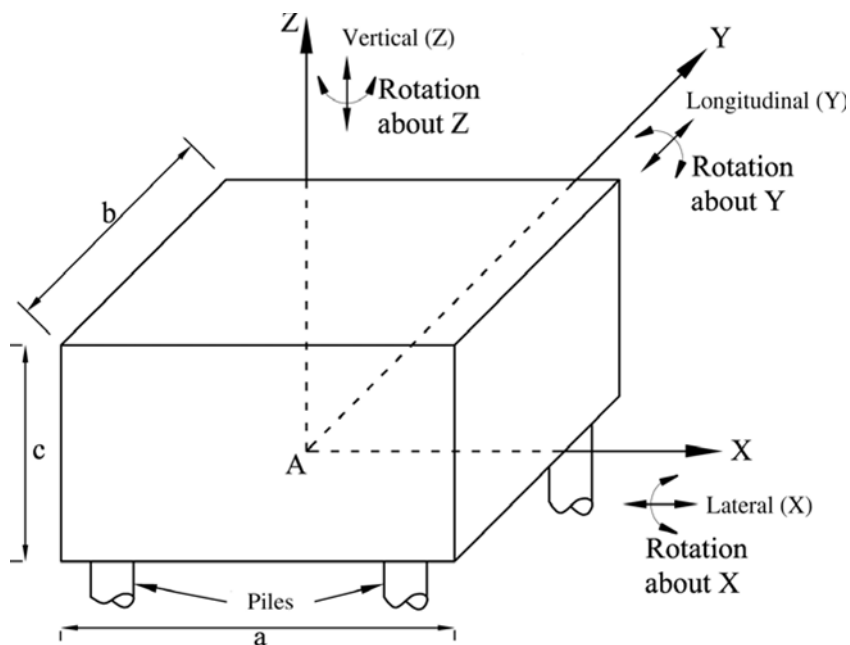
Sebagian besar pondasi tipe blok sering digunakan untuk mesin yang menghasilkan gaya periodik dan impulsif. Untuk mesin berputar yang memiliki *Revolutions Per Minute* (RPM) atau kecepatan yang tinggi. (Rao, Kameswara,1998 :394).

### 3. Derajat kebebasan pada pondasi mesin

Akibat gaya dan moment yang terjadi oleh beban dinamis, maka pondasi tipe blok memiliki 6 arah getaran yaitu :

1. Translasi arah sumbu z (vertikal).
2. Translasi arah sumbu x (lateral).
3. Translasi arah sumbu y (longitudinal)
4. Rotasi pada sumbu x (pitching).
5. Rotasi pada sumbu y (rocking)
6. Rotasi pada sumbu z (yawing/torsi).

Setiap arah getaran pada pondasi blok dapat dibagi dalam enam bentuk *displacement* secara terpisah dan memiliki enam bentuk derajat kebebasan dengan enam bentuk natural frekuensi.



Gambar 2.5 Derajat Kebebasan Pondasi Blok  
(Sumber :Rao,Kameswara 1998:410)

Jadi, pada pondasi tipe blok memiliki empat model getaran yang terjadi yaitu dua mode tunggal (vertikal dan yawing) dan dua mode couple (rocking+lateral dan pitching+longitudinal).

4. Berdasarkan frekuensi operasi dari mesin, maka mesin dapat dibagi dalam tiga kategori :

- a. Frekuensi rendah sampai menengah 0-500 rpm.
- b. Frekuensi menengah sampai tinggi 300-1000 rpm.
- c. Frekuensi sangat tinggi  $> 1000$  rpm.

Pondasi mesin harus memenuhi kriteria desain baik terhadap beban statis maupun beban dinamis. Dari sisi desain maka syarat-syarat berikut ini harus dipenuhi (*Srinivasulu dan Vaidyanathan, 1977*).

- a. Pondasi harus mampu menerima beban statis dan dinamis tanpa mengalami keruntuhan.
- b. Penurunan tanah (*settlement*) yang terjadi harus berada dalam batas yang diizinkan.
- c. Resonansi pondasi mesin harus dihindari. Oleh karena itu, frekuensi alami sistem dari pondasi mesin tanah harus lebih tinggi ataupun lebih rendah dibandingkan frekuensi operasi mesin. Untuk mesin berfrekuensi rendah maka frekuensi alami sistem pondasi-mesin-tanah harus cukup tinggi dan berlaku sebaliknya.
- d. Untuk menghindari resonansi harmonik pada frekuensi yang lebih tinggi maka frekuensi alami sistem pondasi mesin tanah tidak boleh berupa kalipatan bilangan bulat frekuensi operasi mesin.

- e. Amplitudo yang terjadi pada saat mesin bekerja harus berada dalam rentang nilai yang diizinkan. Batasan nilai tersebut, pada umumnya ditentukan oleh pembuat mesin.
- f. Setiap bagian mesin yang menghasilkan gerak rotasi maupun bolak-balik harus diseimbangkan (*balanced*) sebaik mungkin untuk meminimalkan gaya dan momen tidak seimbang (*unbalanced force* dan *unbalanced moment*). Hal ini menjadi kewajiban pihak pembuat mesin.
- g. Amplitudo getaran yang dihasilkan mesin tidak boleh memberikan gangguan pada manusia, peralatan industri lainnya, ataupun struktur bangunan disekitarnya.
- h. Letak pusat gravitasi (*center of gravity/COG*) gabungan mesin dan pondasi sedapat mungkin simetris terhadap bidang kontak pondasi dengan tanah untuk menghindari timbulnya momen.
- i. Untuk pondasi tiang maka penonjolan tiang di atas permukaan tanah sebisa mungkin dihindari untuk mencegah terjadinya perpindahan (*displacement*) horizontal dan rotasi yang besar.
- j. Pipa-pipa yang ditanamkan dalam pondasi harus diisolasi sebaik mungkin.
- k. Muka air tanah diusahakan setidaknya seperempat kali lebar pondasi di bawah dasar pondasi. Hal ini untuk mencegah perambatan gelombang, khususnya gelombang tekan, dimana air tanah merupakan media yang baik bagi perambatan gelombang tekan.

1. Pondasi harus dilindungi dari oli mesin dengan menggunakan lapisan tahan asam (*acid resistencde coating*) ataupun perlindungan kimia lainnya yang sesuai.

(Prakash, 1981), juga menyatakan bahwa pondasi mesin harus memenuhi kriteria desain berdasarkan beban statis maupun beban dinamis. Kriteria desain pondasi mesin berdasarkan beban statis dan beban dinamis sebagai berikut (Prakash,1981).

Untuk beban statis :

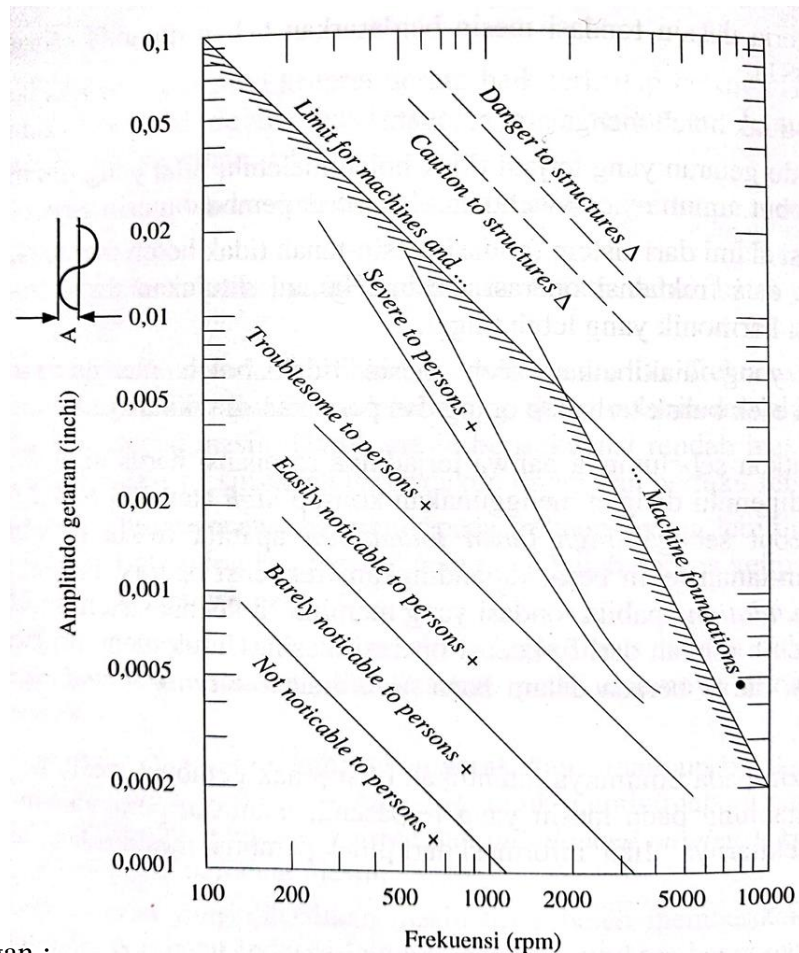
- a. Pondasi harus aman terhadap keruntuhan geser.
- b. Pondasi tidak boleh mengalami penurunan tanah yang berlebihan.

Untuk beban dinamis :

- a. Fondasi tidak boleh terjadi resonansi, yaitu frekuensi natural sistem tanah pondasi mesin tidak boleh sama dengan frekuensi operasi mesin.
- b. Amplitudo getaran yang terjadi tidak boleh melebihi nilai yang diizinkan. Nilai izin tersebut, umumnya disyaratkan oleh pihak pembuat mesin.
- c. Frekuensi alami dari sistem pondasi mesin tanah tidak boleh merupakan kelipatan bulat dari frekuensi operasi mesin. Hal ini ditunjukan untuk menghindari resonansi harmonik yang lebih tinggi.
- d. Getaran yang diakibatkan oleh mesin tidak boleh mengganggu ataupun memberi efek buruk terhadap orang dan peralatan disekitarnya.

Kegagalan pondasi mesin terjadi, jika getaran telah melampaui batas yang telah ditentukan. Batasan pondasi mesin dapat diketahui pada amplitudo dan

kecepatan dari getaran yang terjadi pada operasi kerja mesin. Berikut adalah grafik yang berisi batasan-batasan amplitudo pada pondasi mesin.



Keterangan :

- + Dari Meiher dan Meister (1931)-(steady state vibrations)
- Dari Rausch (1943)-(steady state vibrations)
- Δ Dari Crandell (1949)-(due to blasting)

Gambar 2.6 Batasan Amplitudo Vertikal  
(Sumber :Richart, 1962)

Amplitudo izin atau nilai izin umumnya ditentukan oleh pihak pembuat mesin dimana nilai tersebut bergantung pada mesin yang terpasang, manusia, peralatan industri, dan struktur sekitarnya. Jika informasi dari pihak pembuat mesin tidak menyertakan nilai amplitudo izin maka gambar 2.6 dapat digunakan sebagai

acuan desain awal. Garis yang diarsir dalam gambar tersebut menunjukkan nilai batas untuk keamanan bukan merupakan nilai batas untuk operasi.

*Barkan (1962)*, mengusulkan nilai amplitudo izin berdasarkan penelitiannya terhadap operasi mesin. Nilai-nilai tersebut dapat dilihat di Tabel 2.1.

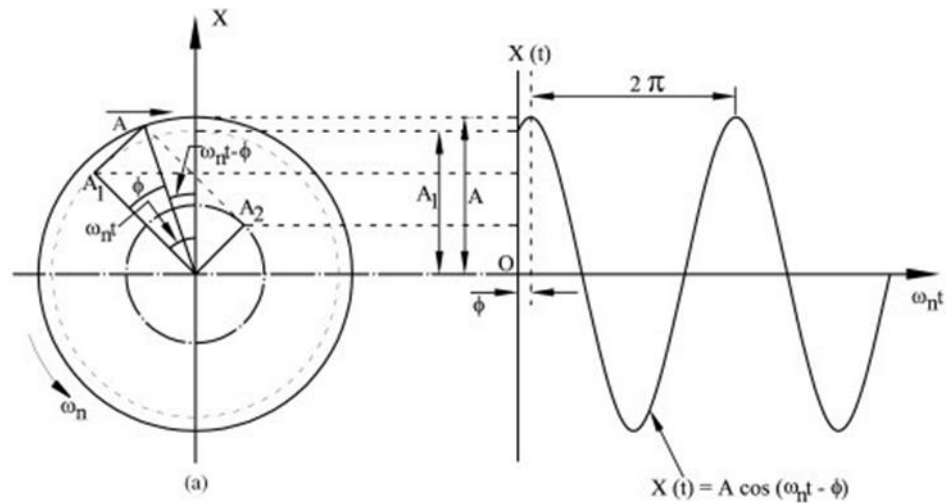
Tabel 2.1 Nilai amplitudo izin untuk beberapa jenis mesin

| Jenis                     | Amplitudo izin |
|---------------------------|----------------|
| Mesin berfrekuensi rendah | 0,02-0,025     |
| Mesin <i>hammer</i>       | 0,1-0,12       |
| Mesin berfrekuensi tinggi |                |
| 3000 rpm                  |                |
| Getaran vertikal          | 0,002-0,003    |
| Getaran horisontal        | 0,004-0,005    |
| 1500 rpm                  |                |
| Getaran vertikal          | 0,004-0,006    |
| Getaran horisontal        | 0,007-0,009    |

(Sumber :*Barkan,1962*)

### 2.3 Teori Getaran Mesin

Pondasi mesin yang merupakan bagian dari pondasi bebas dinamis maka tidak lepas dari teori mengenai getaran harmonik. Getaran harmonik didefinisikan sebagai pemindahan bolak balik suatu titik didalam suatu garis sedemikian rupa sehingga percepatan dari titik tersebut proporsional terhadap jarak dari suatu posisi setimbang dan selalu mengarah menuju posisi setimbang tersebut. Hal ini digambarkan pada gambar dibawah ini.



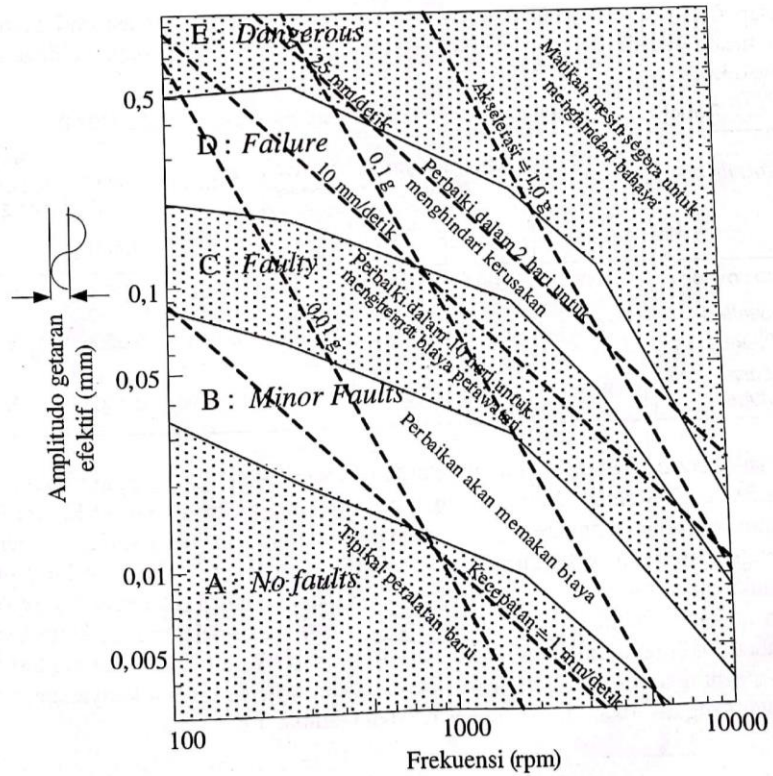
Gambar 2.7 Kurva Getaran Harmonik

(Sumber :Rao, Kasewara, 1998 :422)

Jika suatu sistem massa-pegas digetarkan oleh suatu gaya external sehingga mengalami getaran harmonik, kemudian gaya external tersebut dihilangkan maka sistem akan bergetar secara harmonik terus menerus dengan amplitudo dan frekuensi getaran yang sama. Getaran tersebut akan berkurang sedikit demi sedikit yang pada akhirnya, akan berhenti jika pada sistem tersebut terdapat peredam yang berfungsi sebagai pereduksi getaran.

Amplitudo izin untuk mesin rotasi dapat diperoleh dengan menggunakan konsep faktor servis (*service factor*) yang diusulkan oleh Blake (1964), sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 2.8 dan Tabel 2.2 Pada dasarnya, faktor servis digunakan sebagai indikator tingkat kepentingan sebuah mesin terhadap fungsi utama pabrik. Oleh karena itu, semakin tinggi nilai faktor servis sebuah mesin maka semakin penting keberadaan mesin tersebut. Gambar 2.8 merupakan diagram amplitudo terhadap frekuensi yang menunjukkan lima kriteria operasi mesin, yaitu dari kriteria A sampai E. Gambar tersebut juga dilengkapi dengan rekomendasi untuk setiap kriteria.





Gambar 2.8 Kriteria getaran untuk mesin rotasi  
(Sumber :Blake,1964)

Tabel 2.2 Nilai faktor servis (Blake,1964)

| Jenis mesin   | Faktor servis |
|---|---------------|
| <i>Centrifuge, stiff-shaft, multistage centrifugal pump</i> | 2             |
| <i>Miscellaneous equipment, characteristic unknown</i>      | 2             |
| <i>Single-stage centrifugal pump, electric motor, fan</i>   | 1             |
| <i>Turbine, turbogenerator, centrifugal compressor</i>      | 1,6           |
| <i>Typical chemical processing equipment, noncritical</i>   | 1             |
| <i>Centrifuge, shaft-suspended, on shaft near basket</i>    | 0,5           |
| <i>Centrifuge, link-suspended, slung</i>                    | 0,3           |

(Sumber :Blake,1964)

Amplitudo getaran efektif adalah amplitudo yang terjadi dikali dengan faktor servis. Nilai faktor servis di atas untuk peralatan yang dibaut. Jika tidak dibaut maka faktor servis dikalikan lagi dengan 0,4. Konsep faktor servis dapat digunakan untuk mengevaluasi operasi dari berbagai jenis mesin rotasi. Beberapa contoh penggunaan faktor servis dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Contoh penggunaan faktor servis berdasarkan *Blake (1964)*.

| Jenis mesin                      | Frekuensi mesin<br>(rpm) | Amplitudo yang terjadi |        | Faktor servis | Amplitudo efektif |        | Kasus (Gambar 1.5) |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|---------------|-------------------|--------|--------------------|
|                                  |                          | (inci)                 | (mm)   |               | (inci)            | (mm)   |                    |
| <i>Electric motor</i>            | 3600                     | 0,002                  | 0,0508 | 1             | 0,002             | 0,0508 | D                  |
| <i>Stiff-shafted centrifuge</i>  | 1000                     | 0,007                  | 0,1778 | 2             | 0,014             | 0,3556 | E                  |
| <i>Link-suspended centrifuge</i> | 950                      | 0,0025                 | 0,0635 | 0,3           | 0,00075           | 0,1905 | B                  |

(Sumber :Blake,1964)

Peraturan mengenai nilai getaran izin yang telah dikeluarkan di Indonesia bersumber dari Menteri Negara Lingkungan Hidup (KEP-49/MENLH/11/1996). Peraturan tersebut mengatur permasalahan getaran izin berdasarkan beberapa sumber getaran, yaitu getaran mekanik, seismik, dan kejut. Dalam hal ini getaran yang diakibatkan oleh sarana dan peralatan kegiatan manusia dikategorikan sebagai getaran mekanik. Nilai getaran izin akibat operasi mesin (getaran mekanik) yang disyaratkan oleh peraturan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4. Peraturan tersebut juga mencantumkan nilai getaran izin berdasarkan kriteria

tingkat kenyamanan dan kesehatan yang disajikan dalam Tabel 2.5 dan Gambar

2.9.

Tabel 2.4 Baku tingkat getaran mekanik berdasarkan dampak kerusakan (KEP-49/MENLH/11/1996)

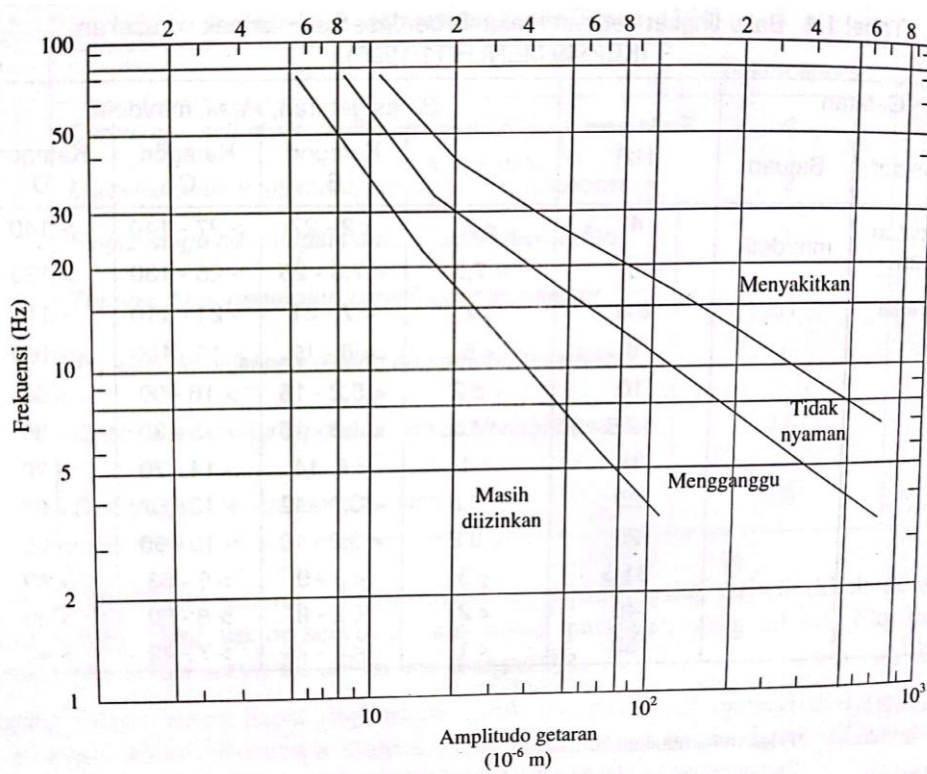
| Getaran           |          | Frekuensi (Hz) | Batas getaran, <i>Peak</i> , mm/detik |            |            |            |
|-------------------|----------|----------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| Parameter         | Satuan   |                | 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       |            |            |

(Sumber :KEP-49/MENLH/11/1996)

Tabel 2.5 Baku tingkat getaran mekanik untuk kenyamanan dan kesehatan (KEP-49/MENLH/11/1996)

| 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        |

(Sumber :KEP-49/MENLH/11/1996)



Gambar 2.9 Grafik baku tingkat getaran mekanik untuk kenyamanan dan kesehatan (KEP-49/MENLH/11/1996)  
(Sumber : (KEP-49/MENLH/11/1996))

(Richart,1962) menjabarkan beban dinamis yang terjadi pada mesin dengan gerakan harmonis sebagai berikut :

$$Q = Q_o \sin \omega t$$

Dimana :  $Q_o$  adalah konstanta atau fungsi dari frekuensi rotasi  $\omega$  (rad/sec).

Frekuensinya tergantung pada gaya yang diberikan oleh :

$$Q_o = m_e e \omega^2 = m_e e 4 \pi^2 f^2$$

Dimana :  $m_e$  adalah eksentrisitas masa.

$e$  adalah eksentrisitas jari-jari dari pusat rotasi terhadap pusat gravitasi rotasi masa.

$\omega$  frekuensi angular (rad/sec) dan

$f$  frekuensi operasi (cycles/sec)

Untuk mesin rotasi pada bagian bergerak, secara teori tidak menghasilkan gaya yang tak seimbang selama putarannya. Tetapi, dalam praktiknya gaya yang tak seimbang selalu ada dan besarnya dipengaruhi oleh prosedur desain, manufaktur, instalasi, dan perawatannya. Eksesifnya getaran pada mesin rotari dan pondasinya terjadi, menolong mereduksi gaya yang tak seimbang.

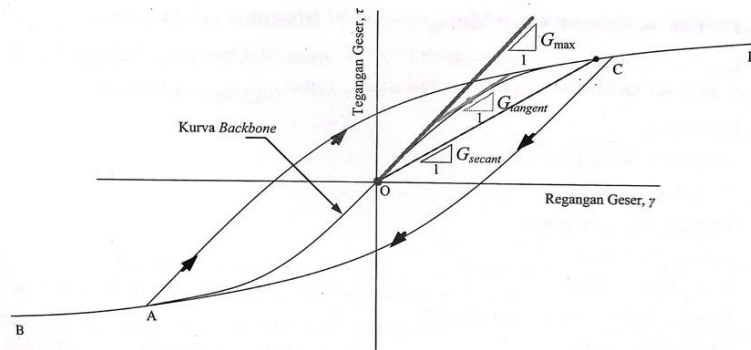
## **2.4 Redaman Tanah**

Tanah dapat dianggap memiliki perilaku elastic sempurna dalam rentang regangan amplitudo yang cukup rendah. Diluar hal tersebut, perilaku tanah menjadi inelastis. Perilaku inelastis tanah dalam menerima beban siklis ditunjukkan dengan terjadinya disipasi energi redaman tanah (*soil damping*). Energi yang terdisipasi akan berubah bentuk menjadi energi lain, misalnya berubah menjadi energi panas, energi bunyi, maupun perpindahan permanen.

Secara umum, redaman yang terjadi dikategorikan menjadi dua jenis redaman, yaitu redaman material atau internal (*material damping*) dan redaman geometrik atau dispersi (*geometrical damping*).

### **2.4.1 Redaman Material atau Internal**

Redaman material berkaitan dengan penyerapan energi oleh massa tanah. Terjadinya disipasi energi pada saat menerima beban siklis dapat dijelaskan menggunakan Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tipikal kurva hysteresis tegangan-regangan  
(Sumber : Idriss,., dkk,1978)

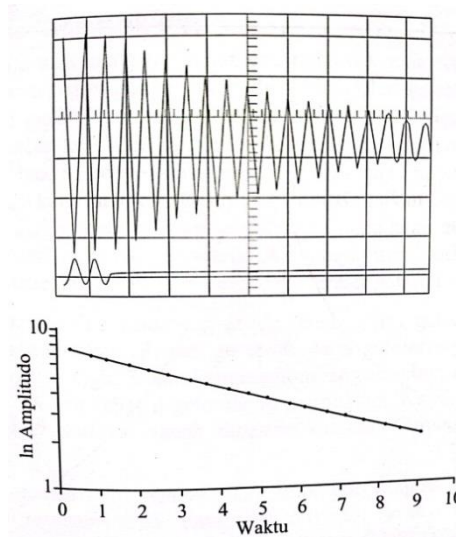
Pada gambar tersebut terlihat bahwa kurva *unloading* dalam *loop* akan selalu berada di bawah kurva *loading*. Luas area di antara kurva *loading-unloading* sebanding dengan besarnya energi yang terdisipasi.

Redaman material dalam tanah dapat juga didefinisikan sebagai *specific damping capacity* yang merupakan perbandingan dari energi yang terendam dalam satu siklus getaran dengan energi potensial pada amplitudo maksimum. Harga *specific damping capacity* dapat dihitung menggunakan kurva *hysteretic* tegangan geser-regangan geser yang akan dijelaskan pada bagian di bawah ini.

Beberapa metode dapat digunakan untuk memperoleh nilai redaman material tanah, diantaranya adalah :

- a. *Decay curve (resonant column test)*.

Metode *decay curve* dilakukan dengan menghilangkan beban siklis pada uji *resonant column* setelah kondisi resonansi *steady-state* tercapai. Selanjutnya, sampel tanah akan mengalami getaran bebas. Dalam kondisi tersebut, amplitudo getaran akan mengalami penurunan seperti terlihat pada (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Tipikal kurva amplitudo-time decay  
(Sumber :Hardi, 1965)

b. *Response curve.*

*Response curva* pada sistem berderajat kebebasan tunggal dengan constant excitation (Gambar 2.12) dapat digunakan untuk menentukan redaman material dengan cara mengukur lebar relatif kurva ini. Untuk melakukan hal tersebut, diperlukan tiga titik yang terdapat pada *response curva*, yaitu  $f_{max-\gamma_{max}}$ ,  $f_{1-\gamma_1}$  dan  $f_{2-\gamma_2}$ . Biasanya nilai  $\gamma_1$  ditentukan dengan  $\gamma_2$ . *Logarithmic decrement* diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini (Canales,1980).

Dimana :

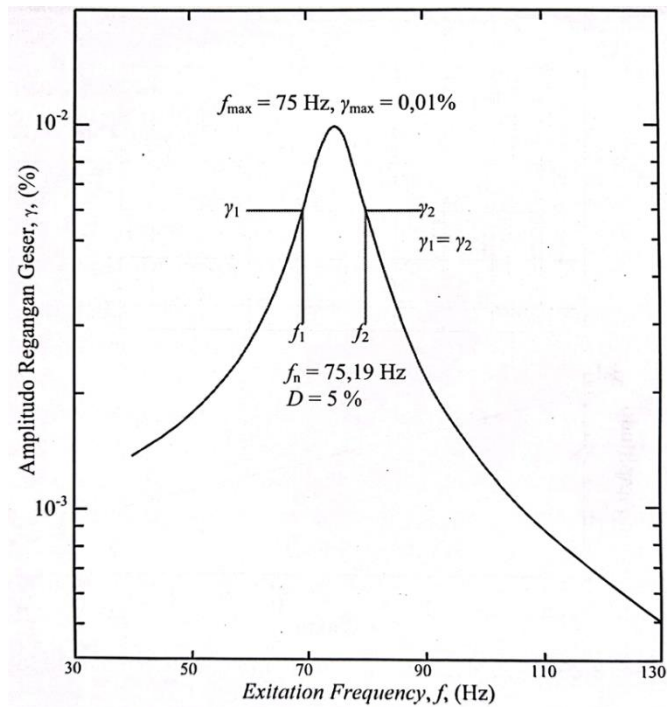
$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_{max}^2} \sqrt{\frac{\gamma^2}{\gamma_{max}^2 - \gamma^2}} \sqrt{\frac{1 - 2D^2}{1 - D^2}}$$

$f$  : Excitation Frequency (Hz)

$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ : Amplitudo Regangan Geser (%)

$D$  : Rasio Redaman





Gambar 2.12 Tipikal response curve  
(Sumber :Canales, 1980)

c. Kurva *hysteretic* tegangan geser-regangan geser (*cyclic triaxial compression test*).

Pada dasarnya, pengukuran redaman material dengan kurva *hysteretic* tegangang geser-regangan geser dilakukan dengan jalan mengukur input energi pada saat resonansi. Penentuan redaman dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut ini (Drnevich dkk,1978).

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{A_1}{A_2}$$

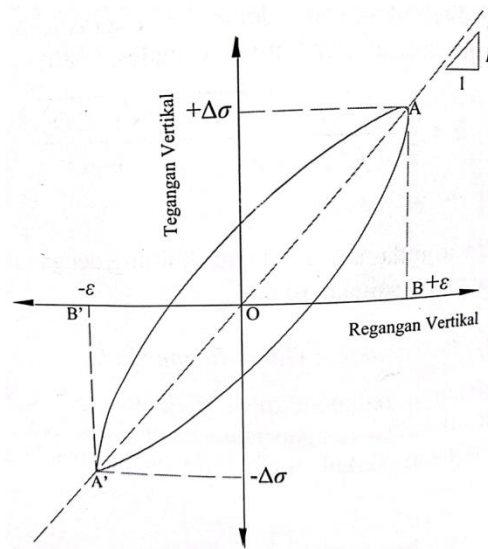
Dengan :

$A_1$  : Luas *hystresis loop*.

$A_2$  : Luas Segitiga OAB dan OA'B (Gambar 2.11).



Dimana  $A_1$  adalah luas *hysteresis loop* dan  $A_2$  adalah luas segitiga OAB dan OA'B'' (Gambar 2.13).  $A_1$  menggambarkan total energi yang hilang sedangkan  $A_2$  merupakan energi regangan pada saat perpindahan maksimum.



Gambar 2.13 Hysteresis stress-strain untuk mengukur redaman material  
(Sumber :Silver dan Park, 1975)

#### 2.4.2 Redaman Geometrik atau Disoersi

Energi yang dihasilkan oleh sebuah getaran dirambatkan dalam tanah melalui gelombang P, S, dan R. Ketiga jenis gelombang tersebut akan tersebar ke dalam tanah secara radial dari sumber getaran. Dengan demikian maka media penyebaran setiap gelombang tersebut akan semakin membesar sehingga kepadatan energi setiap gelombang akan berkurang dengan bertambahnya jarak dari sumber getaran. Kehilangan kepadatan energi tersebut dapat dikategorikan sebagai redaman geometrik. Akibatnya, amplitudo perpindahan juga berkurang dengan membesarnya jarak terhadap sumber getaran. Beberapa gelombang pada tanah, yaitu gelombang badan yang terdiri dari gelombang tekan (P) dan geser (S)

serta gelombang permukaan yang berupa gelombang *Reyleigh*. Selain ketiga gelombang tersebut, terdapat gelombang *love* yang dikategorikan sebagai gelombang permukaan. Karakteristik perambatan setiap gelombang tersebut pada tanah dapat dilihat dari Gambar 2.15 dan Gambar 2.16.

Kasus redaman geometrik ini menyebabkan amplitudo yang memiliki nilai terbatas pada saat terjadi resonansi. Pada umumnya, redaman geometrik besarnya sekitar tiga kali redaman material. Nilai redaman geometrik dalam analisis pondasi mesin dapat diperoleh melalui solusi model *lumped parameter*.

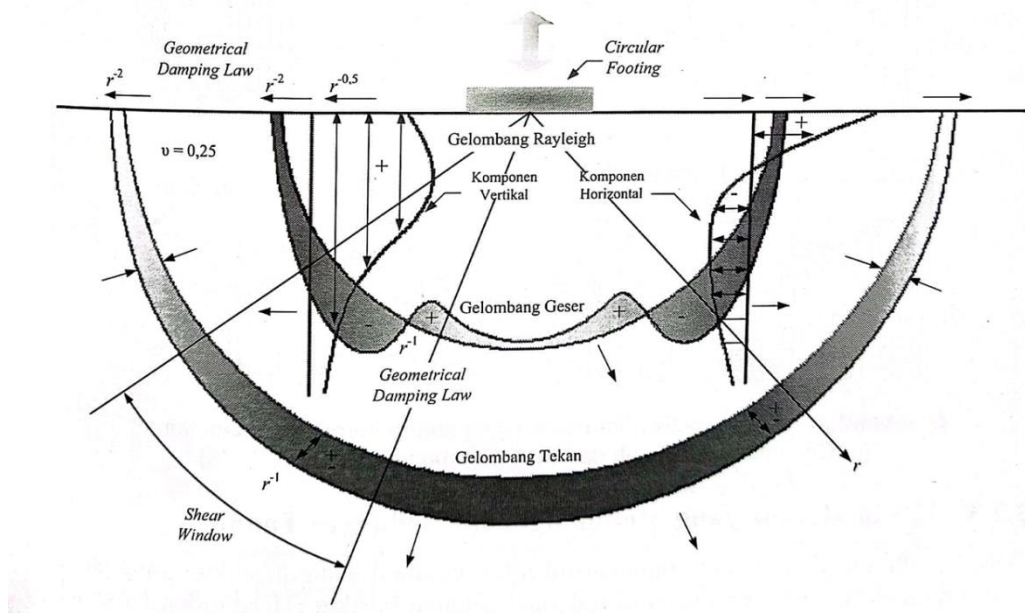
Metode *lumped parameter system* merupakan hasil penelitian dan pengembangan dari metode *Elastic Half-Space*, dimana untuk mendapatkan harga suatu parameter dengan menggunakan cara atau rumus dari teori *Elastic Half-Space*. Teori *lump parameter system* adalah sistem yang digunakan untuk memperkaku blok pondasi dengan menggunakan massa, pegas dan dashpot. Sistem ini menerapkan semua komponen massa, pegas dan redaman. Metode ini dikembangkan oleh *Lysmer dan Richart (1966)* yang bersumber dari "*Dynamic Boussinesq Problems*". Metode ini dikembangkan untuk pondasi lingkaran dengan radius  $r_0$ . Dimana pondasi berada diatas tanah (tidak tertanam). Dalam teori *lumped parameter system*, respon dinamis tanah terhadap pondasi dan beban dinamis dapat dimodelkan sebagai:

- Pegas/spring dengan harga kekakuan "k"
- Dashpot/damping/redaman dengan harga koefisien damping "c"

Material karet telah digunakan sebagai material isolasi getaran selama lebih dari satu abad. Perkembangan yang terbesar pada isolator karet terjadi karena

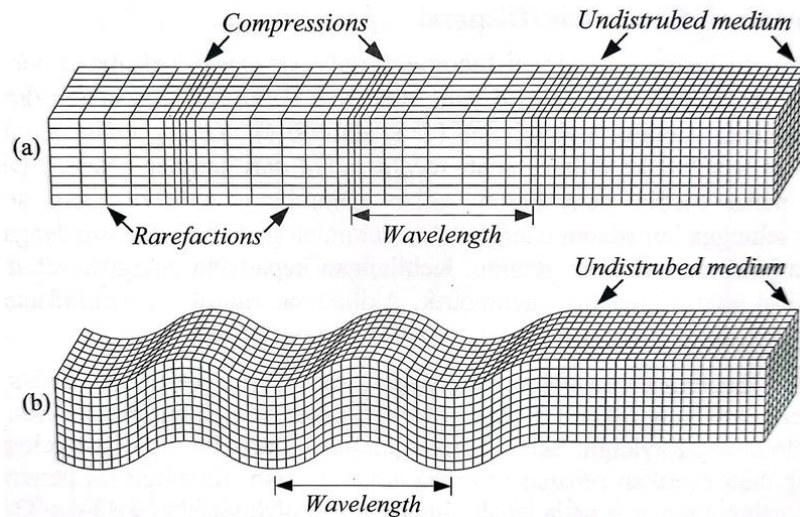
penemuan teknik penggabungan metal dengan karet melalui proses vulkanisasi, sehingga dimungkinkan membuat unit isolator dengan dimensi dan karakteristik yang diinginkan yang dapat menerima beban tekan, tarik dan geser. Penambahan karet atau bantalan karet pada pondasi mesin dapat digunakan dan membantu karena bantalan karet memiliki efek redaman dan dapat mengurangi pembesaran resonansi, meskipun begitu, menggunakan nilai maksimum sebesar 10 sebagai pembesaran resonansi.

Model pegas dan damping tersebut bisa untuk memodelkan baik respons vertikal, horizontal, torsi, maupun rocking. Berikut adalah pemodelan sistem pondasi mesin dan tanah pada metode Lumped Parameter System.

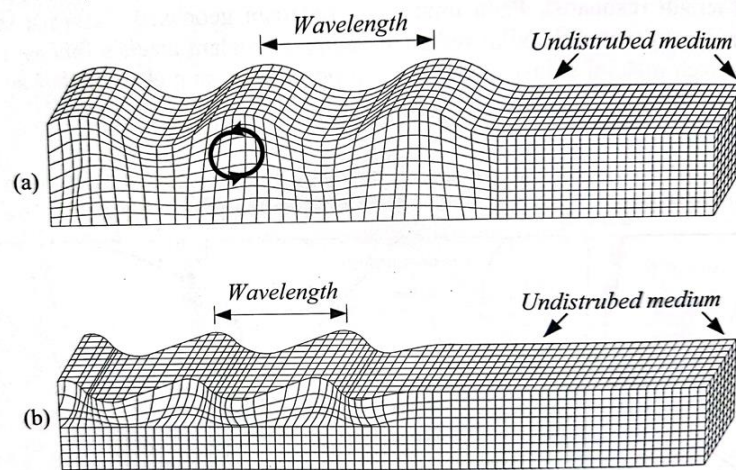


Gambar 2.14 Distribusi perpindahan gelombang yang berasal dari pondasi blok sirkuler.

(Sumber : Woods, 1968)



Gambar 2.15 Karakteristik perambatan gelombang badan pada tanah (a) Gelombang P dan (b) Gelombang S.  
(Sumber :Bolt, 1976)



Gambar 2.16 Karakteristik perambatan gelombang badan pada tanah (a) Gelombang Rayleigh dan (b) Gelombang Love.  
(Sumber :Bolt, 1976)

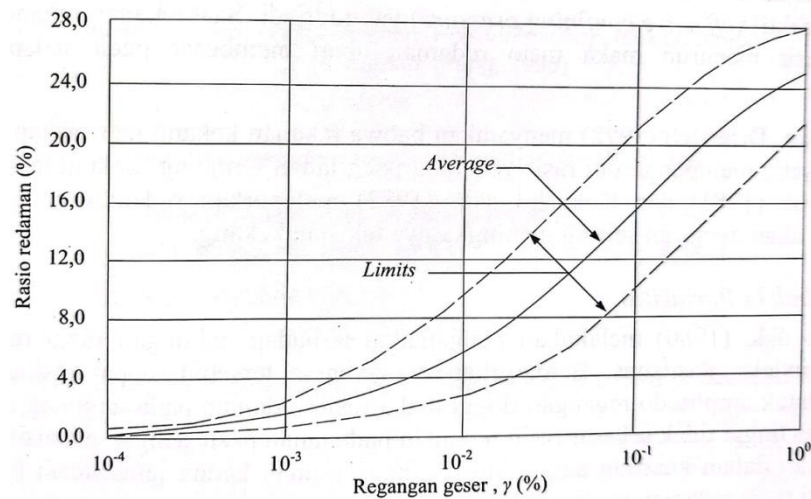
### 2.4.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Redaman Tanah

Beberapa faktor dianggap mempengaruhi nilai redaman. Namun, faktor yang paling penting dalam mempengaruhi nilai redaman sebagai berikut (*Hardin dan Drnevich, 1972*)

- a. Tingkat regangan (*strain level*)
- b. Tekanan kekang (*confining pressure*)
- c. Indeks Plastisitas
- d. Angka pori

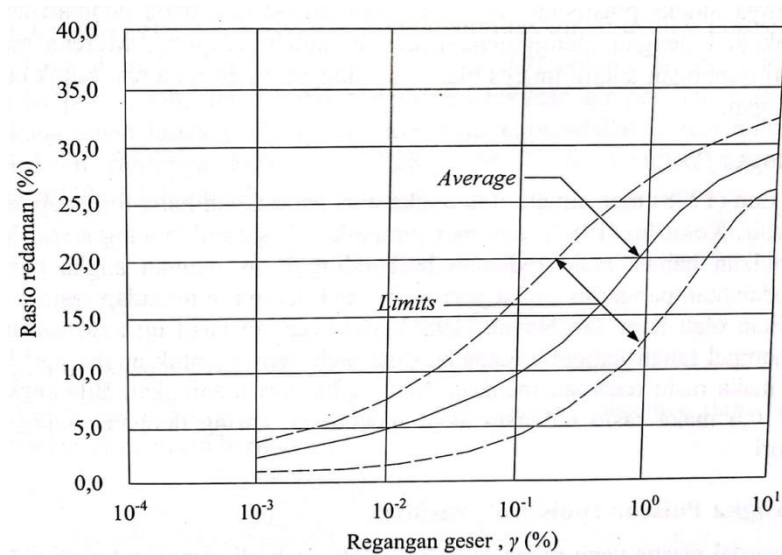
a. Tingkat Regangan

*Hall dan Richart (1963)* serta *Hardin (1965)* menyampaikan hasil penelitian mereka bahwa redaman tanah pasir akan meningkat seiring dengan meningkatnya amplitudo regangan geser yang terjadi. Sedangkan pengaruh tingkat regangan pada tanah lempung serupa dengan yang terjadi pada tanah pasir. Gambar 2.17 dan Gambar 2.18 secara berturut-turut memperlihatkan hubungan antara rasio redaman (*damping ratio*) dengan tingkat regangan pada tanah pasir dan tanah lempung.



Gambar 2.17 Grafik rasio redaman terhadap regangan geser untuk tanah pasir.

(Sumber Seed dan Idriss, 1970)



Gambar 2.18 Grafik rasio redaman terhadap regangan geser untuk tanah lempung.  
(Sumber Seed dan Idriss, 1970)

Nilai redaman akan mengalami peningkatan pesat ketika regangan yang terjadi berada diluar rentang regangan kecil. Umumnya, batas regangan kecil tersebut bernilai  $10^{-3}$ . Redaman yang masih berada dalam rentang regangan kecil dianggap memiliki rasio redaman konstan dan disebut sebagai  $D_{\min}$ . Sedangkan pada regangan yang sangat besar rasio redaman cenderung menuju pada suatu nilai maksimum sehingga disebut sebagai  $D_{\max}$ .

#### b. Tekanan Kekang

Berdasarkan penelitian yang dilakukan *Hall dan Richart (1963)* serta *Hardin (1965)* dapat diketahui bahwa redaman material tanah pasir bergantung terhadap tekanan kekang efektif (*effective confining pressure*) yang terjadi. Saat tekanan kekang pada tanah pasir menurun maka rasio redaman akan membesar pada setiap nilai regangan.

*Hardin dan Drnevich (1972)* menyatakan bahwa tekanan kekang merupakan faktor penting yang mempengaruhi rasio redaman pada tanah lempung. Selanjutnya *Kim dan Novak (1981)* dan *Kokusho dkk (1982)* melaporkan redaman pada tanah lempung akan menurun seiring meningkatnya tekanan kekang.

#### c. Indeks Plastisitas

*Kokusho dkk (1980)* melakukan pengamatan terhadap hubungan rasio redaman dengan indeks plastisitas. Berdasarkan pengamatan, dapat disimpulkan bahwa untuk amplitudo regangan tinggi maka rasio redaman pada lempung dengan plastisitas tinggi tidak sebesar rasio redaman pada tanah pasir dengan plastisitas nol. Sedangkan dalam keadaan amplitudo regangan rendah kedua jenis tanah tersebut memiliki rasio redaman yang sama.

*Vucetic dan Dobry (1991)* menyampaikan bahwa rasio redaman menurun dengan meningkatnya indeks plastisitas. Hasil tersebut didasarkan pada pengamatan yang mereka lakukan dengan menggunakan sampel tanah lempung. Mereka mencoba mengamati hubungan antara indeks plastisitas dengan rasio redaman untuk berbagai nilai regangan.

#### d. Angka Pori

*Edil dan Luh (1978)* mengamati efek angka pori pada tanah pasir terhadap rasio redaman pasir. *Kokusho (1980)* juga menyampaikan kesimpulan yang sama. Menyimpulkan bahwa rasio redaman berbanding lurus dengan angka pori pada tanah. Sedangkan pengaruh angka pori pada tanah lempung terhadap rasio redaman disampaikan *Kim dan Novak (1981)*. Berdasarkan hasil uji *resonant column* dengan sampel tanah lempung, diperoleh bahwa untuk angka pori kurang

dari 0,6 maka rasio redaman menurun bila angka pori meningkat. Bila angka pori melebihi 0,6 maka rasio redaman akan meningkat seiring dengan meningkatnya angka pori.

## 2.5 Analisa Pondasi Mesin

### 2.5.1 Pembebanan

Perhitungan beban mati yang berupa berat mesin dan berat pondasi digunakan Persamaan (1).

$$W_{tot} = W_p + W_m \quad (1)$$

dengan :

$W_{tot}$  = Beban mati total (kN)

$W_p$  = Berat pondasi (kN)

$W_m$  = Berat mesin (kN)

Perhitungan beban hidup yang berupa gaya akibat getaran dari mesin digunakan Persamaan (2).

$$Q_o = M_r e \omega^2 \quad (2)$$

dengan :

$Q_o$  = Beban hidup total (kN)

$M_r$  = Massa rotor (kN sec<sup>2</sup>/m)

$e$  = Eksentrisitas (m)

$\omega$  = Frekuensi mesin (rad/sec)

### 2.5.2 Analisis statis

Perhitungan analisis statis pondasi diidealisasikan sebagai pondasi dangkal dengan menggunakan metode Meyerhof sebagaimana pada Persamaan (3).



$$qu = (c Nc Sc dc) + (q Nq Sq dq) + (0,5 L \gamma Ny Sy dy) \quad (3)$$

dengan :

$qu$  = Daya dukung ultimit (kN/m<sup>2</sup>)

$c$  = Kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$q$  =  $Df\gamma$  (kN/m<sup>2</sup>)

$Df$  = Kedalaman pondasi (m)

$\gamma$  = Berat isi tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$L$  = Lebar pondasi (m)

$Sc, Sq, Sy$  = Faktor bentuk pondasi

$dc, dq, dy$  = Faktor kedalaman pondasi

$Nc, Nq, Ny$  = Faktor daya dukung meyerhoff

### 2.5.3 Analisis getaran dinamis

Perhitungan analisis getaran dinamis menggunakan metode yang dikembangkan untuk pondasi lingkaran dengan jari-jari ( $r_o$ ) yang tergantung pada jenis getaran (Das, 1993). Faktor pertimbangan geoteknik yang mempengaruhi dalam analisis getaran dinamis yaitu :

#### a. Pengaruh bentuk pondasi

Pengaruh bentuk pondasi dalam analisis getaran dinamis pada radius ekuivalen. Perhitungan radius ekuivalen getaran vertikal dan horisontal menggunakan Persamaan (4) dan rokcing Persamaan (5).

$$r_o = \sqrt{\frac{BL}{\pi}} \quad \text{untuk getaran vertikal dan horisontal} \quad (4)$$

$$r_o = \sqrt[4]{\frac{BL^3}{3\pi}} \quad \text{untuk getaran rocking} \quad (5)$$

dengan :

$r_o$  = Ekuivalen

$L$  = Panjang pondasi (m)

$P$  = Lebar pondasi (m)

$r_o$  = Radius ekuivalen (m)

b. Pengaruh penanaman pondasi (embedment foundation)

Perhitungan selanjutnya dalam menganalisis getaran dinamis pada pondasi mesin secara tertanam. Konstanta pegas dalam analisis pondasi mesin dapat dihitung menggunakan Persamaan (6) hingga (8).

$$K_z = G(1-\nu)\beta_z \sqrt{PL} \eta_z \quad \text{untuk getaran vertikal} \quad (6)$$

$$K_x = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{LP} \eta_x \quad \text{untuk getaran horisontal} \quad (7)$$

$$K_\varphi = G(1-\nu)\beta_\varphi L^2 P \eta_\varphi \quad \text{untuk getaran rocking} \quad (8)$$

dengan :

$K_{z,x,\varphi}$  = Konstanta pegas (kN/m)

$G$  = Modulus geser tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$\nu$  = Angka poisson

$\beta_z$  = Koefisien pondasi persegi

$P$  = Lebar pondasi (m)

$L$  = Panjang pondasi (m)

$\eta_z$  = Koefisien penanaman

Rasio damping dalam analisis pondasi mesin dapat dihitung menggunakan Persamaan (9) hingga (10).

$$D_{rz} = 0,425 \sqrt{Bzaz} \quad \text{untuk getaran vertikal} \quad (9)$$

$$D_{rx} = 0,288 \sqrt{Bxax} \quad \text{untuk getaran horisontal} \quad (10)$$

$$D_{r\phi} = 0,15 (1+n\phi B\phi) \sqrt{n\phi B\phi a\phi} \quad \text{untuk getaran rocking} \quad (11)$$

dengan :

$$D_{rz,x,\phi} = \text{Rasio damping}$$

$$B_{z,x,\phi} = \text{Rasio massa}$$

$$a_{z,x,\phi} = \text{Faktor penanaman rasio damping}$$

Frekuensi natural pada getaran vertikal, horisontal, dan rocking dihitung menggunakan Persamaan (12).

$$\omega_{nz} = \omega_{nx} = \omega_{n\phi} = \sqrt{K_{z,x,\phi} / M_{tot}} \quad (12)$$

dengan :

$$\omega_{nz} = \text{Frekuensi natural vertikal (rad/sec)}$$

$$\omega_{nx} = \text{Frekuensi natural horisontal (rad/sec)}$$

$$\omega_{n\phi} = \text{Frekuensi natural rocking (rad/sec)}$$

$$K_{z,x,\phi} = \text{Konstanta pegas (kN/m)}$$

$$M_{tot} = \text{Massa total (kN sec}^2\text{/m)}$$

Cek terjadi resonansi atau tidak dapat dihitung menggunakan Persamaan (13).

$$D_{rz,x,\phi} > 1/2\sqrt{2} \quad (\text{tidak terjadi resonansi}) \quad (13)$$

dengan :

$$D_{rz,x,\phi} = \text{Rasio damping}$$

Frekuensi resonansi pada getaran vertikal, horisontal, dan rocking dihitung menggunakan Persamaan (14).

$$\omega_{resz} = \omega_{resx} = \omega_{res\phi} = \omega_{nz, nx, n\phi} \sqrt{1 - 2D_{rz, x, \phi}^2} \quad (14)$$

dengan :

$$\omega_{resz} = \text{Frekuensi resonansi vertikal (rad/sec)}$$

$$\omega_{resx} = \text{Frekuensi resonansi horisontal (rad/sec)}$$

$$\omega_{res\phi} = \text{Frekuensi resonansi rocking (rad/sec)}$$

$$\omega_{nz, nx, n\phi} = \text{Frekuensi natural (rad/sec)}$$

$$D_{rz, x, \phi} = \text{Rasio damping}$$

Cek syarat frekuensi resonansi yang terjadi aman atau tidak dapat menggunakan Persamaan (15)

$$\omega_{res} > \omega > 2 \text{ atau } \omega_{res} < \omega < 2 \text{ (aman)} \quad (15)$$

dengan :

$$\omega_{res} = \text{Frekuensi resonansi (rad/sec)}$$

$$\omega = \text{Frekuensi mesin (rad/sec)}$$

Analisis amplitudo yang terjadi akibat getaran menggunakan Persamaan (16) hingga (18).

$$A_z = Q_o K_z \sqrt{(1-r^2)^2 + (2D_z r)^2} \text{ (untuk getaran vertikal)} \quad (16)$$

$$A_x = Q_o K_x \sqrt{(1-r^2)^2 + (2D_x r)^2} \text{ (untuk getaran horisontal)} \quad (17)$$

$$A_\phi = Q_o (TBm + T) M K_\phi \text{ (untuk getaran rocking)} \quad (18)$$

dengan :

- $A_z$  = Amplitudo vertikal (m)
- $A_x$  = Amplitudo horisontal (m)
- $A_\varphi$  = Amplitudo rocking (m)
- $Q_0$  = Beban hidup (kN)
- $K_{z,x,\varphi}$  = Konstanta pegas (kN/m)
- $r$  = Rasio frekuensi
- $D_z$  = Rasio damping
- $T$  = Tinggi pondasi (m)
- $M$  = Pembesaran dinamis