

Pengaruh Lapisan Pasir di Bawah Fondasi terhadap Redaman dan Frekuensi Natural Akibat Beban Gempa

(Effect of Sand Layer under Foundation on Damping and Natural Frequency Due To Earthquake Loading)

AS'AT PUJIANTO

ABSTRACT

Sand layer under foundation has been widely used for vibration damping by an earthquake since centuries ago. Due to being located in earthquake-zone and sand as natural material is widely distributed over regions, research on the use of sand for earthquake vibration damping is becoming important in Indonesia. The aim of this work is to study sand layer behavior in reducing earthquake vibration. Parameters of soil structure, i.e. damping ratio, displacement, soil pressure, and the change of natural frequency due to the existence of sand layer under foundation were observed. In this study, soil structure was modeled as layered soil profile where top layer is a clay soil layer. Foundation base is located at a depth of 300 cm underlying varied thicknesses of coarse sand layer, i.e. 0, 50, 100, 150 and 200 cm under foundation. In order to produce various soil pressures, load magnitudes of 0, 10,000, 20,000, 30,000 and 40,000 tons were selected. Therefore, earthquake loadings with high and low frequency from Koyna and Bucharest earthquake record were implemented to soil structure models. Results showed that the increase of sand layer thickness does not essentially affect to the decrease of displacement. It is depending on the frequency of an earthquake. However, a thickness of 50 cm shows decrease of displacement due to high and low frequency earthquake loading with the average deviation of 3.67 %. The displacement due to Bucharest earthquake loading is greater than that of Koyna earthquake, with the average ratio of 9.38 times. If ground frequency is higher than earthquake frequency, ground displacement is becoming smaller.

Keywords: sand layer, ground response, natural frequency, displacement, earthquake.

PENDAHULUAN

Pasir sebagai tanah dasar fondasi suatu bangunan gedung telah banyak digunakan, bahkan sejak berabad-abad yang lalu. Sebagai contoh bangunan-bangunan candi yang terdapat di kompleks Candi Sewu, Prambanan Yogyakarta, yang dibangun sekitar abad ke-8 Masehi, ternyata menggunakan pasir (tanah bergradasi kasar) sedalam ± 2 m sebagai tanah dasarnya (Mahmud et al., 2004).

Pada umumnya penggunaan pasir sebagai tanah dasar fondasi hanya sebagai upaya perbaikan kuat dukungannya, namun tidak tertutup kemungkinan pasir sebagai lapisan peredam getaran, misalnya ketika terjadi

gempa bumi. Menurut Mahmud et al. (2004) dugaan ini muncul dengan berbagai alasan, antara lain :

1. pasir telah lama dikenal dan digunakan sebagai peredam getaran mesin, dan telah banyak dilakukan penelitian tentang hal tersebut. Mahmud et al. (2004) yang melakukan penelitian menggunakan model laboratorium untuk pasir 1 lapis, menyatakan bahwa pasir mampu meredam antara 2,1 % sampai dengan 8 %, serta setelah pasir mencapai kepadatan maksimum semakin besar tekanan semakin besar rasio redamannya.
2. di kompleks Candi Sewu, Prambanan Yogyakarta, dijumpai struktur bangunan candi berupa batu yang tersusun tanpa

mortar perekat, tetapi belum mengalami keruntuhan sampai saat ini, padahal berdasarkan catatan Dinas Meteorologi dan Geofisika, di Yogyakarta pernah terjadi beberapa kali gempa besar (Mahmud et al. (2004).

Mengingat bahwa sebagian besar wilayah Indonesia merupakan daerah rawan gempa, sedangkan pasir merupakan bahan alam yang murah serta mudah diperoleh, maka perlu dilakukan penelitian tentang kemampuan pasir dalam meredam gempa. Selain itu penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian Mahmud et al. (2004) yang dilakukan di laboratorium dan menghasilkan rasio redaman serta simpangan horisontal untuk tanah 1 lapis dengan beban Gempa Elcentro, 1940. Jika dipergunakan analisis dinamika struktur maka profil data tanah sesungguhnya yang ada di lapangan dapat dipergunakan, sehingga kecepatan dan percepatan serta interaksi frekuensi gempa terhadap struktur tanah dapat diperoleh. Selain itu variasi ketebalan pasir dan variasi gempa, serta jumlah lapis tanah dapat dilakukan analisisnya.

Melihat kondisi tersebut maka dapat dirumuskan suatu permasalahan yang akan menjadi objek tulisan ini, yaitu dengan memberikan beberapa variasi terhadap ketebalan pasir dan tekanan tanah (yang berupa beban di atas lapisan tanah) akan menghasilkan rasio redaman yang berbeda, dan juga akan membuktikan apakah benar jika tekanan tanah semakin meningkat rasio redamannya juga akan meningkat, sebagaimana yang dihasilkan oleh Mahmud et al. (2004). Selain itu juga akan didapat pengaruh pasir terhadap interaksi tanah, apakah semakin jauh atau semakin dekat dengan frekuensi gempa, jika digunakan uji dengan beban gempa Koyna (yang terjadi pada tahun 1967) yaitu gempa yang mempunyai frekuensi tinggi dan gempa Bucharest (yang terjadi pada tahun 1977) yang mempunyai frekuensi cukup rendah. Beban gempa tersebut dipergunakan dengan alasan karena data percepatan gempa yang terjadi di Indonesia tidak didapatkan. Selain itu menurut Pujiyanto (2003) semakin besar kekakuan tanah akibat gempa dengan frekuensi tinggi, maka amplifikasi yang terjadi akan semakin besar. Sebaliknya akibat gempa dengan frekuensi rendah amplifikasi yang terjadi akan semakin kecil.

Berdasarkan uraian permasalahan tersebut di atas, maka tulisan ini mempunyai tujuan sebagai berikut:

1. mendapatkan besarnya pengaruh tekanan permukaan terhadap rasio redaman,
2. mendapatkan besarnya pengaruh ketebalan lapisan pasir terhadap rasio redaman,
3. mendapatkan besarnya pengaruh tekanan permukaan terhadap simpangan,
4. mendapatkan besarnya pengaruh ketebalan lapisan pasir terhadap simpangan,
5. mendapatkan besarnya pengaruh tekanan permukaan terhadap kandungan frekuensi tanah,
6. mendapatkan besarnya pengaruh ketebalan lapisan pasir terhadap kandungan frekuensi tanah, dan
7. mengetahui kedekatan frekuensi gempa terhadap frekuensi struktur tanah.

PASIR DAN REDAMAN

Menurut Luong (1996), pasir mampu menyerap energi melalui 2 cara, yaitu, pertama, melalui deformasi plastis butir-butir pasir serta melalui gesekan antar butir pasir, cara tersebut terjadi pada saat pasir mengalami tekanan yang relatif rendah, yang tidak menyebabkan terjadinya perubahan posisi antar butir pasir. Pada kasus ini tekanan yang diberikan menyebabkan permukaan butir pasir yang bersentuhan saling menekan, sehingga terjadi deformasi plastis pada butir-butir pasir tersebut. Penyerapan energi pada kasus ini sangat kecil, dan biasanya diabaikan. Cara kedua terjadi jika tekanan pada pasir mengakibatkan perubahan posisi antar butir pasir. Perubahan posisi tersebut disertai peristiwa gesekan antar butir, yang mengakibatkan terjadinya penyerapan energi melalui perubahan energi mekanik menjadi energi panas.

Perubahan posisi antar butir pasir menyebabkan terjadinya regangan plastis, yang pada pembebanan dinamis regangan plastis ini menimbulkan peristiwa histeresis (Jafarzadeh & Yanagisawa, 1996). Pada peristiwa histeresis, kurva hubungan tegangan-regangan dalam satu siklus pembebanan berbentuk luasan tertutup yang disebut *hysteresis loop* (Das, 1993).

Luas *hysteresis loop* menggambarkan besar energi gesekan yang diserap oleh lapisan pasir dalam siklus pembebanan tersebut (Luong, 1996). Penyerapan energi melalui peristiwa histeresis ini mengakibatkan terjadinya peningkatan redaman total serta penurunan deformasi struktur (Dowrick, 1976).

Besar energi yang diserap dalam satu siklus pembebanan melalui peristiwa histeresis biasa dinyatakan dalam rasio redaman (*damping ratio*, D) yang didefinisikan dari Gambar 1. Dari Gambar 1 tersebut besarnya *damping ratio* dapat ditentukan dengan Persamaan 1, dengan D adalah besarnya rasio redaman (%) (Das, 1993; Zeghal et al., 1995). Persamaan tersebut sesuai dengan hasil penelitian Mahmud et al. (2004) yang menyimpulkan bahwa rasio redaman pasir pada umumnya sebanding dengan *hysteresis loopnya*. Penambahan tekanan setelah pasir mencapai kepadatan maksimum mengakibatkan terjadinya peningkatan rasio redaman. Rasio redaman yang didapatkan antara 2,1 % sampai dengan 8,2 %.

Rasio redaman pada lapisan pasir dipengaruhi oleh ukuran butir pasir, kadar air, angka pori, tingkat kepadatan, jumlah siklus pembebanan, tingkat regangan, serta besar tekanan efektif yang bekerja pada lapisan pasir tersebut (Das, 1993).

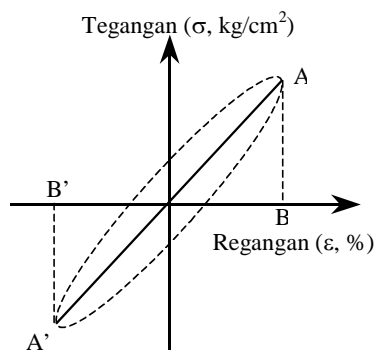
Perilaku pasir pada pembebanan dinamis dipengaruhi secara signifikan oleh besar tekanan dipengaruhi secara signifikan oleh besar tekanan permukaannya. Dalam penelitian terhadap perilaku geser pasir, Prakash (1981, dalam Mahmud et al., 2004) menyimpulkan bahwa kekakuan geser pasir meningkat sejalan

dengan peningkatan tekanan permukaannya. Peningkatan kekakuan pasir berarti meningkatnya tegangan pada lapisan pasir tersebut untuk mencapai nilai regangan tertentu.

Pada pengujian triaksial terhadap pasir kering Faountainableau Habib dan Luong (dalam Wood, 1982) menyimpulkan bahwa penambahan tekanan utama sampai nilai batas tertentu menyebabkan terjadinya pemampatan pasir (*volumetric compression*), sedangkan penambahan tekanan di atas nilai batas tersebut mengakibatkan pengembangan pasir (*volumetric dilatation*). Kesimpulan ini sejalan dengan hasil penelitian Yamamuro dan Lade (1996) terhadap pasir Cambria, yang menyimpulkan bahwa pecahnya butir-butir pasir merupakan faktor paling dominan dalam perilaku pasir pada tekanan tinggi.

FREKUENSI

Untuk mengetahui pengaruh frekuensi terhadap rasio redaman, maka perlu diketahui terlebih dahulu tentang frekuensi gempa. Sebagaimana diketahui bahwa gempa bumi yang terekam dalam percepatan tanah merupakan gabungan dari beberapa frekuensi. Oleh karena itu, dipakai beberapa istilah frekuensi sebagai suatu cara untuk mendiskripsikan gabungan beberapa frekuensi. Pada kenyataannya frekuensi pada suatu gempa dapat saja mempunyai rentang yang sempit, sehingga frekuensi dominan lebih jelas ataupun frekuensi yang menyebar dengan rentang yang panjang. Beberapa hal akan berpengaruh terhadap hal-hal tersebut.



Keterangan

- A : Titik regangan maksimum
- A' : Titik regangan minimum
- B : Proyeksi A pada sumbu regangan
- B' : Proyeksi A' pada sumbu regangan

GAMBAR 1. Hysteresis loop dan rasio redaman

$$D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\text{Luas Histeresis Loop}}{\text{Luas Segitiga AOB} + \text{Luas Segitiga A'OB'}} \right] \quad (1)$$

Frekuensi yang telah didapat menjadi parameter penting selain durasi gempa (Tso et al., 1992). Hal tersebut dimungkinkan karena parameter-parameter tersebut dapat dideteksi mulai dari cara yang sederhana. Housner (1971) mengusulkan cara yang sederhana untuk mengetahui kandungan frekuensi gempa yaitu dengan menghitung jumlah garis yang memotong sumbu-waktu untuk setiap detik pada rekaman percepatan tanah akibat gempa. Konsep ini sangat sederhana dan juga dipakai oleh Araya dan Saragoni (1988, dalam Uang & Bertero, 1988) untuk mendiskripsikan *damage potential* suatu gempa.

Konsep lain yang cukup sederhana untuk mendeteksi frekuensi gempa adalah seperti yang disampaikan oleh Tso et al. (1992). Konsep yang dimaksud adalah *a/v ratio* yaitu dengan memakai perbandingan antara percepatan dan kecepatan tanah maksimum. Sebagaimana dikatakan sebelumnya, percepatan tanah berasosiasi dengan frekuensi tinggi, sedangkan percepatan tanah berasosiasi dengan frekuensi menengah sampai rendah. Gazaetas (1987, dalam Banerjee, 1987) mengatakan bahwa media tanah umumnya akan berfungsi menyaring frekuensi tinggi pada gelombang gempa, sehingga pada jarak yang jauh percepatan tanah akibat gempa cenderung berbentuk sinusoidal/harmonik. Dengan demikian pada daerah yang dekat dengan episenter percepatan cenderung mempunyai frekuensi tinggi, bersifat implusif, percepatan tanahnya relatif tinggi dan durasi gempa relatif singkat. Pada daerah yang jauh dengan episenter, keadaannya akan berkebalikan. Sebagai konsekuensinya nilai *a/v ratio* akan tinggi (frekuensi tinggi) pada daerah yang dekat dengan episenter *a/v ratio* rendah (frekuensi rendah), *a/v ratio* dapat juga dipakai untuk menentukan frekuensi gempa secara lebih mudah. Kriteria inilah yang dipakai dalam tulisan ini.

PRINSIP RESONANSI PADA BEBAN DINAMIK HARMONIK

Menurut Widodo (1997) untuk mengetahui efek frekuensi beban terhadap respon struktur secara sederhana dapat diketahui dengan memperhatikan solusi persamaan differensial gerakan (*differential equation of motion*). Apabila suatu struktur dengan derajat kebebasan tunggal SDOF (*Single Degree of Freedom*) dibebani dengan beban harmonik $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$, maka untuk struktur yang dianggap tidak mempunyai redaman, simpangan struktur $y(t)$ dapat dihitung dengan persamaan 2, dengan k adalah kekakuan struktur, P_0 adalah amplitudo beban, ω adalah frekuensi sudut struktur, Ω adalah frekuensi sudut, dan r adalah rasio frekuensi.

$$y(t) = \frac{P_0}{k} \frac{1}{1-r^2} \{ \sin(\Omega t) - r \sin(\omega t) \} \quad (2)$$

$$\text{dengan } r = \frac{\Omega}{\omega}$$

Apabila nilai r pada Persamaan 2 sama dengan 1, maka peristiwa resonansi akan terjadi, yaitu simpangan struktur menjadi tak terhingga. Untuk struktur yang mempunyai redaman, simpangan horisontal struktur dapat dihitung dengan Persamaan 3 dan Persamaan 4.

PERSAMAAN DIFFERENSIAL GERAKAN

Menurut Widodo (1997) untuk memperoleh persamaan differensial gerakan dipakai prinsip keseimbangan dinamik pada suatu massa yang ditinjau. Persamaan gerakan tersebut umumnya disusun berdasarkan goyangan struktur menurut mode pertama. Setelah nilai mode shape didapat maka dengan mudah nilai percepatan tanah, kecepatan tanah dan simpangan tanah dapat diperoleh menggunakan Persamaan 5.

$$y(t) = \frac{P_0}{k} \frac{1}{(1-r^2)(2\xi r)^2} \left\{ e^{-\omega t} [\cos(\omega_d t) + C \sin(\omega_d t)] + (1-r^2) \sin(\Omega t) - 2\xi r \cos(\omega t) \right\} \quad (3)$$

$$C = \frac{r\{2\xi^2 - (1-r^2)\}}{(1-\xi^2)^{0.5}} \quad (4)$$

dengan ω_d = adalah *damped frequency*.

$$\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j \ddot{Z}_j + \{\phi\}_j^T [C] \{\phi\}_j \dot{Z}_j + \{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_j Z_j = -\{\phi\}_j^T [M] \{I\}_j \ddot{y}_t \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Jika, } M_j^* &= \{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j \ddot{Z}_j \\ C_j^* &= \{\phi\}_j^T [C] \{\phi\}_j \dot{Z}_j \\ K_j^* &= \{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_j Z_j \\ P_j^* &= \{\phi\}_j^T [M] \{I\}_j \ddot{y}_t \end{aligned}$$

maka Persamaan 5 dapat menjadi Persamaan 6, seperti dituliskan dalam

$$M_j^* \ddot{Z}_j + C_j^* \dot{Z}_j + K_j^* Z_j = -P_j^* \ddot{y}_t \quad (6)$$

Jika Persamaan 6 dibagi dengan M_j^* , dengan

$$\frac{C_j^*}{M_j^*} = 2\xi\omega_j, \quad \frac{K_j^*}{M_j^*} = \omega_j^2 \quad (7a)$$

dan

$$\frac{P_j^*}{M_j^*} = \Gamma_j \quad (7b)$$

maka dapat ditulis bentuk differensial menjadi persamaan 8:

$$\ddot{Z}_j + 2\xi\omega_j \dot{Z}_j + \omega_j^2 Z_j = -\Gamma_j \ddot{y}_t \quad (8)$$

dengan :

$$Z = g * \Gamma_j \quad (9)$$

$$\dot{Z} = \dot{g} * \Gamma_j \quad (10)$$

$$\frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} + 2\xi\omega_j \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (14)$$

$$\left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi\omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j+1} = -\ddot{y}_t \left[\omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] g_j - \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi\omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j-1} \quad (15)$$

$$\ddot{Z} = \ddot{g} * \Gamma_j \quad (11)$$

Γ = partisipasi mode.

Dari substitusi Persamaan 9 sampai dengan Persamaan 11 ke dalam Persamaan 8 didapat Persamaan 12.

$$\ddot{g}_j + 2\xi\omega_j \dot{g}_j + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (12)$$

Untuk menghitung besarnya \ddot{g}_j dapat digunakan metode *central difference*, sehingga diperoleh Persamaan 13.

$$\dot{g}_j = \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} \quad (13a)$$

$$\ddot{g}_j = \frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} \quad (13b)$$

Substitusi Persamaan 13 ke dalam Persamaan 12 selanjutnya diperoleh Persamaan 14 yang dapat menghasilkan nilai g_{j+1} , seperti ditulis dalam Persamaan 15.

Persamaan 15 dapat diringkaskan menjadi Persamaan 16.

$$g_{j+1} = \frac{-\ddot{y}_t - ag_j - bg_{j-1}}{\hat{k}} \quad (16)$$

dengan :

$$a = \left[\omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right]$$

$$b = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right]$$

$$\hat{k} = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right]$$

Δt : step integrasi (dt)

ω : frekuensi sudut (rad/dt)

\ddot{y}_t : data rekaman gempa (percepatan tanah)

Selanjutnya persamaan simpangan, kecepatan, dan percepatan dapat diturunkan berturut-turut dalam Persamaan 17, Persamaan 18, dan Persamaan 19.

$$y = [\phi] * \{Z\} \quad (17)$$

$$\dot{y} = [\phi] * \{\dot{Z}\} \quad (18)$$

$$\ddot{y} = [\phi] * \{\ddot{Z}\} \quad (19)$$

dengan :

ϕ : mode shape

y : simpangan tanah

\dot{y} : kecepatan tanah

\ddot{y} : percepatan tanah

METODE PENELITIAN

Profil dan Data Struktur

Untuk mengetahui pengaruh pasir terhadap redaman dan frekuensi, maka perlu diambil model struktur tanah yang digunakan sebagai bahan kajian/analisis. Profil tanah tersebut dipilih yang bagian atasnya terdiri dari

lapisan tanah lempung sebagaimana disajikan pada Gambar 2. Beban (dasar fondasi) diletakan pada kedalaman -300 cm, kemudian di bawah dasar fondasi tersebut lapisan tanah diganti dengan lapisan pasir dengan ketebalan yang bervariasi, yaitu : 0 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm, dan 200 cm. Selain itu besarnya beban juga bervariasi, yaitu : 0 ton, 10.000 ton, 20.000 ton, 30.000 ton, dan 40.000 ton (diambil dengan asumsi ukuran bangunan 45 m x 45 m dengan jumlah tingkat yang berbeda-beda, sehingga berat bangunan juga bervariasi). Dengan menggunakan dua data beban gempa, seterusnya ditinjau 50 macam kondisi (variasi) agar struktur mempunyai redaman dan frekuensi yang berlainan. Pada kondisi tersebut pengaruh ketebalan pasir dan tekanan terhadap redaman dan frekuensi dapat dideteksi.

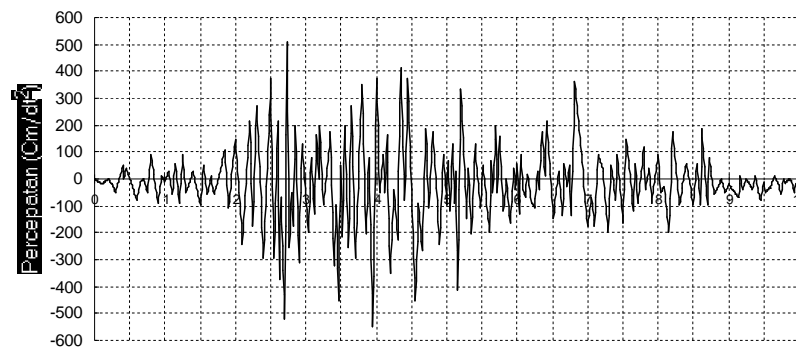
Data Gempa

Untuk mendeteksi pengaruh frekuensi terhadap respon struktur, maka dua beban gempa yang berbeda dan mempunyai kandungan frekuensi yang berbeda telah digunakan, yaitu:

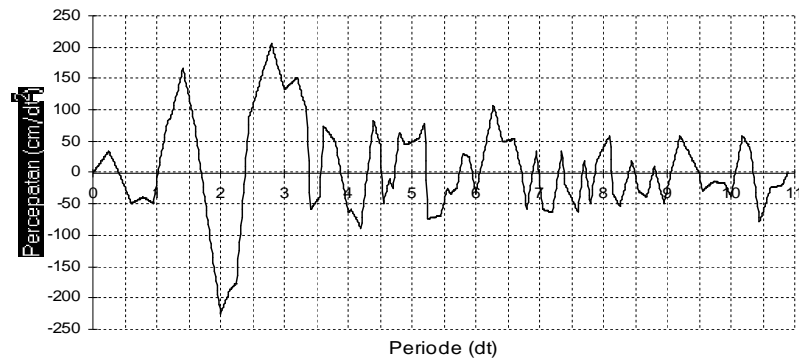
1. Gempa Koyna, India, 1967, yaitu gempa yang mempunyai percepatan maksimum sebesar 548,80 cm/dt² dan frekuensi sebesar 1,5917 g/m/dt. Gempa tersebut tergolong gempa yang mempunyai frekuensi tinggi. Beban gempa yang diambil adalah rekaman percepatan tanah horisontal di Koyna Dam yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu panjang Dam, dengan Magnitude 6,5 Richter dan jarak episentrum 5,6 km. Rekaman Gempa disajikan pada Gambar 3A.
2. Gempa Bucharest, Rumania, 1977 yaitu gempa yang mempunyai percepatan maksimum sebesar 225,4 cm/dt² dan frekuensi sebesar 0,2628 g/m/dt. Gempa tersebut tergolong gempa yang mempunyai frekuensi rendah. Beban gempa yang diambil adalah rekaman percepatan tanah horisontal di Bucharest Dam yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu panjang Dam, dengan Magnitude 7,1 Richter dan jarak episentrum 140 km. Rekaman Gempa disajikan pada Gambar 3B.

± 0.00 cm	Pasir kasar berlempung abu-abu kehitaman, lunak. $\gamma_b = 1,93 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,818$ $PI = 0$ $\phi = 01^\circ 43' = 1,72$	$\gamma_d = 1,484 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,697$ $OCR = 1$
- 300 cm	Lanau berlempung merah keabu-abuan, agak lunak. $\gamma_b = 1,625 \text{ gr/cm}^3$ $e = 1,441$ $PI = 30,99$ $\phi = 02^\circ 49' = 2,82$	$\gamma_d = 1,033 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,521$ $OCR = 1$
- 600 cm	Lempung kelanauan campur kayuan lapuk, hitam, kenyal. $\gamma_b = 1,695 \text{ gr/cm}^3$ $e = 1,001$ $PI = 63,07$ $\phi = 00^\circ 57' = 0,95$	$\gamma_d = 1,183 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,367$ $OCR = 1$
- 900 cm	Lempung kelanauan putih keabu-abuan, sangat kenyal. $\gamma_b = 1,886 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,884$ $PI = 0$ $\phi = 05^\circ 10' = 5,17$	$\gamma_d = 1,418 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,671$ $OCR = 1$
- 1200 cm	Lanau berpasir halus, putih kekuningan, keras. $\gamma_b = 2,070 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,727$ $PI = 26,60$ $\phi = 00^\circ 42' = 0,71$	$\gamma_d = 1,477 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,55$ $OCR = 1$
- 1500 cm	Lanau berpasir halus, putih kekuningan, keras. $\gamma_b = 1,840 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,749$ $PI = 29,07$ $\phi = 0$	$\gamma_d = 1,510 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,640$ $OCR = 1$
- 1800 cm	Lanau berpasir halus, putih kekuningan, keras. $\gamma_b = 2,070 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,605$ $PI = 0$ $\phi = 0$	$\gamma_d = 1,705 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,737$ $OCR = 1$
- 3045 cm		

GAMBAR 2. Model tanah asli Pelabuhan Pangkal Balam Bangka



A. gempa Koyna, India, 1967



B. gempa Bucharest, Rumania, 1977

GAMBAR 3. Rekaman gempa yang digunakan dalam studi

Alat Analisis

Penelitian ini didasarkan atas analisis dinamika struktur dengan model profil tanah yang dipakai dan beban gempa seperti disebutkan sebelumnya. Untuk keperluan analisis tersebut perlu dibuat suatu program sederhana yang dapat menghasilkan respon dinamik berupa pola/ragam goyangan yang terjadi seperti redaman, frekuensi, simpangan, kecepatan dan percepatan.

Cara Analisis

Data yang harus didapat terlebih dahulu adalah profil data tanah, berupa : ketebalan tanah, jenis tanah, kondisi tanah (terendam air atau tidak), berat volume tanah basah, berat jenis, angka pori, indeks plastisitas, sudut geser tanah, dan *OCR (Over Consolidation Ratio)*. Data tersebut langsung dimasukkan ke dalam program, yang digunakan untuk memproses perhitungan kekakuan dan masa setiap lapisan tanah, dengan memakai prinsip *shear buildings*, yaitu dengan anggapan bahwa lapisan tanah dianggap sebagai struktur bangunan bertingkat dengan kekakuan kolom yang besarnya tak terhingga. Program tersebut juga digunakan untuk memproses *eigen problem, mode shape*, dan *damping ratio*. Proses analisis berikutnya adalah integrasi secara numerik atas persamaan independen. Metode *central difference* dipakai untuk menghitung nilai *g*. Hasil simpangan, kecepatan dan percepatan dianalisis oleh program yang telah diuji validitasnya (Pujiyanto, 2003).

Dari hasil program tersebut, grafik simpangan, kecepatan dan percepatan serta kandungan

frekuensi selanjutnya diolah menggunakan program *MS Excel*.

Frekuensi struktur tanah dapat dianalisis menggunakan *a/v ratio* (Tso et al., 1992). Konsep *a/v ratio* merupakan perbandingan antara percepatan dan kecepatan tanah maksimum. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan kandungan frekuensi gempa untuk mengetahui kedekatannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Tekanan Permukaan terhadap Rasio Redaman

Hasil analisis hubungan antara tekanan permukaan terhadap rasio redaman akibat beban gempa Koyna disajikan selengkapnya pada Tabel 1, sedangkan akibat beban gempa Bucharest disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, tampak bahwa semakin berat beban bangunan semakin besar pula tekanan permukaan baik akibat beban gempa Koyna dan Bucharest. semakin besar tekanan permukaan pada tanah tanpa pasir menghasilkan rasio redaman yang semakin kecil. Pada permukaan tanah yang dilapisi pasir, bertambahnya tekanan tanah tidak merubah rasio redaman dan cenderung mempunyai besaran yang stabil sebesar 10,21 % akibat beban gempa Koyna dan sebesar 7,87 % akibat beban gempa Bucharest. Jika dibandingkan dengan lapisan tanah tanpa menggunakan pasir, peningkatan rasio redaman terjadi antara 19,97 % sampai dengan 29,57 %. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Mahmud et al. (2004), yang menyatakan bahwa dengan semakin besar tekanan tanah, menyebabkan rasio redaman semakin meningkat.

TABEL 1. Hubungan Tekanan Permukaan Terhadap Rasio Redaman Akibat Gempa Koyna

Beban (ton)	Tekanan (kg/cm ²)	Damping Rasio Untuk Ketebalan Pasir					Peningkatan (%) Damping Rasio
		0 cm	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	
0	-	8.47	10.21	10.21	10.21	10.21	20.54
10000	0.8889	8.27	10.21	10.21	10.21	10.21	23.46
20000	1.7778	8.12	10.21	10.21	10.21	10.21	25.74
30000	2.6667	7.99	10.21	10.21	10.21	10.21	27.78
40000	3.5556	7.88	10.21	10.21	10.21	10.21	29.57

TABEL 2. Hubungan Tekanan Permukaan Terhadap Rasio Redaman Akibat Gempa Bucharest

Beban (ton)	Tekanan (kg/cm ²)	Damping Rasio Untuk Ketebalan Pasir					Peningkatan (%) Damping Rasio
		0 cm	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	
0	-	6.56	7.87	7.87	7.87	7.87	19.97
10000	0.8889	6.40	7.87	7.87	7.87	7.87	22.97
20000	1.7778	6.28	7.87	7.87	7.87	7.87	25.32
30000	2.6667	6.18	7.87	7.87	7.87	7.87	27.35
40000	3.5556	6.09	7.87	7.87	7.87	7.87	29.23

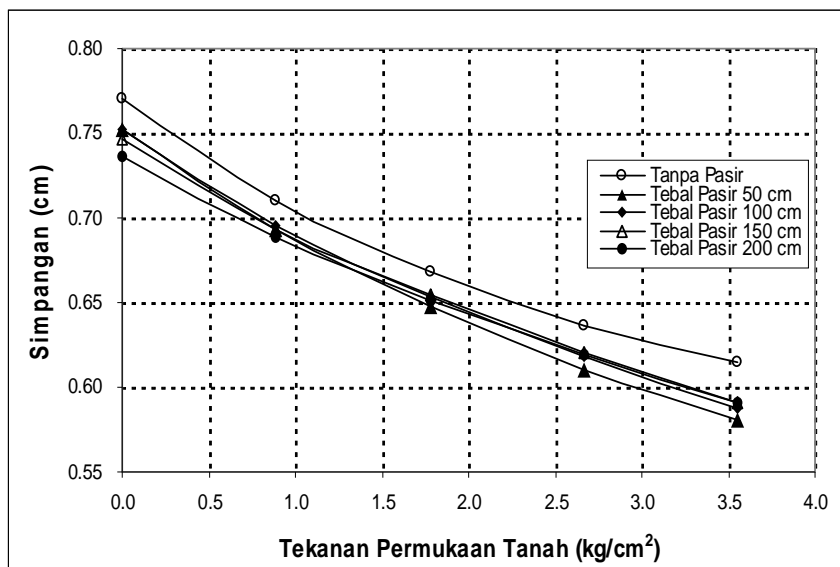
Pengaruh Ketebalan Lapisan Pasir terhadap Rasio Redaman

Pengaruh ketebalan lapisan pasir terhadap rasio redaman juga dapat dilihat pada Tabel 1 akibat beban gempa Koyna, dan Tabel 2 akibat beban gempa Bucharest. Dari kedua tabel tersebut tampak bahwa besarnya rasio redaman cenderung stabil baik akibat gempa Koyna maupun gempa Bucharest, atau dapat dikatakan bahwa ketebalan pasir tidak berpengaruh terhadap besarnya rasio redaman. Jika dibandingkan dengan tanah tanpa lapisan pasir, lapisan pasir dapat meningkatkan rasio redaman misalnya akibat gempa Koyna, rasio redaman meningkat dari 7,88 - 8,47 % menjadi 10,21 % atau meningkat sekitar 20,54 - 29,57 %. Selain itu, gempa Bucharest yang memberikan peningkatan rasio redaman dari semula antara 6,09 % sampai dengan 6,56 - 7,87 % atau meningkat sebesar 19,97 - 29,23 %. Kondisi tersebut dapat dikatakan bahwa pasir akan dapat meningkatkan rasio redaman antara 19,97 - 29,57 % terhadap rasio redaman

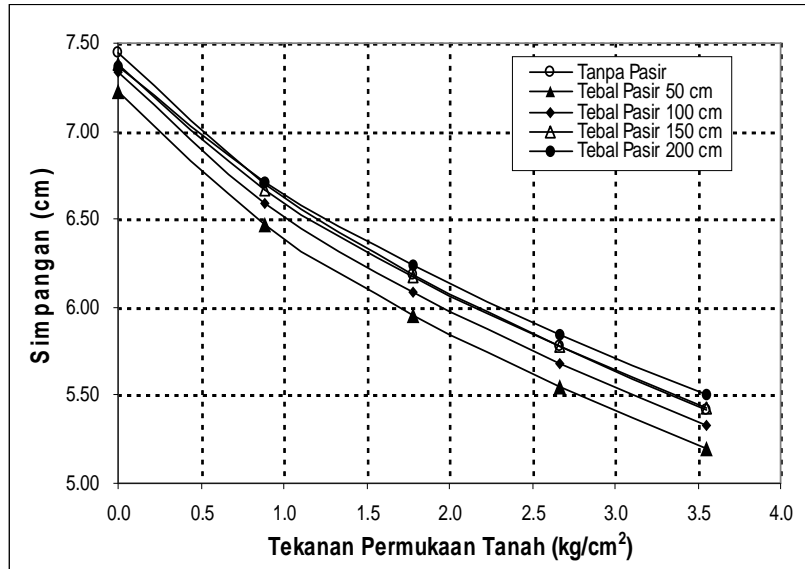
tanah tanpa pasir. Hasil tersebut lebih besar jika dibanding dengan hasil penelitian Mahmud et al. (2004), yang menjelaskan bahwa pasir dapat meningkatkan rasio redaman sebesar 2,1 % sampai dengan 8,2 %. Perbedaan ini dapat terjadi karena pada Mahmud et al. (2004) hanya menggunakan satu lapisan pasir saja.

Pengaruh Tekanan Permukaan terhadap Simpangan

Hasil analisis hubungan antara tekanan permukaan terhadap simpangan akibat beban gempa Koyna diberikan pada Gambar 4, sedangkan akibat beban gempa Bucharest digambarkan pada Gambar 5. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dianalisis bahwa peningkatan permukaan tanah menyebabkan semakin menurun simpangan pada permukaan tanah, baik akibat gempa Koyna maupun gempa Bucharest. Jika dibandingkan tanah tanpa beban (besarnya tekanan = 0), besarnya penurunan rata-rata setiap peningkatan tekanan sebesar 1 kg/cm² yaitu sebesar 9,23 %.



GAMBAR 4. Hubungan tekanan permukaan terhadap simpangan akibat gempa Koyna

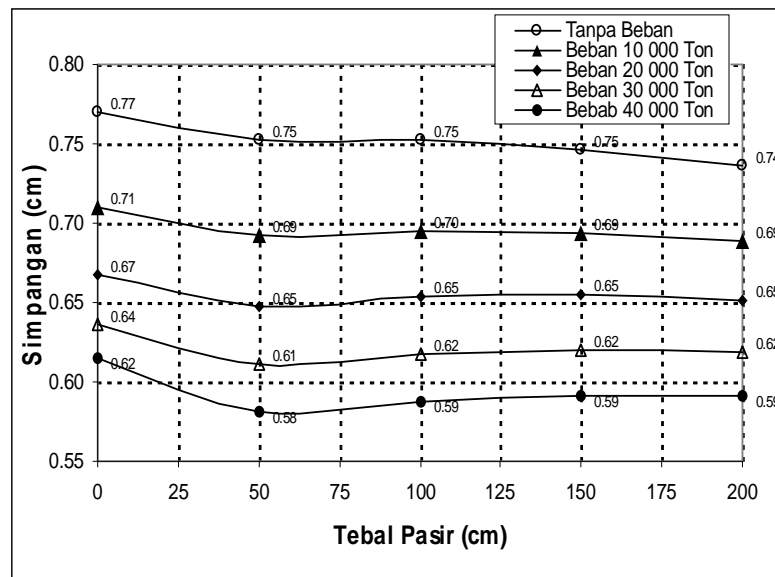


GAMBAR 5. Hubungan tekanan permukaan terhadap simpangan akibat gempa Bucharest

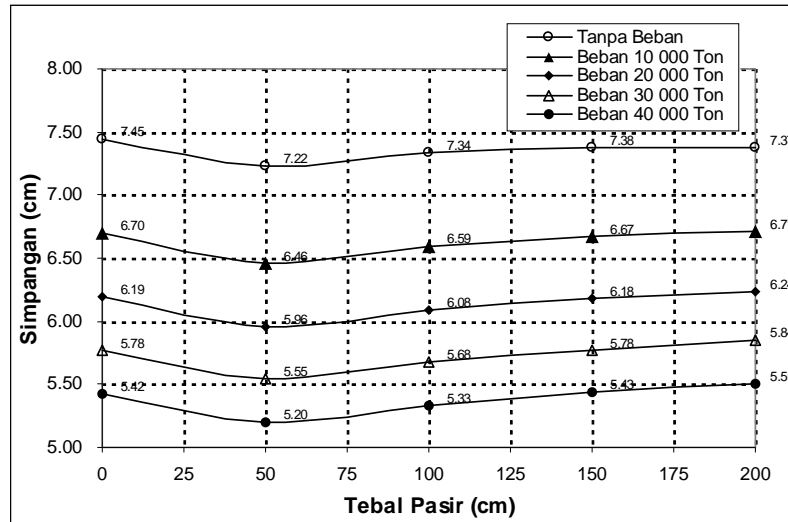
Pengaruh Ketebalan Lapisan Pasir terhadap Simpangan

Hasil analisis hubungan antara tebal pasir terhadap simpangan akibat beban gempa diberikan pada Gambar 6 dan Gambar 7 masing-masing untuk gempa Koyna dan Bucharest. Gambar 6 menunjukkan bahwa simpangan pada lapisan pasir ditunjukkan lebih kecil dibandingkan dengan tanah tanpa menggunakan lapisan pasir, terutama pada tanah tanpa beban. Pada

tanah dengan menggunakan beban, simpangan yang terkecil adalah dengan menggunakan lapisan pasir setebal 50 cm, yaitu prosentase penurunan rerata sebesar 3,67 %. Untuk ketebalan yang lebih besar dari 50 cm masih menunjukkan simpangan yang lebih kecil dari pada tanpa menggunakan pasir dan simpangannya mempunyai kecenderungan stabil. Besarnya prosentase penurunan simpangan jika dibandingkan dengan tanah tanpa menggunakan lapisan pasir rerata adalah sebesar 3,51 %.



GAMBAR 6. Hubungan tebal pasir terhadap simpangan akibat gempa Koyna



GAMBAR 7. Hubungan tebal pasir terhadap simpangan akibat gempa Bucharest

Berdasarkan Gambar 7 akibat gempa Koyna, pada tanah dengan ketebalan pasir 50 cm menunjukkan simpangan yang lebih kecil, jika dibandingkan dengan tanah tanpa menggunakan lapisan pasir, dengan prosentase penurunan rerata sebesar 3,78 %. Pada tanah dengan ketebalan lapisan pasir lebih besar dari 50 cm, simpangan ditunjukkan lebih besar dari pada tanah tanpa menggunakan lapisan pasir, dengan prosentase kenaikan rerata sebesar 0,53 %. Hal tersebut akan terus meningkat dengan semakin besarnya lapisan pasir.

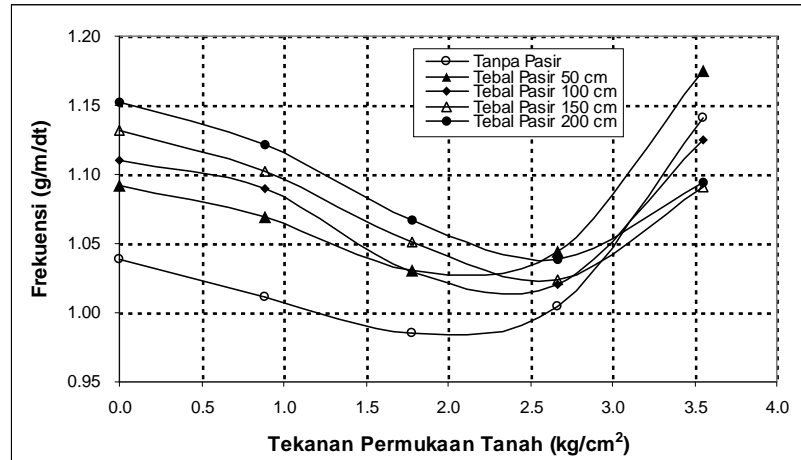
Berdasarkan teori, jika tanah diganti dengan lapisan pasir maka kekakuannya akan meningkat, namun jika tebal pasir diperbesar maka kekakuannya akan semakin kecil. Dengan semakin besarnya tekanan tanah pada permukaan, akan menambah kekakuan tanah. Pada tanah lunak dengan frekuensi tinggi, akan menghasilkan simpangan yang lebih kecil. Pada tanah lunak dengan frekuensi rendah, dapat menghasilkan simpangan yang lebih besar. Begitu juga sebaliknya pada tanah kaku dengan frekuensi tinggi, maka akan menghasilkan simpangan yang lebih besar. Pada tanah kaku dengan frekuensi rendah akan menghasilkan simpangan yang lebih kecil. Dari teori tersebut menunjukkan bahwa dengan menambah ketebalan pasir, belum tentu akan mengurangi simpangannya, karena hal ini tergantung dari frekuensi gempa yang terjadi. Dari hasil analisis ini (Gambar 6 dan Gambar 7) dengan ketebalan pasir 50 cm masih menunjukkan kecenderungan simpangan yang lebih kecil jika dibandingkan tanpa

menggunakan lapisan pasir, baik akibat gempa frekuensi tinggi maupun rendah.

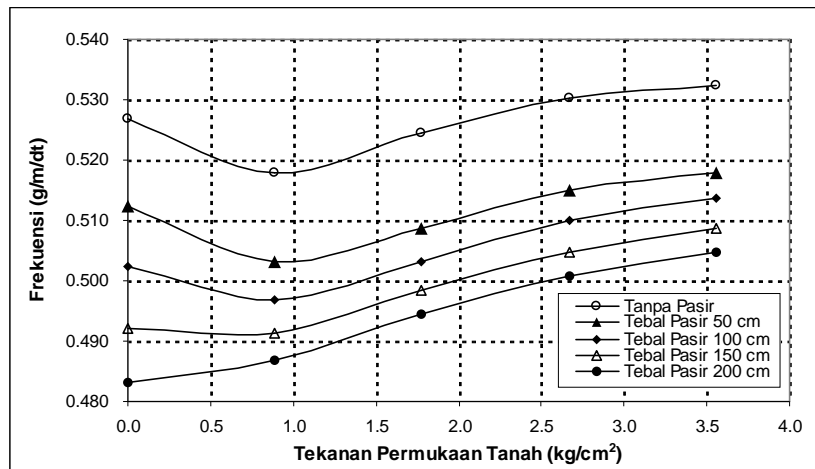
Pengaruh Tekanan Permukaan terhadap Frekuensi Tanah

Frekuensi tanah dapat dihitung dengan cara sebagaimana yang disampaikan oleh Tso et al. (1992), yaitu dengan membandingkan antara percepatan dan kecepatan tanah maksimum, atau sering dikenal dengan konsep a/v ratio, yaitu dengan cara membagi percepatan (cm/dt^2) dengan gravitasi ($980 \text{ cm}/\text{dt}^2$), kemudian dibagi lagi dengan kecepatan yang satuannya telah dijadikan (m/dt). Hasil frekuensi tanah pada kedalaman 300 cm (elevasi -300 cm) ditunjukkan pada Gambar 8 akibat gempa Koyna, dan Gambar 9 akibat gempa Bucharest.

Dari Gambar 8, akibat Gempa Koyna menunjukkan bahwa semakin besar tekanan permukaan hingga $2,5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, frekuensi tanah masih cenderung menurun, sedangkan dengan tekanan lebih besar dari $2,5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, frekuensi cenderung meningkat. Akibat Gempa Bucharest (Gambar 9) menunjukkan bahwa semakin besar tekanan permukaan sampai dengan $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, frekuensi tanah masih cenderung menurun, sedangkan tekanan lebih besar dari $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ maka frekuensi cenderung meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan bertambahnya tekanan tanah (masa bangunan), maka terjadi penurunan frekuensi, yang berarti bahwa masa bangunan akan mengurangi besarnya frekuensi tanah.



GAMBAR 8. Hubungan tekanan tanah terhadap frekuensi akibat gempa Koyna



GAMBAR 9. Hubungan tekanan tanah terhadap frekuensi akibat gempa Bucharest

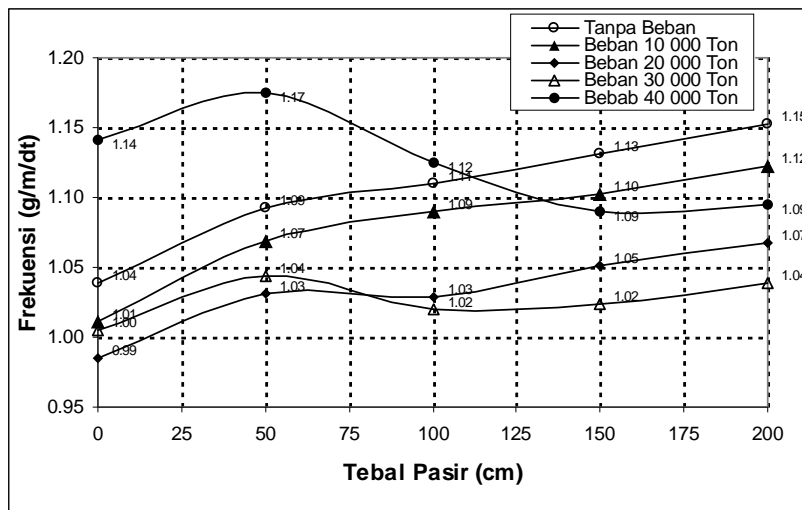
Sebaliknya sampai dengan batas tekanan tertentu, tekanan tanah akan meningkatkan frekuensi. Perubahan frekuensi tersebut diakibatkan oleh adanya perubahan modulus geser dan juga adanya perubahan nilai eigen permulaan (*initial eigenvalue*, λ). Semakin besar modulus gesernya, maka semakin besar pula kekakuan tanahnya. Pada tanah yang mempunyai massa tetap namun kekakuan tanah serta nilai eigen permulaannya semakin besar, maka frekwensinya akan semakin besar pula. Tetapi jika nilai eigen permulaan semakin kecil, massa tetap, dan kekakuannya semakin besar maka kandungan frekuensi yang didapat belum tentu lebih besar namun dapat juga lebih kecil.

Pengaruh Ketebalan Lapisan Pasir terhadap Kandungan Frekuensi Tanah

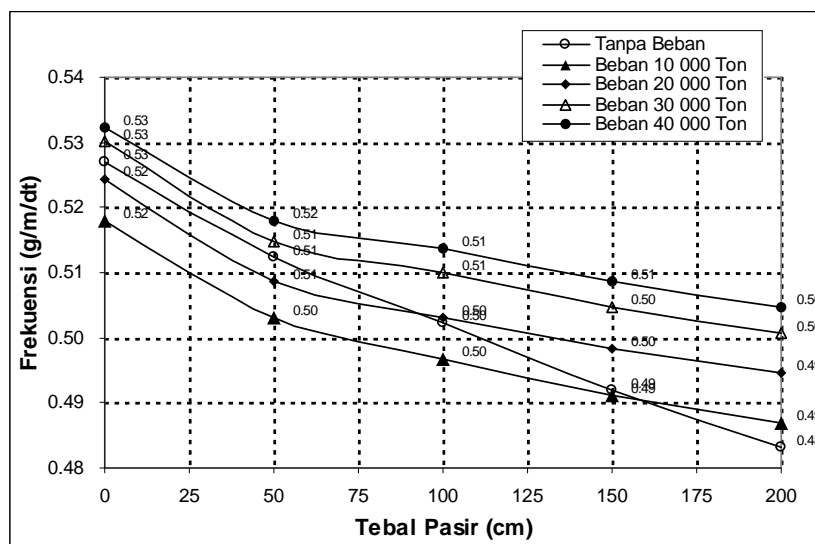
Hasil analisis hubungan antara tebal pasir terhadap frekuensi akibat beban gempa Koyna dan Bucharest digambarkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Berdasarkan Gambar 10 akibat gempa Koyna, tampak bahwa dengan semakin tebal lapisan pasir yang digunakan menunjukkan kandungan frekuensi yang cenderung lebih besar dibandingkan dengan tanah tanpa menggunakan lapisan pasir, kecuali pada tanah dengan beban 40.000 ton. Berdasarkan Gambar 11 akibat gempa Koyna, dengan semakin besar tebal pasir yang dipergunakan kandungan frekuensi cenderung mengalami penurunan.

Berdasarkan teori, semakin tebal lapisan pasir maka kekakuan tanah menjadi semakin kecil. Dengan semakin besarnya tekanan tanah pada permukaan akan menambah kekakuan tanah. Pada tanah yang semakin lunak dengan frekuensi gempa tinggi menghasilkan kandungan frekuensi tanah yang lebih besar. Begitu juga sebaliknya pada tanah yang semakin lunak dengan frekuensi gempa rendah maka akan menghasilkan frekuensi tanah yang lebih kecil. Dari teori tersebut menunjukkan bahwa dengan menambah ketebalan pasir, belum tentu dapat menurunkan frekuensi tanahnya, karena hal tersebut tergantung dari frekuensi gempa yang terjadi.

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan perubahan kandungan frekuensi gempa. Hal itu disebabkan karena berlakunya percepatan tanah yang merupakan turunan kedua dari simpangan tanah, dengan kata lain kecepatan tanah dapat diperoleh dari menjumlahkan luasan grafik percepatan tanah. Simpangan tanah seterusnya dapat diperoleh dengan menjumlahkan luasan grafik kecepatan tanah. Oleh karena itu, kandungan frekuensi percepatan tanah lebih tinggi dari kandungan frekuensi kecepatan tanah serta kandungan frekuensi simpangan tanah. Kandungan frekuensi kecepatan tanah sendiri lebih tinggi dari kandungan frekuensi simpangan tanah.



GAMBAR 10. Hubungan tebal pasir terhadap frekuensi akibat gempa Koyna



GAMBAR 11. Hubungan tebal pasir terhadap frekuensi akibat gempa Bucharest

*Kedekatan Frekuensi Gempa terhadap
Frekuensi Struktur Tanah*

Secara teori, jika dua data gempa dengan percepatan maksimum dan kondisi tanah yang sama, maka simpangan yang terjadi seharusnya sama. Kenyataannya simpangan yang didapatkan adalah jauh berbeda. Hasil tersebut disajikan selengkapnya dalam Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan bahwa ketebalan pasir yang sama dan beban yang sama, akibat dua gempa yang mempunyai percepatan sama, dapat menghasilkan simpangan yang berbeda. Simpangan akibat beban gempa Bucharest lebih besar dari pada Koyna, dengan rasio rata-rata sebesar 9,38 kali. Hal diakibatkan adanya frekuensi gempa yang berbeda dimana gempa Koya mempunyai frekuensi yang lebih besar dari pada gempa Bucharest. Menurut Tso et al. (1992) kandungan frekuensi gempa Koyna sebesar 1,5917 g/m/dt, tergolong gempa yang mempunyai frekuensi tinggi. Kandungan

frekuensi gempa Bucharest sebesar 0,2628 g/m/dt, tergolong gempa dengan frekuensi rendah.

Dari hasil tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa dengan kekakuan tanah yang sama akibat gempa dengan frekuensi tinggi akan menghasilkan simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan gempa akibat frekuensi rendah. Begitu sebaliknya dengan tanah yang mempunyai kekakuan yang sama akibat gempa dengan frekuensi rendah akan menghasilkan simpangan yang lebih besar dibandingkan dengan gempa akibat frekuensi tinggi.

Tabel 3 menunjukkan bahwa akibat gempa Bucharest, semakin besar beban (semakin besar kekakuan tanah) akan menghasilkan simpangan yang cenderung semakin kecil, sedangkan frekuensinya cenderung semakin besar, yang berarti bahwa frekuensi tanah semakin jauh dari frekuensi gempanya, yaitu sebesar 0,2628 g/m/dt.

TABEL 3. Simpangan dan frekuensi pada kedalaman 300 cm.

Tebal Pasir (cm)	Besar Beban (ton)	Simpangan (cm)		Rasio (kali)	Frekuensi (g/m/dt)	
		Bucharest	Koyna		Bucharest	Koyna
0 (tanpa pasir)	0	7.45	0.77	9.67	0.527	1.039
	10000	6.70	0.71	9.43	0.518	1.011
	20000	6.19	0.67	9.27	0.524	0.985
	30000	5.78	0.64	9.07	0.530	1.005
	40000	5.42	0.62	8.81	0.532	1.141
50	0	7.22	0.75	9.61	0.512	1.092
	10000	6.46	0.69	9.33	0.503	1.069
	20000	5.96	0.65	9.20	0.509	1.031
	30000	5.55	0.61	9.09	0.515	1.044
	40000	5.20	0.58	8.96	0.518	1.174
100	0	7.34	0.75	9.75	0.502	1.110
	10000	6.59	0.70	9.47	0.497	1.090
	20000	6.08	0.65	9.31	0.503	1.029
	30000	5.68	0.62	9.19	0.510	1.020
	40000	5.33	0.59	9.07	0.514	1.125
150	0	7.38	0.75	9.89	0.492	1.132
	10000	6.67	0.69	9.62	0.491	1.102
	20000	6.18	0.65	9.44	0.498	1.052
	30000	5.78	0.62	9.31	0.505	1.024
	40000	5.43	0.59	9.19	0.509	1.091
200	0	7.37	0.75	9.88	0.483	1.152
	10000	6.71	0.69	9.68	0.487	1.122
	20000	6.24	0.65	9.53	0.495	1.068
	30000	5.84	0.62	9.42	0.501	1.038
	40000	5.51	0.59	9.32	0.505	1.095

Akibat gempa Koyna, semakin besar beban (semakin besar kekakuan tanah) menghasilkan simpangan yang cenderung lebih kecil, sedangkan frekuensinya juga cenderung semakin kecil. Hal ini berarti bahwa frekuensi tanah semakin jauh dari frekuensi gempanya, yaitu sebesar 1,5917 g/m/dt. Dari penjelasan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin jauh frekuensi tanah terhadap frekuensi gempa dapat mengakibatkan simpangan yang semakin kecil.

Menurut teori, perubahan frekwensi tersebut diakibatkan adanya perubahan modulus geser dan juga adanya perubahan nilai eigen permulaan. Semakin besar modulus gesernya, maka akan semakin besar pula kekakuan tanahnya. Pada tanah yang mempunyai masa tetap namun kekakuan tanah serta nilai eigen permulaannya semakin besar maka frekuensinya akan semakin besar pula. Jika nilai eigen permulaannya semakin kecil, masa tetap, dan kekakuannya semakin besar maka kandungan frekuensi yang didapat belum tentu lebih besar namun dapat juga lebih kecil.

Dilihat dari jenis tanahnya merupakan jenis lempung kelanauan bercampur pasir ditemui hingga kedalaman – 11 m dengan nilai NSPT 14 sampai dengan 19. Lapisan Pasir berlanau ditemui hingga kedalaman – 24,45 m dengan nilai N SPT berkisar antara 57 sampai dengan 60 dengan konsistensi keras. Selain itu lapisan lempung mempunyai nilai PI berkisar antara 16,57 % sampai dengan 22,50 %, menurut Pujianto (2003) nilai tersebut menunjukkan bahwa lapisan tersebut termasuk tanah kohesif dengan *indeks plastisitas sedang sampai tinggi*. Seperti yang telah diketahui bahwa sifat-sifat fisik tanah merupakan faktor yang akan mempengaruhi pada amplifikasi percepatan tanah.

Tanah kohesif lunak dengan plastisitas tinggi akan berkecenderungan berperilaku elastik sehingga semakin besar input energi/gaya yang bekerja pada struktur tanah tersebut maka semakin besar respon seismik (kecepatan dan percepatan) tanah yang akan terjadi. Besarnya respon tanah tersebut juga disebabkan kecilnya redaman material yang ada karena tanah dengan plastisitas tinggi nilai ratio redamannya relatif kecil.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan pembahasan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin besar tekanan permukaan, rasio redaman semakin besar pula. Besarnya peningkatan rasio redaman jika dibandingkan dengan lapisan tanah tanpa menggunakan pasir yaitu antara 19,97 % sampai dengan 29,57 %.
2. Tebal pasir tidak berpengaruh terhadap rasio redaman, namun dengan adanya pasir mengakibatkan rasio redaman stabil, yaitu sebesar 10,21 % gempa Koyna dan 7,87 % gempa Bucharest.
3. Semakin besar tekanan tanah semakin kecil simpangannya, baik akibat gempa dengan frekuensi rendah maupun tinggi. Besarnya penurunan simpangan rata-rata setiap peningkatan tekanan sebesar 1 kg/cm² yaitu sebesar 9,23 %.
4. Semakin tebal lapisan pasir belum tentu akan menghasilkan simpangan yang lebih kecil, tergantung dari frekuensi gempanya. Dengan ketebalan lapisan setebal 50 cm masih menunjukkan kecenderungan penurunan simpangan, baik akibat gempa dengan frekuensi tinggi maupun rendah. Besarnya penurunan rata-rata sebesar 3,67 %.
5. Semakin besar tekanan permukaan sampai dengan tekanan sebesar 1 kg/cm² kandungan frekuensi cenderung menurun, baik akibat gempa Koyna maupun Bucharest.
6. Semakin tebal lapisan pasir yang dipergunakan, Akibat gempa dengan frekuensi tinggi maka kandungan frekuensi tanah cenderung meningkat, sedangkan akibat gempa dengan frekuensi rendah maka kandungan frekuensi tanah cenderung semakin kecil.
7. Ketebalan pasir dan beban yang sama, akibat dua gempa yang mempunyai percepatan sama, menghasilkan simpangan yang berbeda. Simpangan akibat beban gempa Bucharest lebih besar dari pada Koyna, dengan rasio rata-rata sebesar 9.38 kali.
8. Semakin jauh frekuensi tanah terhadap frekuensi gempa mengakibatkan simpangan yang semakin kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Banerjee, P.K. & Butterfield, R. (1987). *Dynamic behaviour of foundations and buried structures*. London: Elsevier Applied Science.
- Das, B. M. (1993). *Principles of soil dynamics*. Boston: PWS-Kent Publishing Company.
- Dowrick, D.J. (1976). *Earthquake Resistant Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Housner, G.W. (1971). Earthquake research needs for nuclear power plants, *Journal of the Power Division, ASCE*, 97(PO1), 77-91.
- Jafarzadeh, F. & Yanagisawa, E. (1996), Effect of load irregularity on energy dissipation of saturated sand models during dynamic loading, *Geotechnical Engineering Bulletin*, 5(5), 71-80.
- Luong, M.P. (1996). Modelling a seismic barrier using soil energy-dissipation, *Geotechnical Engineering Bulletin*, 5(1), 25-31.
- Mahmud, C., Suryolelono, K.B., dan Suhendro, B. (2004). Redaman Getaran Akibat Beban Dinamis Pada Model Tanah Dasar Fondasi Berupa Pasir. *Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan II, PSIT-UGM Yogyakarta*, 184-194.
- Pujiyanto, A. (2003). *Respon seismik lapisan tanah linier dan non linier elastis akibat beban gempa*. Tesis Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Tso, W.K., Zhu, T.J. & Heidebrecht, A.C. (1992). Engineering implication of ground motion a/v ratio, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, 133-144.
- Uang, C.M. & Bertero, V.V. (1988), *Implication of recorded earthquake ground motion on seismic design of building structures*, Report UCB/EERC-88/18. Berkeley: University of California.
- Widodo (1997). *Respon dinamik struktur elastik*, Yogyakarta: UII Press.
- Wood, D.M. (1982). Laboratory Investigation of the Behaviour of Soils under Cyclic Loading. In Pande, G.N., dan Zienkiewicz (Eds.), *Soil mechanics transient and cyclic load* (pp. 513-582). New York: John Wiley & Sons.
- Yamamoto, J.A. & Lade, P.V. (1996). Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(2), 109-119.
- Zeghal, M., Elgamel, A.W., Tang, H.T. & Stepp, J.C. (1995). Lotung downhole array II: evaluation of soil nonlinear properties, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 363 – 378.

PENULIS:

As'at Pujiyanto✉

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jalan Lingkar Selatan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia.

✉Email: a_pujiyanto@umy.ac.id

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga 1 April 2010 dan akan diterbitkan dalam jurnal edisi Mei 2010.