

PENGARUH BEBAN PADA PERMUKAAN TANAH DAN FREKUENSI GEMPA TERHADAP RESPON SEISMIC LINIER ELASTIS LAPISAN TANAH

As'at Pujiyanto

Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Barat, Tamantirto, Bantul Yogyakarta 55183
Telp. 0274-387656 ext 229

ABSTRAKSI

Respon seismik lapisan tanah akibat gempa merupakan suatu parameter gerakan tanah akibat gempa. Selama getaran merambat dari pusat gempa sampai ke permukaan tanah, maka faktor tanah sebagai penghantar getaran mempunyai peran yang sangat penting. Berbagai parameter penting mengenai jenis tanah tersebut meliputi keadaan geologi secara lokal dan kondisi tanah itu sendiri. Di samping itu juga ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap respon tanah, di antaranya adalah indeks plastisitas (PI), kandungan frekwensi gempa serta keadaan beban diatas permukaan lapisan tanah. Beban pada permukaan lapisan tanah akan berpengaruh terhadap kekakuannya. Kekakuan tanah yang mempunyai beban lebih kecil akan berbeda dengan tanah yang mempunyai beban lebih besar. Dengan keadaan seperti itu maka tanah yang mempunyai berat beban bangunan berbeda akan menghasilkan respon yang berbeda juga. Penelitian dengan menggunakan satu data profil tanah tanpa beban dan lima variasi pembebanan telah dilakukan, akibat gempa Koyna dan Bucharets yang telah dinormalisasi, sehingga hanya mempunyai perbedaan frekuensi. Analisis hitungan menggunakan program sederhana dengan dasar metode analisis dinamika struktur "Multi Degree of Freedom" dan pemodelan matematis lapisan tanah berupa model "Shear Building" serta penyelesaian problema dinamik dengan metode numerik "Central Difference". Hasil analisis menunjukkan bahwa Semakin besar beban mengakibatkan simpangan semakin kecil. Dengan percepatan maksimum sama akibat gempa Koyna dan Bucharest, namun mempunyai frekuensi yang berbeda, mengakibatkan respon yang tidak sama besar. Parameter percepatan tanah bukan satu-satunya parameter yang dapat dipakai untuk mengetahui damage potential suatu gempa tetapi terdapat parameter lain yang harus diperhatikan. Kandungan frekuensi gempa Koyna maupun Bucharest terhadap frekuensi struktur masih cukup jauh (tidak berimpit), sehingga jika terjadi gempa dengan frekuensi tersebut struktur tanah tidak akan mengalami resonansi.

Kata kunci : percepatan tanah, beban bangunan, frekuensi, respon seismik

PENDAHULUAN

Apabila terjadi gempa bumi, maka pertama-tama yang merasakan getaran adalah tanah di sekeliling pusat gempa. Getaran akibat gempa kemudian disebarkan ke segala penjuru sampai pada ke lokasi pencatat gempa di permukaan tanah. Selama getaran menjalar dari pusat gempa sampai ke permukaan tanah, maka faktor tanah sebagai penghantar getaran mempunyai peran yang sangat penting.

Berbagai parameter penting mengenai jenis tanah tersebut meliputi keadaan geologi secara lokal dan kondisi tanah itu sendiri. Kondisi geologi dan kondisi tanah tertentu, akan menyebabkan respon tanah akibat gempa menjadi berlainan. Di samping itu juga ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap respon tanah, di antaranya adalah indeks plastisitas (PI), kandungan frekwensi gempa serta keadaan beban di atas permukaan lapisan tanah. Beban pada permukaan lapisan tanah akan berpengaruh terhadap kekakuannya, sehingga akan mengakibatkan respon tanah yang berlainan. Oleh karena itu perlu diteliti percepatan tanah yang mengalami perubahan perilaku akibat adanya pembebanan yang berbeda.

Melihat problematika tersebut maka dapat dirumuskan suatu permasalahan yang akan menjadi objek penelitian ini yaitu Apakah terdapat perbedaan respon antara tanah yang mempunyai beban bangunan berbeda jika terkena beban gempa yang mempunyai frekwensi tinggi dan rendah.

Berdasarkan perumusan masalah tersebut, maka penelitian ini mempunyai tujuan ingin mengetahui apakah terdapat perbedaan respon jika berat beban bangunan pada permukaan tanah bervariasi, dan juga apakah terdapat perbedaan respon jika digunakan dua beban gempa yang mempunyai dua frekuensi yang sangat berlainan, yaitu beban gempa Koyna (1967) yang mempunyai frekuensi tinggi dan beban gempa Bucharets (1977) yang mempunyai frekuensi cukup rendah. Dengan analisis seperti itu akan diketahui besarnya perbedaan nilai respon seismik yang berupa simpangan, kecepatan, percepatan dan juga frekuensi struktur tanah.

Dengan melihat banyaknya faktor yang mempengaruhi respon seismik lapisan tanah, misalnya seperti : Besarnya magnitude gempa, jarak episenter gempa, properti lapisan tanah, kondisi topografi lapisan tanah, ketebalan lapisan tanah, jenis mekanisme terjadinya gempa, dan kondisi geologi tanah yang dilalui gelombang gempa, maka agar analisis ini menjadi sederhana dan lebih mudah dipahami namun tetap realistis, perlu adanya batasan masalah. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah : tanah berperilaku linier elastis (tidak memperhitungkan adanya perubahan massa dan kekakuan setelah terjadi gempa), tidak memperhitungkan adanya peningkatan tekanan air pori tanah akibat terjadinya gempa, tidak memperhitungkan jenis mekanisme terjadinya gempa, lapisan tanah dianggap tidak mengalami defleksi dalam arah vertikal, lapisan tanah ditinjau dalam dua dimensi, lapisan tanah dianggap berperilaku seperti *Shear Building*, serta gempa terjadi pada *base rock* dengan cara melakukan *scale down* rekaman gempa dipermukaan tanah.

Karakteristik dan Dinamik

Untuk mempelajari tentang perilaku gerakan tanah (*ground motion*), maka perlu diketahui tentang karakteristik statik dan dinamik lapisan tanah tempat gelombang gempa merambat. Semua karakter tersebut akan berpengaruh pada gerakan tanah dan respon struktur/bangunan di atas permukaan tanah.

Karakteristik Statik, Secara umum tanah dibedakan menjadi tanah berpasir (kohesi $c = 0$) dan tanah lempung murni ($\phi = 0$). Karena pasir tidak mempunyai kohesi, maka pada saat terjadi gempa, butir-butir pasir dapat memadat ataupun bahkan mengembang dengan mudah seperti pada *liquefaction*, yaitu peristiwa hilangnya gesekan antar butir akibat meningkatnya tekanan air pori sebagai akibat guncangan gempa.

Karena tanah pasir bersifat kasar maka tahanan geser tanah pasir bertambah sehingga akan menambah pula sudut gesek dalamnya. Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat geser tanah pasir adalah: ukuran butir, air yang terdapat di dalam butirannya, kekerasan butirannya, angka pori atau kekakuan relatifnya, distribusi ukuran butirnya, dan bentuk butirannya.

Dari faktor-faktor yang mempengaruhi kuat geser tanah pasir di atas, yang paling besar pengaruhnya adalah nilai angka pori, karena angka pori akan berpengaruh terhadap kerapatannya. Pada pengujian geser langsung maupun triaksial, bila angka pori rendah atau kerapatan relatif tinggi, maka nilai kuat geser akan tinggi pula. Jika dua macam tanah pasir mempunyai kerapatan relatif sama, tetapi gradasinya berlainan, maka pasir yang mempunyai gradasi lebih baik akan mempunyai sudut gesek dalam yang lebih besar. Ukuran butiran untuk pasir dengan angka pori yang sama, tidak banyak berpengaruh pada sudut gesek dalamnya. Jadi pasir halus dan pasir kasar pada angka pori yang sama akan mempunyai sudut gesek yang sama.

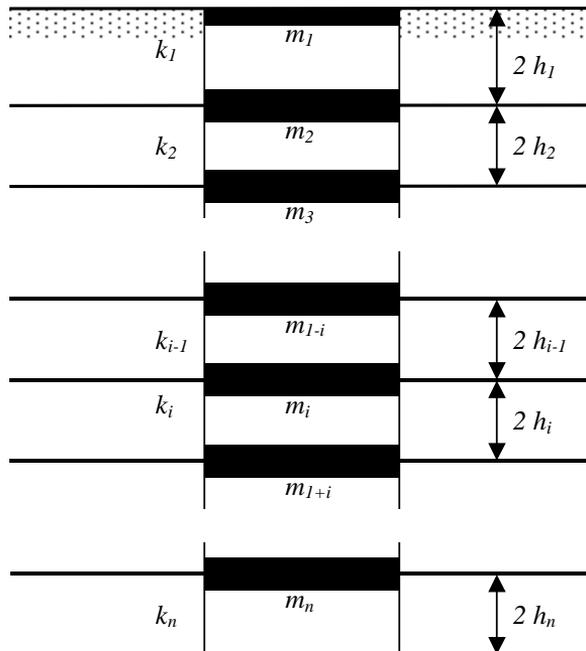
Tanah lempung umumnya terdiri atas butir-butir yang sangat halus dari jenis mineral yang mempunyai nilai kohesi. Sifat kohesi ini adalah suatu nilai interaksi antara mineral-mineral penyusun lempung dengan air. Dengan adanya interaksi tersebut maka akan terjadi lekatan/rekatan antara butir yang satu dengan butir yang lain. Peristiwa inilah yang menyebabkan lempung mempunyai nilai kohesi tertentu.

Karakteristik Dinamik, Respon tanah akibat beban dinamik yang dilakukan pada percobaan di laboratorium adalah untuk mensimulasi perilaku elemen tanah pada kedalaman tertentu akibat getaran gelombang gempa. Simulasi yang dilakukan umumnya menganggap bahwa gelombang geser merambat secara vertikal sehingga gelombang geser tersebut akan mengakibatkan suatu elemen tanah berubah-ubah bentuk akibat adanya gaya geser bolak balik.

Massa dan Kekuatan Lapisan Tanah

Jika suatu profil tanah terdiri dari beberapa lapis, maka lapisan tanah tersebut dapat dimodel sebagai suatu massa tergumpal (*lump mass*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Massa tersebut dapat dianggap sebagai suatu bangunan geser dimana prinsip bangunan geser (*shear building*) mengasumsikan bahwa balok

pada lantai tingkat dianggap tetap horisontal baik sebelum maupun sesudah terjadi penggoyangan.



Gambar 1. Massa tergumpal pada lapisan horizontal.

Dari Gambar 1 tersebut massa ($m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$) dan kekakuan lapisan tanah dapat dihitung dengan rumus pendekatan seperti ditunjukkan pada Persamaan 1, 2, dan 3 (Idriss dan Seed, 1968 dalam Das, 1993).

$$m_1 = \frac{\gamma_1 h_1}{g} \quad (1)$$

$$m_i = \frac{\gamma_{i-1} h_{i-1} + \gamma_i h_i}{g} \quad \text{dengan } i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$k_i = \frac{G}{2h} \quad \text{dengan } i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

dengan: m_i = massa tergumpal yang terletak pada lapisan tanah ke-i.

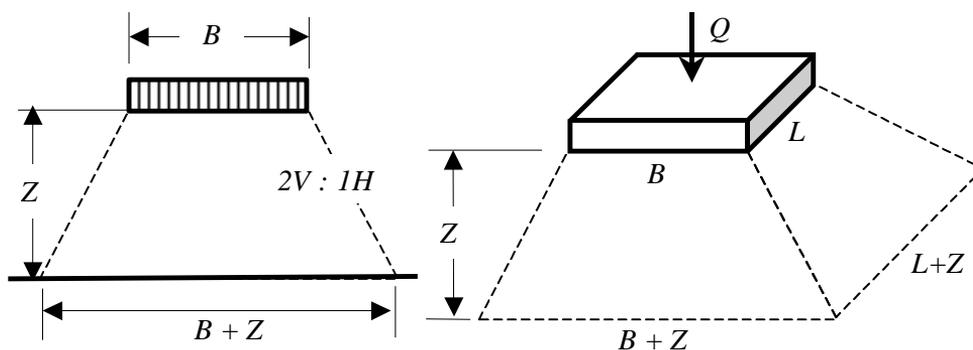
k_i = kekakuan yang menghubungkan massa m_i dan m_{i+1} .

γ_i = berat satuan tanah pada lapisan ke-i.

h_i = setengah kedalaman pada lapisan tanah ke-i.

Metode Penyebarann Beban

Apabila di atas lapisan tanah terdapat beban bangunan maka akan menambah besarnya tegangan yang terjadi. Berbagai macam cara telah digunakan untuk menghitung pengaruh tegangan akibat beban fondasi. Salah satu cara pendekatan yang sangat sederhana untuk menghitung tambahan tegangan beban di permukaan diberikan oleh Boussinesq (1885), yaitu dengan cara membuat garis penyebaran beban $2V : 1H$ (2 vertikal dibanding 1 horisontal). Dalam cara ini dianggap beban pondasi Q didukung oleh pyramid yang mempunyai kemiringan sisi $2V : 1H$, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Penyebaran beban $2V : 1H$ (Boussinesq, 1885).

Cara pendekatan ini, menghasilkan nilai tambahan tegangan vertikal yang dinyatakan dalam Persamaan 4 dan 5.

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{(L+Z)(B+Z)} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{qLB}{(L+Z)(B+Z)} \quad (5)$$

dengan :

- $\Delta\sigma_z$ = tambahan tegangan vertikal.
- Q = beban total pada dasar pondasi.
- q = beban terbagi rata pada dasar pondasi.
- L = panjang area pondasi.
- B = lebar area pondasi.
- Z = kedalaman yang ditinjau.

Cara ini dapat juga untuk menghitung pondasi berbentuk jalur memanjang. Dalam hal ini, bentuk penyebaran beban yang berupa pyramid berubah menjadi berbentuk trapezoidal. Selanjutnya, tambahan vertikal pada pondasi memanjang dinyatakan dengan Persamaan 6.

$$\Delta\sigma_z = \frac{qB}{(B + Z)} \quad (6)$$

Dalam menghitung besarnya tegangan total yang terjadi dalam tanah, setelah tegangan vertikal yang diperoleh dari persamaan-persamaan Boussinesq, Westergaard, maupun dari teori penyebaran $2V : 1H$ diperoleh, hasilnya masih harus ditambahkan dengan tegangan akibat beban tanah di kedalaman yang ditinjau (yaitu tekanan *overberden*). Hal ini perlu dimengerti, karena pada cara elastis dianggap bahwa tanah yang sedang mengalami pembebanan tidak mempunyai berat.

Persamaan Differensial Gerakan MDOF

Untuk memperoleh persamaan differensial gerakan dipakai prinsip keseimbangan dinamik pada suatu massa yang ditinjau. Persamaan gerakan tersebut umumnya disusun berdasarkan atas goyangan struktur menurut mode pertama. Setelah nilai mode shape didapat maka dengan mudah nilai percepatan tanah, kecepatan tanah dan simpangan tanah diperoleh, berdasarkan Persamaan 7.

$$\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j \ddot{Z}_j + \{\phi\}_j^T [C] \{\phi\}_j \dot{Z}_j + \{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_j Z_j = -\{\phi\}_j^T [M] \{I\}_j \ddot{y}_t \quad (7)$$

Jika,

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

maka Persamaan 7 dapat menjadi Persamaan 8.

$$M_j^* \ddot{Z}_j + C_j^* \dot{Z}_j + K_j^* Z_j = -P_j^* \ddot{y}_t \quad (8)$$

Jika Persamaan 8 dibagi dengan M_j^* , dengan

$$\frac{C_j^*}{M_j^*} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_j, \quad \frac{K_j^*}{M_j^*} = \omega_j^2, \quad \text{dan} \quad \frac{P_j^*}{M_j^*} = \Gamma_j, \quad (9)$$

maka dapat ditulis dalam bentuk differensial menjadi Persamaan 10

$$\ddot{Z}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{Z}_j + \omega_j^2 Z_j = -\Gamma \ddot{y}_t \quad (10)$$

dengan :

\dot{Z} = modal aplitudo, yang ditulis dengan Persamaan 11 s/d Persamaan 13.

$$Z = g * \Gamma_j \quad (11)$$

$$\dot{Z} = \dot{g} * \Gamma_j \quad (12)$$

$$\ddot{Z} = \ddot{g} * \Gamma_j \quad (13)$$

dengan :

Γ = partisipasi mode.

Dengan mensubstitusi Persamaan 11 s/d Persamaan 13 ke dalam Persamaan 10, maka didapat Persamaan 14.

$$\ddot{g}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{g}_j + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (14)$$

Untuk menghitung besarnya \ddot{g}_j dapat digunakan metode *central difference*, sehingga diperoleh Persamaan 15.

$$\dot{g}_j = \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} \quad \text{dan} \quad \ddot{g}_j = \frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} \quad (15)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan 15 ke dalam Persamaan 14 diperoleh Persamaan 16 yang dapat menghasilkan nilai g_{j+1} , yang dapat ditulis menjadi Persamaan 17.

$$\frac{g_{j+1} - 2g_j + g_{j-1}}{(\Delta t)^2} + 2\xi_j \omega_j \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2\Delta t} + \omega_j^2 g_j = -\ddot{y}_t \quad (16)$$

$$\left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j+1} = -\ddot{y}_t \left[\omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] g_j - \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_j \omega_j}{2\Delta t} \right] g_{j-1} \quad (17)$$

Persamaan 17 dapat ditulis menjadi Persamaan 18.

$$g_{j+1} = \frac{-\ddot{y}_t - a g_j - b g_{j-1}}{\hat{k}} \quad (18)$$

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 = frekwensi sudut (rad/dt).

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

Dengan demikian diperoleh persamaan simpangan, kecepatan, dan percepatan yang ditulis berturut-turut menjadi Persamaan 19, Persamaan 20, dan Persamaan 21.

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

$$\dot{y} = [\phi] * \{\dot{Z}\} \quad (20)$$

$$\ddot{y} = [\phi] * \{\ddot{Z}\} \quad (21)$$

dengan : ϕ = mode shape.

y = simpangan tanah.

\dot{y} = kecepatan tanah

\ddot{y} = percepatan tanah.

Kandungan Frekuensi Gempa

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

Kandungan frekuensi kemudian diketahui menjadi parameter penting selain durasi gempa (Tso, dkk. 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 bukunya (Uang dan Bertero 1988) untuk mendiskripsikan *damage potential* suatu gempa.

Konsep lain yang cukup sederhana untuk mendeteksi kandungan frekuensi gempa adalah seperti yang disampaikan oleh Tso dkk. (1992). Konsep yang dimaksud adalah *A/V ratio* yaitu dengan memakai perbandingan antara percepatan dan kecepatan tanah maksimum. Gazaetas (1987) dalam buku (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). Dengan demikian A/V ratio dapat juga dipakai untuk menentukan kandungan frekuensi gempa secara lebih mudah. Kriteria inilah yang dipakai dalam menghitung kandungan frekuensi tanah.

METODOLOGI PENELITIAN

Model dan Data Struktur.

Data tanah yang dipergunakan di dalam analisis ini diambil dari daerah Dermaga Pelabuhan Pangkal Balam Bangka sebagaimana tergambar pada Gambar 3. Untuk mengetahui pengaruh beban bangunan terhadap respon seismik pada lapisan tanah, maka perlu dipergunakan variasi beban bangunan yang berbeda, sehingga mempunyai tegangan yang berbeda pula. Dengan kondisi seperti itu, maka pengaruh beban bangunan terhadap respon seismik akan dapat dideteksi. Jika diasumsi ukuran bangunan 60m x 18m, beban hidup dan beban mati dianggap 1,2 t/m², maka besarnya beban untuk :

- Tanah tanpa beban bangunan (*free field*) sebesar 0 Ton.
- Tanah dengan beban bangunan 10 lantai = $60 \times 18 \times 1,2 \times 10 = 12\ 960$ ton \approx 13 000 ton.
- Tanah dengan beban bangunan 20 lantai = $60 \times 18 \times 1,2 \times 20 = 25\ 920$ ton \approx 26 000 ton.
- Tanah dengan beban bangunan 30 lantai = $60 \times 18 \times 1,2 \times 30 = 38\ 880$ ton \approx 39 000 ton.
- Tanah dengan beban bangunan 40 lantai = $60 \times 18 \times 1,2 \times 40 = 51\ 840$ ton \approx 52 000 ton.

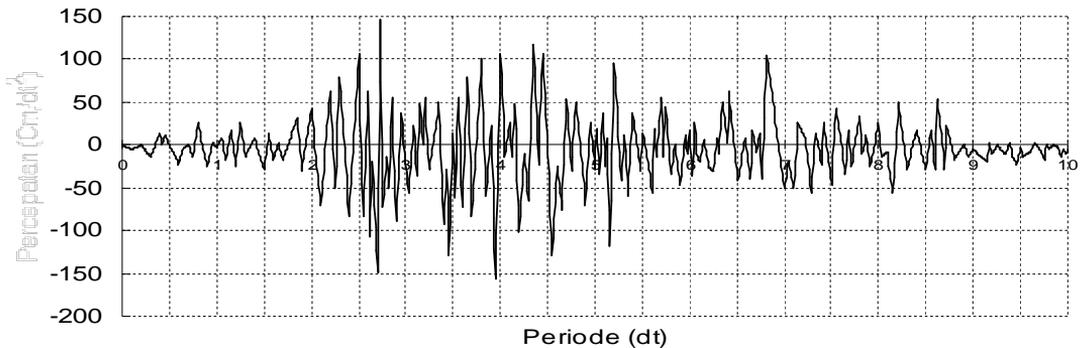
± 0.00 cm	Pasir kasar berlempung abu-abu kehitaman, lunak. $\gamma_b = 1,93 \text{ gr/cm}^3$ $e = 0,818$ $PI = 0$ $\phi = 01^0 43' = 1,72$	$\gamma_d = 1,484 \text{ gr/cm}^3$ $G_s = 2,697$ $OCR = 1$
- 300 cm	Lanau berlempung merah keabu-abuan, agak lunak. $\gamma_b = 1,625 \text{ gr/cm}^3$ $e = 1,441$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

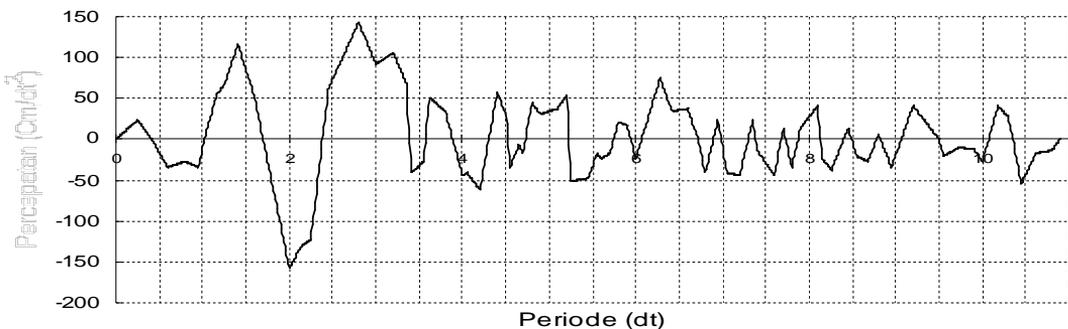
Data Gempa.

Untuk mendeteksi pengaruh massa bangunan terhadap respon seismik, maka dalam hal ini akan dipakai 2 beban gempa yang berbeda dan mempunyai kandungan frekuensi yang berbeda pula, dan telah discale down terlebih dahulu sehingga mempunyai percepatan yang sama sebesar $156,8 \text{ cm/dt}^2$. Adapun gempa-gempa tersebut adalah sebagai berikut :

- Gempa Koyna, India, 1967, yaitu gempa yang mempunyai Magnitude 6,5 Richter, jarak episentrum 5,6 km, dan percepatan maksimum sebesar 548,80 cm/dt^2 . Beban gempa yang diambil adalah rekaman percepatan tanah horisontal di Koyna Dam yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu panjang Dam. Menurut Tso dkk. (1992), gempa tersebut tergolong gempa yang mempunyai frekuensi tinggi. Grafik yang telah dinormalisasi disajikan pada Gambar 4.
- Gempa Bucharest, Rumania, 1977 yaitu gempa yang mempunyai Magnitude 6,5 Richter dan jarak episentrum 5,6 km percepatan maksimum sebesar 225,4 cm/dt^2 . Berdasarkan kriteria yang disusun oleh Tso dkk. (1992), gempa tersebut tergolong gempa yang mempunyai frekuensi rendah. Grafik yang telah dinormalisasi disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Rekaman Gempa Koyna Scale Down 0,10 (10 dt).



Gambar 5. Rekaman Gempa Bucharest Scale Down 0,2435 (11 dt).

Alat Analisis.

Penelitian ini didasarkan atas analisis dinamika struktur dengan model 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 berupa : simpangan, kecepatan dan percepatan.

Cara Analisis.

Pertama yang perlu dihitung adalah kekakuan tiap-tiap lapis tanah. Massa dan kekakuan untuk setiap lapis tanah dapat dihitung dengan memakai prinsip *shear buildings* berdasarkan persamaan 1 dan 3. Tambahan tegangan vertikal akibat adanya beban pada permukaan dapat digunakan persamaan 5. Setelah nilai koordinat *mode shapes* dihitung dengan program, maka proses analisis berikutnya adalah integrasi secara numerik atas persamaan independen seperti pada persamaan 14. Metode *central difference* dipakai untuk menghitung nilai g_j seperti terlihat pada persamaan tersebut.

Untuk dapat menghitung faktor amplitudo tiap-tiap *mode*, Z_j maka nilai partisipasi tiap-tiap mode (*mode participation factors*) dapat dihitung dahulu dengan menggunakan persamaan 10. Nilai faktor amplitudo Z_j merupakan fungsi dari waktu. Selanjutnya simpangan horisontal, kecepatan dan percepatan pada tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 19, 20, dan 21.

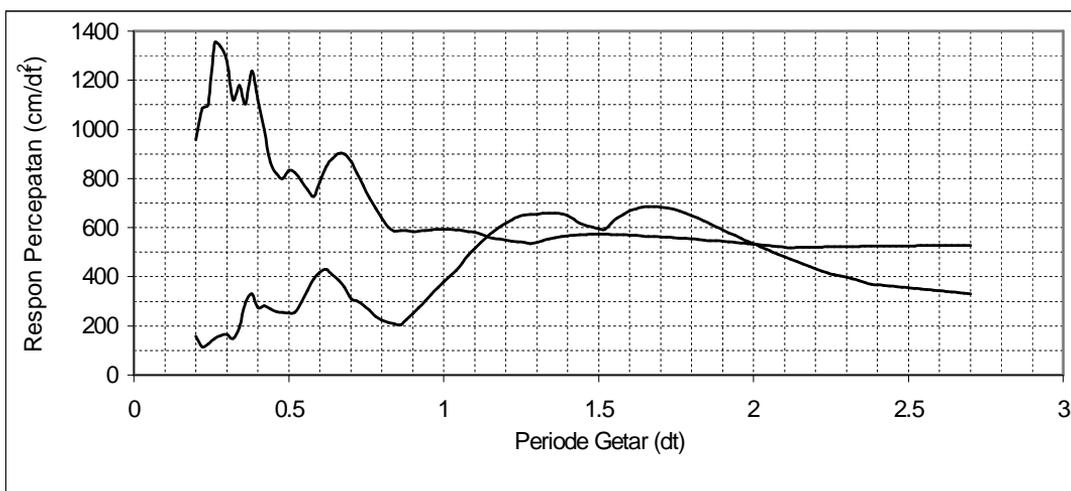
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Kandungan Frekuensi pada Respon Spektrum Beban Gempa.

Selain dengan cara seperti yang telah dikemukakan sebelumnya, maka respon spektrum sebetulnya juga dapat dipakai untuk mengetahui kandungan/sebaran frekuensi gempa. Studi intensif seperti yang dilakukan oleh Seed dkk. (1976), Sucuoglu dan Nurtug (1995) menunjukkan bahwa kondisi/properti tanah dimana gelombang gempa merambat. Dengan demikian respon spektrum dapat dipakai untuk mendeteksi kandungan frekuensi gempa.

Perbandingan bentuk respon spektrum gempa Koyna dan Bucharest disajikan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut tampak bahwa distribusi respon spektrum gempa Koyna mencapai puncak-puncaknya pada rentang yang relatif sempit dan berada pada periode getar antara 0,20-0,40 dt. Hal ini sesuai dengan teori secara umum atau seperti yang disampaikan oleh Kramer (1996) bahwa gempa bumi yang mempunyai kandungan frekuensi relatif tinggi, puncak-puncak spektrumnya mempunyai rentang yang relatif sempit. Hal ini juga dikatakan bahwa periode dominan (*predominant period*) gempa relatif lebih jelas letaknya, karena puncak spektrumnya relatif sempit., yaitu sebesar $T = 0.26$ dt. Sedangkan gempa Bucharest sangat berbeda dibanding dengan gempa Koyna. Bentuk spektrum gempa ini cenderung menyebar pada rentang yang relatif lebar yaitu antara 1,35 – 1,68 dt. Walaupun frekuensi gempa menyebar pada rentang yang relatif lebar, tetapi frekuensi yang dianggap dominan umumnya juga dapat diprakirakan, yaitu

sebesar $T = 1.68$ dt. Dari dua data gempa tersebut berarti bahwa tidak ada periode getar yang dominan atau tidak ada frekuensi yang dominan. Hasil seperti ini senada seperti yang disampaikan oleh Kramer (1996). Dengan perbedaan kandungan frekuensi tersebut, diharapkan keduanya akan mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap respon struktur.

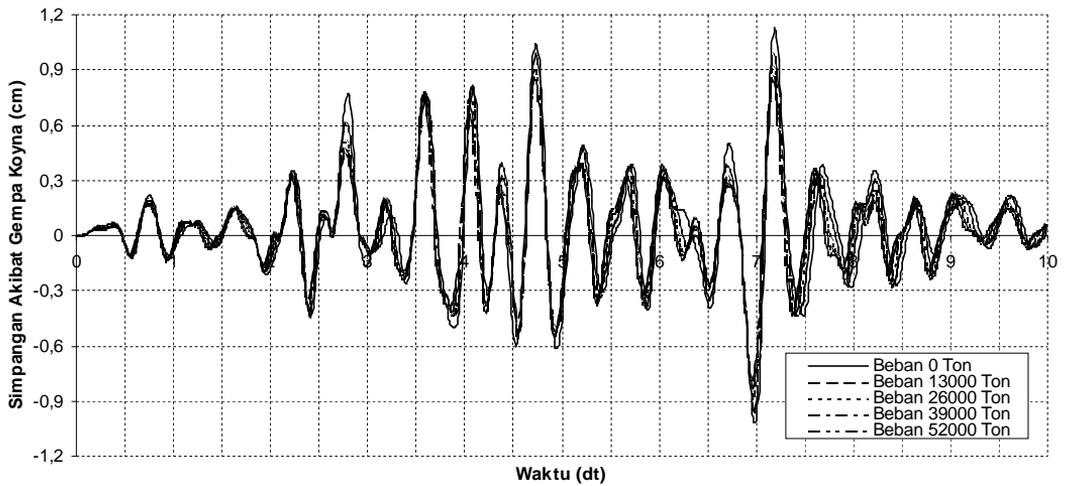


Gambar 6. Respon Spektrum

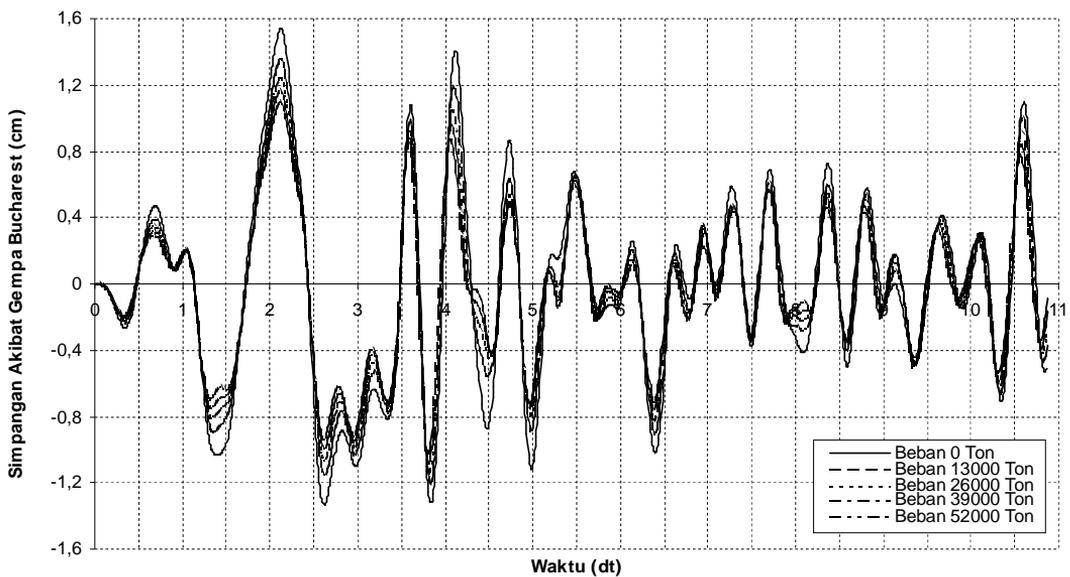
Efek Normalisasi Percepatan Tanah terhadap Simpangan.

Normalisasi gempa yang dimaksud dalam hal ini adalah bahwa semua percepatan tanah akibat gempa Koyna dan Bucharest diskala sedemikian sehingga percepatan tanah maksimumnya sama dengan gempa Bucharest, yaitu sebesar 156.8 cm/dt^2 . Dengan percepatan tanah yang sama, maka akan dapat diketahui seberapa besar pengaruh gempa masing-masing terhadap respon (simpangan, kecepatan, dan percepatan) pada struktur yang sama dengan struktur sebelumnya. Kadang-kadang hal tersebut juga diistilahkan sebagai *damage potensial* atau daya rusak gempa terhadap struktur. Untuk membahas masalah tersebut dapat ditinjau dari hasil perbandingan simpangan horisontalnya.

Hasil simpangan tanah lapis teratas akibat gempa Koyna tanpa beban dan dengan beban bangunan sebesar 13000 ton, 26000 ton, 39000 ton, dan 52000 ton yang telah digabung menjadi satu disajikan pada gambar 7, sedangkan akibat gempa Bucharest disajikan pada Gambar 8. Perbandingannya selengkapnya disajikan pada Tabel 1.



Gambar 7. Simpangan vs. Waktu lapis teratas akibat Gempa Koyna.



Gambar 8. Simpangan vs. Waktu lapis teratas akibat Gempa Bucharest.

Dari kedua kondisi tersebut simpangan tanah berada pada satu *phase* artinya simpangan horisontal untuk semua beban yang berbeda terjadi pada arah yang sama, baik akibat gempa Koyna maupun Bucharest.

Besarnya perbandingan simpangan akibat gempa Bucharest antara 1,28 sampai dengan 1,39 kali lebih besar dari pada gempa Koyna, perbandingan tersebut mestinya sama karena percepatan gempanya sama, namun ternyata hasilnya tidak sama. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa parameter percepatan tanah bukan satu-

satunya parameter yang dapat dipakai untuk mengetahui *damage potential* suatu gempa tetapi terdapat parameter lain yang harus diperhatikan. Kondisi tersebut juga ditunjukkan adanya perbandingan kecepatan dan percepatan.

Tabel 1. Selisih Respon maksimum antara tanah akibat gempa Bucharest terhadap Koyna

Beban (Ton)	Simpangan			Kecepatan			Percepatan		
	Bucharest	Koyna	Selisih	Bucharest	Koyna	Selisih	Bucharest	Koyna	Selisih
0	1,542	1,128	1,37	15,975	16,393	0,97	228,636	328,791	0,70
13000	1,361	0,982	1,39	14,368	15,839	0,91	208,578	346,779	0,60
26000	1,248	0,911	1,37	12,623	15,311	0,82	175,676	367,358	0,51
39000	1,167	0,858	1,36	10,702	15,461	0,69	175,778	376,718	0,47
52000	1,095	0,853	1,28	10,058	16,077	0,63	169,567	370,514	0,46

Oleh karena itu kalau menganggap bahwa percepatan tanah merupakan satu-satunya parameter gempa adalah tidak tepat, atau dapat dikatakan bahwa parameter percepatan tanah untuk mendiskripsikan *damage potential* suatu gempa tidaklah selalu valid. Hasil tersebut tidaklah bersifat kasuistik melainkan dapat menggejala sebagaimana ditunjukkan oleh hasil pengamatan kerusakan struktur akibat gempa di lapangan seperti disampaikan oleh Housner (1971) pada gempa Parkfield di California pada tahun 1966 dan gempa Elcentro pada tahun 1940. Gempa Parkfield mempunyai percepatan tanah maksimum kurang lebih 0.48 g, namun demikian kerusakan yang terjadi hanya relatif kecil (*little damage*) jika dibandingkan dengan gempa Elcentro yang mempunyai percepatan tanah maksimum 0.32g. Hal inilah yang disebut oleh para ahli sebagai suatu paradoks, karena percepatan tanah akibat gempa yang jauh lebih besar justru tidak mengakibatkan kerusakan bangunan yang berarti. Para peneliti waktu itu menyimpulkan bahwa guncangan gempa yang kuat tetapi hanya terjadi waktu yang relatif singkat (pada gempa Parkfield) tidak akan mengakibatkan kerusakan. Kemungkinan yang kedua adalah adanya redaman yang cukup kuat pada struktur, sehingga respon struktur/kerusakan dapat dieliminasi.

Lebih jauh Housner (1971) juga memberikan bukti ketidak akuratan percepatan tanah akibat gempa yaitu gempa Koyna di India pada tahun 1967. Percepatan tanah maksimum akibat gempa pada Dam Koyna kurang lebih mencapai 0.5 g, namun kerusakan pada dam relatif kecil walaupun dam hanya didisain dengan gaya horisontal 0.05 g (berdasarkan teori metode ekuivalen statik). Bukti lain menunjukkan bahwa kerusakan kecil juga hanya terjadi pada bangunan 3-tingkat yang berjarak 20 km dari patahan (pusat gempa) dengan estimasi percepatan tanah sebesar 0.3 g. Berdasarkan bukti-bukti di lapangan, Tso dkk. (1992), Paulay dan Priestley (1992), Rodriguez (1994) mengatakan hal yang senada. Ketidak akuratan tanah sebagai parameter gempa dapat dijelaskan dengan membuat suatu kajian/analisis dengan memperhatikan kedekatan antara frekuensi beban dan frekuensi struktur.

Pengaruh Pembebanan terhadap Simpangan.

Dari hasil simpangan yang disajikan pada Tabel 1 tersebut, terlihat bahwa semakin besar beban, simpangan yang terjadi semakin kecil baik akibat gempa Bucharest maupun Koyna. Hal tersebut sesuai dengan teori getaran, yang dirumuskan dengan $\omega = \lambda \sqrt{k/m}$, dengan semakin besarnya beban maka struktur akan mempunyai kekakuan (k) lebih besar pula, jika massa (m) bertambah besar dan initial eigenvalue (λ) tetap, serta menghasilkan Frekwensi natural (ω) yang lebih besar, maka menurut persamaan $T = 2\pi/\omega$ akan menghasilkan periode getar (T) yang lebih kecil. Jika periode getar kecil dan nilai frekwensi natural besar maka simpangan horisontalnya akan menjadi lebih kecil. Disamping itu dengan bertambah besarnya kekakuan tanah akan mempunyai redaman yang lebih besar pula, sehingga kemampuan untuk meredam getaran semakin besar pula. Dari kondisi tersebut dapat disimpulkan, bahwa semakin besar beban maka akan mengakibatkan simpangannya semakin kecil

Kandungan Frekuensi Struktur terhadap Simpangan.

Kandungan frekuensi struktur dapat dihitung dengan cara sebagaimana yang disampaikan oleh Tso dkk. (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 selengkapnya akibat gempa Bucharest disajikan pada Tabel 2, dan akibat gempa koyna disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Kandungan Frekuensi A/V rasio Akibat Gempa Bucharest.

Beban (Ton)	Simpangan (cm)	Kecepatan (cm/dt)	Percepatan (cm/dt ²)	Aplikasi (%)	Frekuensi (cps)
0	1,5421	15,975	228,636	45,81	1,46
13000	1,3608	14,368	208,578	33,02	1,48
26000	1,2477	12,623	185,676	18,42	1,50
39000	1,1670	10,702	175,778	12,10	1,68
52000	1,0953	10,058	169,567	8,14	1,72

Tabel 3. Kandungan Frekuensi A/V rasio Akibat Gempa Koyna.

Beban (Ton)	Simpangan (cm)	Kecepatan (cm/dt)	Percepatan (cm/dt ²)	Aplikasi (%)	Frekuensi (cps)
0	1,1280	16,393	328,791	109,69	2,05
13000	0,9817	15,839	346,779	121,16	2,23
26000	0,9108	15,311	367,358	134,28	2,45
39000	0,8577	15,461	379,718	140,25	2,49
52000	0,8534	16,077	370,514	136,30	2,35

Frekuensi dominan gempa Bucharest pada *base rock* sebesar 0,26 g/m/dt, sedangkan kandungan frekuensi pada lapis teratas antara 1,46 sampai dengan 1,72. Frekuensi dominan gempa Koyna pada *base rock* sebesar 1,68 g/m/dt, sedangkan kandungan frekuensi pada lapis teratas antara 2,05 sampai dengan 2,49. Dari Tabel 2 dan Tabel 3 tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban, frekuensi pada lapis teratas semakin menjauhi frekuensi dominannya. Sedangkan simpangan menunjukkan bahwa semakin besar beban, simpangan yang terjadi pada lapis teratas semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan semakin menjauhinya frekuensi lapis tanah teratas terhadap frekuensi dominan akan mengakibatkan semakin kecil simpangannya. Sebaliknya dengan semakin dekatnya frekuensi struktur terhadap frekuensi gempa mengakibatkan simpangan cenderung semakin besar.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa akibat gempa Bucharest maupun Koyna frekuensi struktur tidak ada yang berimpit dengan frekuensi gempa, yang berarti bahwa r tidak sama dengan 1, sehingga dapat disimpulkan bahwa akibat gempa Koyna dan Bucharest tidak akan terjadi resonansi, yang berarti bahwa struktur tanah tidak akan hancur total. Selisih frekuensi juga masih masih jauh (tidak berdekatan) sehingga simpangan yang terjadi tidak ada yang mengalami pembesaran. Hal inilah yang dikatakan bahwa frekuensi yang terjadi mempunyai efek positif terhadap respon elastik struktur.

KESIMPULAN

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

1. Semakin besar beban mengakibatkan simpangan semakin kecil, baik akibat gempa dengan frekuensi tinggi maupun frekuensi rendah.
2. Dengan percepatan maksimum sama akibat gempa Koyna dan Bucharest, namun mempunyai frekuensi yang berbeda, mengakibatkan respon yang tidak sama besar.
3. Parameter percepatan tanah bukan satu-satunya parameter yang dapat dipakai untuk mengetahui *damage potential* (daya rusak) suatu gempa tetapi terdapat parameter lain yang harus diperhatikan.
4. Kandungan frekuensi gempa Koyna maupun Bucharest terhadap frekuensi struktur masih cukup jauh (tidak berimpit), sehingga jika terjadi gempa dengan frekuensi tersebut struktur tanah tidak akan mengalami resonansi.

DAFTAR PUSTAKA

- Clough, R.W., Penzien, J., 1988, *Dinamika Struktur*, (terjemahan) jilid satu dan dua, Erlangga Jakarta.
- Das, B. M., 1993, *Principles of Soil Dynamic*, PWS-Kent Publishing Company, Boston.
- Housner, G.W., 1971, *Eartquake Reasearch for Nuclear Power Plants*, Journal of the Power Devision, ASCE, Vol 97, PO1.
- Meskouris, K., Kratzig W.B., 1989, *Seismic Damage Assement of Building*, Proceeding of The International Conference of Eartquake Resistant Constrution and Design.
- Paz, M., 1993, *Dinamika Struktur*, (terjemahan edisi ke-3), Erlangga, Jakarta.
- Paulay, T., Priestly, M.J.N., 1992, *Seismic Design of Reinforce Concrete and Mansonry Building*, John Wiley and Sons Inc.
- Rodiguez, M., *A Measure of the Capacity of Eartquake Ground Motions to Damage Structure*, Journal of Eartquake Engineering and Structure Dynamic, Vol. 23, pp. 627-643.
- Trifunac, M. D., 1997, *Relative Erthquake Motion of Building Foundation*, ASCE Journal, Vol. 123 No. 4., page 416, 414 – 422.
- Widodo, 1997, *Validasi Parameter Percepatan Tanah dan efek Frekwensi Gempa Terhadap Respon Struktur Bangunan Bertingkat*, Journal Teknisia Vol. II, No. 7, pp. 1-15, UII, Yogyakarta.
- Widodo, 2001, *Respon Dinamik Struktur Elastik*, UII Press Jogjakarta, Yogyakarta.