

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Kinerja Isolator Bola-Pegas pada Model Struktur Fleksibel Skala Kecil

Benyamin Bontong

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako, Tondo Palu 94118, E-mail: benbontong@yahoo.com

Harun Mallisa

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako, Tondo Palu 94118, E-mail: harunml@yahoo.com

Tan Suryani Sollar

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako
Kampus Bumi Tadulako, Tondo Palu 94118, E-mail: tansuryani@yahoo.com

Abstrak

Keruntuhan gedung akibat gempa masih menjadi masalah yang perlu dipecahkan. Penelitian ini mempelajari kinerja isolator seismik bola-pegas pada model struktur fleksibel satu lantai skala kecil. Massa model pada level atas dan bawah masing-masing 30 kg. Bola isolator dipasang di antara model struktur dan landasan getar. Pegas dengan konstanta 500N/m dipasang untuk memulihkan model ke posisi semula pasca getaran. Satu ujung pegas diikat pada setiap sudut bawah model dan ujung lainnya diikat pada landasan getar. Kolom dari model dengan konstanta pegas 22117 N/m, dijepit pada ujung atas dan bawah. Getaran sinusoidal diaplikasikan pada landasan getar dengan frekuensi 10.6, 15.35 dan 20.44 rad/s serta amplitudo 5, 10, 15 dan 20mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons percepatan model a_s , meningkat secara linier terhadap peningkatan percepatan landasan a_m , sedangkan rasio respons percepatan model terhadap percepatan landasan (a_s/a_m) berkurang seiring dengan peningkatan percepatan landasan. Isolator bola-pegas sangat efektif mereduksi percepatan terutama pada percepatan landasan yang relatif tinggi. Pada percepatan landasan rendah (0.05g), rasio reduksi percepatan $(a_m - a_s)/a_m$, mencapai 39% pada level atas dan 45% pada level bawah, sedangkan pada percepatan landasan lebih dari 0.2g, rasio reduksi percepatan tersebut mencapai lebih dari 80% pada kedua level.

Kata-kata Kunci: Struktur fleksibel, isolator bola-pegas, frekuensi, amplitudo, percepatan.

Abstract

The collapse of buildings due to the earthquake is still an issue that needs to be solved. This research studied the performance of the ball-spring seismic isolator on a reduced scale, single-story, flexible structure model. Model's mass on each top and bottom level is 30 kgs. Ball isolator is mounted between the structure model and vibrating base. A spring constant support of 500N/m is installed to restore the model to its original position after the vibration. One end of the spring is tied to each bottom corner of the model and the other end is tied to the vibrating base. The column of the model with the spring constant of 22,117 N/m, are clamped at the lower and upper ends. Sinusoidal vibrations were applied on vibrating base with the frequencies of 10.6, 15.35 and 20.44 rad/s and the amplitudes of 5, 10, 15 and 20 mm. The results show that the model acceleration response rates (a_s) increase linearly to increasing the base acceleration rates (a_m), while the ratio of the acceleration responses model to the base acceleration (a_s/a_m) decreases with an increasing the base accelerations. Ball-spring isolators very effectively reduces acceleration especially at the level of high rates of the base acceleration. At the level of the lower base acceleration (0.05g), acceleration reduction ratios, $(a_m - a_s)/a_m$, reach 39% at the top level and 45% at the bottom level, while the base acceleration of more than 0.2g the acceleration reduction ratios reach more than 80% at the both level.

Keywords: Flexible structure, ball-spring isolator, frequency, amplitude, acceleration.

1. Pendahuluan

Gempa bumi masih merupakan penyebab kerusakan parah bangunan saat ini. Dalam usaha mitigasi bencana gempabumi, telah banyak upaya yang dilakukan. Salah satu diantaranya adalah dengan memisahkan sistem struktur bangunan atas dengan sistem pemikul/pondasi, dan memasang isolator diantaranya. Sistem isolasi ini berfungsi untuk meredam/mengabsorpsi/membatasi beban gempa bumi yang akan merambat masuk ke struktur bangunan atas. Beberapa tipe isolator seismik yang sudah diterapkan untuk bangunan di luar negeri (seperti di Jepang) antara lain *Natural Rubber Bearing*, *Hight Damping Rubber Bearing*, *Lead Rubber Bearing*, *Elastic Sliding Bearing*, *Curved Plane Sliding Bearing*, *Plane Sliding Bearing*, *Plane Roller Bearing*, *Rail Roller Bearing* (Saito, et. al. 2005). Sayangnya semua tipe ini menggunakan teknologi canggih dan mahal sehingga umumnya diaplikasikan hanya pada gedung-gedung penting bertingkat banyak.

Berdasarkan uraian di atas, tulisan ini hendak mengkaji kemungkinan penggunaan suatu sistem isolasi dengan konstruksi yang relatif sederhana dan murah sehingga dapat diaplikasikan dengan teknologi sederhana pada bangunan rumah tinggal/bangunan kecil. Bontong, et. al. (2010) telah melakukan penelitian sistem isolasi seismik menggunakan bola baja pada *lumped mass* dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem ini mampu untuk mengabsorpsi energi getaran secara signifikan. Bertitik tolak dari temuan tersebut, penelitian ini akan menguji coba sistem isolator bola-pegas pada model struktur fleksibel skala kecil.

2. Kajian Pustaka

Saito, et. al (2005) memaparkan beberapa tipe isolasi seismik (sistem kontrol pasif) yang sudah dikenal dewasa ini yaitu *Natural Rubber Bearing*, *Hight Damping Rubber Bearing*, *Lead Rubber Bearing*, *Elastic Sliding Bearing*, *Curved Plane Sliding Bearing*, *Plane Sliding Bearing*, *Plane Roller Bearing*, *Rail Roller Bearing*. Hasil test menunjukkan bahwa untuk jenis rubber bearing, dapat mengalami simpangan bolak-balik antara ± 100 sampai ± 300 mm, untuk gaya geser 300 sampai 400 kN, jenis sliding bearing antara ± 100 sampai ± 300 mm untuk gaya geser 20 sampai 160 kN, dan jenis roller bearing, hingga ± 100 mm untuk gaya geser kurang dari 20 kN.

Kajima, et. al (2004) mengobservasi bangunan konstruksi beton tulang berlantai 9 dengan satu lantai *basement* di kota Kushiro. Takenaka, et. al (2004) mengobservasi bangunan kantor dari beton tulang berlantai 3 di kota Kushiro. Sakai, et. al (2004) mengobservasi bangunan rumah sakit dari konstruksi beton tulang berlantai 3. Todo dan Seki (2004) mengobservasi bangunan perbankan beton bertulang berlantai 7 dengan *basement*. Pada masing-masing

bangunan tersebut dipasang kombinasi beberapa *rubber bearings*, *lead dampers* dan *steel dampers*. Dari hasil observasi tersebut dicatat nilai tertinggi percepatan maksimum permukaan tanah 280 cm/detik^2 dan *displacement* maksimum pada tumpuan isolasi sekitar 30 cm, terjadi pada bangunan kantor yang diobservasi oleh Takenaka. Nilai reduksi terbesar percepatan terdapat pada hasil observasi Kajima dengan reduksi $>50\%$ percepatan *basement*.

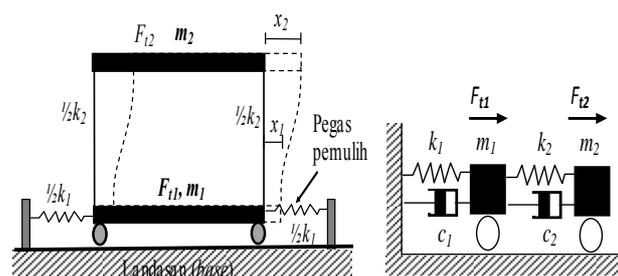
3. Studi Terkait yang Telah Dilakukan

Bontong, et. al (2010) telah melakukan penelitian dengan mengaplikasikan bola baja sebagai isolator pada *lumped mass* "m". Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem isolator bola baja dapat mereduksi percepatan hingga lebih dari 90% dalam rentang percepatan landasan antara 125 sampai dengan 1270 gal. Walaupun efek redaman sangat baik, ternyata bahwa bola memiliki kesetimbangan netral sehingga dengan sedikit gangguan dapat menggelinding ke segala arah, akibatnya posisi massa menjadi labil.

Bontong et. al (2012) melakukan penelitian dengan memasang pegas pemulih pada model struktur fleksibel berlantai satu, dengan tujuan agar posisi model dipulihkan kembali ke posisi semula setelah getaran berhenti. Ternyata efek redaman isolator berkurang tetapi masih mampu meredam percepatan sekitar 40% pada percepatan landasan yang rendah (sekitar 0.05g) sedangkan pada percepatan landasan tinggi (0.2g), mampu meredam hingga lebih dari 80% pada penggunaan pegas lunak.

4. Pemodelan

Untuk struktur berlantai satu dimana isolator bola-pegas diaplikasikan, dimodelkan sebagai berikut:



Gambar 1. Model struktur berlantai 1 dengan isolator bola-pegas

Pada Gambar 1, pegas pemulih dipasang pada massa level bawah (m_1) yang berfungsi memulihkan posisi model ke posisi awal setelah getaran berhenti. Dengan adanya unsur pegas pemulih, model ini menjadi sistem dengan derajat kebebasan dua. Kalau konstanta pegas pemulih sebelah kiri dan kanan masing-masing $\frac{1}{2}k_1$ maka konstanta pegas pemulih sistem (gabungan) adalah k_1 . Demikian pula dengan konstanta pegas kolom kiri dan kanan masing-masing $\frac{1}{2}k_2$, maka konstanta pegas kolom sistem adalah k_2 .

Bontong, dkk.

Persamaan gerak untuk sistem ini sebagai berikut:

$$m_1 \cdot x_1'' + c_1 \cdot x_1' + k_1 \cdot x_1 - k_2(x_2 - x_1) = F_{t1} \quad (1)$$

$$m_2 \cdot x_2'' + c_2 \cdot x_2' + k_2(x_2 - x_1) = F_{t2} \quad (2)$$

atau dalam notasi bentuk umum matriks:

$$[m]\{x''\} + [c]\{x'\} + [k]\{x\} = \{F_t\} \quad (3)$$

Pada kondisi getaran bebas tanpa redaman (c dan F_t bernilai nol), dari Persamaan (3) didapatkan matriks *eigenvector* natural $[h]$ berupa matriks bujursangkar dan matriks frekuensi natural $[\omega^2]$ berupa matriks diagonal. Apabila $\omega_i^2 \neq \omega_j^2$, memenuhi kondisi orthogonal sebagai berikut :

$$\{h_i\}^T [m] \{h_j\} = 0 \quad (4)$$

$$\{h_i\}^T [k] \{h_j\} = 0 \quad (5)$$

Sedangkan kondisi normalisasi dimana jika $\omega_i^2 = \omega_j^2$ dan $\{h_i\} = \{h_j\}$ memenuhi persamaan :

$$\{h_i\}^T [m] \{h_i\} = L_i^2 \text{ dan kondisi normalisasi } \{\phi_i\}^T [m] \{\phi_i\} = 1 \quad (6)$$

$$\{h_i\}^T [k] \{h_i\} = L_i^2 \omega_i^2 \text{ dan kondisi normalisasi } \{\phi_i\}^T [k] \{\phi_i\} = \omega_i^2 \quad (7)$$

dimana $\{\phi_i\}^T = \{ h_{1i} / L_i, h_{2i} / L_i, \dots, h_{ni} / L_i \}$ adalah *eigenvector* satuan, yang bersesuaian dengan ω_i .

Berdasarkan sifat ortogonal dan normal mode (Tuma dan Cheng, 1983), persamaan simultan “ n ” derajat kebebasan dapat diubah bentuknya menjadi “ n ” buah persamaan independen dengan bentuk seperti Sistem Derajat Kebebasan Tunggal (*single degree off freedom*) sbb:

$$\{z''\} + [2\xi\omega]\{z'\} + [\omega^2]\{z\} = [\phi]\{F_t\} \quad (8)$$

Dimana z adalah vector koordinat normal. Matriks $[2\xi\omega]$ dan $[\omega^2]$ adalah matriks diagonal, sedangkan $[\phi]$ adalah matriks *eigenvector* normal berdimensi $n \times n$. **Persamaan (8)** terdiri dari n buah persamaan nodal independen dalam bentuk:

$$z_i'' + 2\xi_i \omega_i \cdot z_i' + \omega_i^2 \cdot z_i = f_i \quad (9)$$

dimana i merupakan indeks yang bernilai 1 sampai n (n adalah jumlah derajat kebebasan). Setelah menghitung z_i , selanjutnya nilai x dan x'' dalam koordinat geometri dihitung kembali dengan persamaan:

$$\{x\} = [\phi]\{z\} \text{ atau } x_t = \phi_1 \cdot z_{1t} + \phi_2 \cdot z_{2t} + \dots + \phi_n \cdot z_{nt} \quad (10)$$

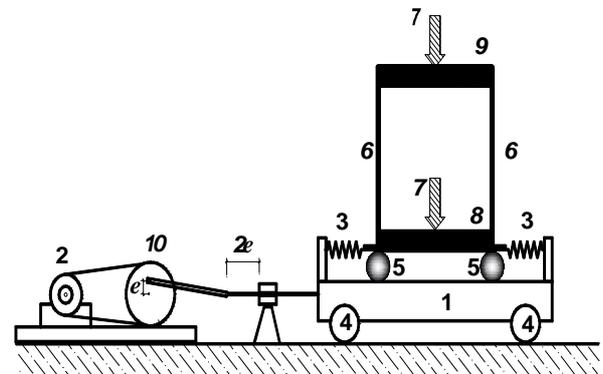
dan

$$\{x''\} = [\phi]\{z''\} \quad (11)$$

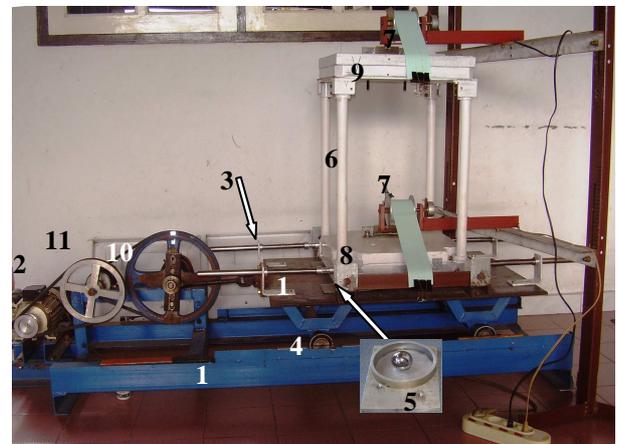
Dimana x adalah perpindahan dan x'' adalah percepatan.

5. Metode Pengujian

5.1 Peralatan uji



Gambar 2. Skema peralatan uji



Gambar 3. Foto Alat uji model (Bontong, et. al., 2012)

Keterangan **Gambar 2** dan **Gambar 3**

1. Landasan getar
2. Unit motor penggerak
3. Pegas pemulih
4. Roda peluncur landasan getar
5. Bola isolator
6. Kolom struktur fleksibel
7. Unit perekam perpindahan
8. Massa terpusat pada level bawah (dasar)
9. Massa terpusat pada level atas
10. Poros pengatur amplitudo landasan getar.
11. Puli pengatur frekuensi
12. Kerangka untuk merakit komponen.

Puli pengatur frekuensi (**Gambar 3** nomor 11) dapat diganti dengan ukuran sedemikian rupa sehingga menghasilkan frekuensi sesuai dengan yang diinginkan. Amplitudo getaran landasan dapat diatur dengan jalan menggeser posisi poros pengatur amplitudo (**Gambar 3** nomor 10).

Ukuran luar model struktur, panjang x lebar x tinggi = 41 x 41 x 59.5cm, dan ukuran garis sistem 35.95 x 35.95 x 52.5cm. Massa atas dan bawah masing-masing 30 kg dengan dudukan kaku, sedangkan kolom terbuat dari rotan bulat diameter 3.05 cm dijepit pada ujung atas dan bawah. Pada setiap kaki kolom dipasang isolator bola berdiameter 20 mm. Satu ujung pegas pemulih dipasang pada kaki kolom dan ujung lain dipasang pada landasan.

5.2 Rancangan parameter input

Getaran sinusoidal diaplikasikan pada landasan getar dengan amplitudo A_m dibuat empat variasi yaitu 5, 10, 15 dan 20 mm, serta frekuensi f_m dalam tiga variasi yaitu 100 145 dan 194 siklus per menit (cpm) atau 10.60, 15.35 dan 20.34 rad/s, yang menghasilkan percepatan landasan a_m dalam rentang 0.05g sd 0,84g. Dari hasil pengukuran konstanta pegas, didapatkan nilai rata-rata konstanta pegas pemulih $k_1 = 500 N/m$ dan konstanta pegas kolom sistem struktur $k_2 = 22117 N/m$. Massa pada level atas dan bawah masing-masing 30 kg.

5.3 Parameter output

Output percobaan berupa rekaman respons model pada kertas skala milimeter yang menampilkan kurva respons perpindahan model vs. waktu. Parameter output respons berupa amplitudo dan frekuensi getaran didapat dengan mengukur langsung pada kurva rekaman.

5.4 Metode analisis respons

Dari data kurva rekaman respons model, diukur konstanta redaman dan frekuensi pribadi. Selanjutnya dengan bantuan program MATLAB, dihitung prediksi balik respons model meliputi perpindahan dan percepatan. Hal ini perlu dilakukan oleh karena dalam analisis dibutuhkan data percepatan, sedangkan data yang terbaca pada kurva rekaman hanya menampilkan data perpindahan saja. Rumus yang digunakan untuk menghitung perpindahan dan percepatan adalah **Persamaan (12)** dan **(13)** yaitu :

$$\{x\} = [\phi]\{z\} \quad (12)$$

$$\{x''\} = [\phi]\{z''\} \quad (13)$$

6. Analisis Data dan Pembahasan

6.1 Pengukuran respons model

Amplitudo dan frekuensi respons model diukur langsung pada kurva berdasarkan skala gambar. Respons model akibat getaran paksa (*forced vibration*) yang diaplikasikan pada landasan getar terdiri dari dua komponen (Clough dan Penzien, 1975) yaitu, komponen pertama, respons akibat getaran bebas model yang akan segera hilang akibat adanya redaman (*transient response*). Komponen kedua yaitu komponen respons yang mengikuti frekuensi landasan getar dan akan terus berlangsung selama landasan bergetar (*steady state response*). Pemisahan kedua komponen respons memudahkan untuk mengidentifikasi parameter respons amplitudo dan frekuensi serta analisis parameter perpindahan dan percepatan. Hasil pengukuran respons model diperlihatkan pada **Tabel 1**, **2** dan **3**. Pada tabel tersebut, amplitudo dinyatakan dalam milimeter (mm), dimana A_m adalah amplitudo landasan getar, A_t adalah amplitudo *transient response*, A_s adalah amplitudo *steady state response*. Frekuensi landasan getar f_m dalam siklus per menit (cpm), frekuensi *transient response* f_t dalam siklus per detik (cps) dan frekuensi *steady state response* f_s dalam cps.

Tabel 1. Hasil pengukuran respons model untuk frekuensi 194 cpm

Perlakuan landasan getar			Pengukuran respons model			
Amplitudo A_m (mm)	Frekuensi f_m (cpm)	level	Amplitudo		Frekuensi	
			transient A_t (mm)	steady A_s (mm)	transient f_t (cps)	steady f_s (cps)
5	194,1	atas	7,5	0,8	0,47	3,2
5	194,1	bawah	7,5	0,4	0,47	3,2
10	194,0	atas	9,0	0,8	0,46	3,2
10	194,0	bawah	9,0	0,4	0,46	3,2
15	194,0	atas	11,5	0,8	0,46	3,2
15	194,0	bawah	11,5	0,4	0,46	3,2
20	194,0	atas	17,0	0,8	0,46	3,2
20	194,0	bawah	17,0	0,4	0,46	3,2

Tabel 2. Hasil pengukuran respons model untuk frekuensi 145 cpm

Perlakuan landasan getar			Pengukuran respons model			
Amplitudo A_m (mm)	Frekuensi f_m (cpm)	level	Amplitudo		Frekuensi	
			Transient A_t (mm)	Steady A_s (mm)	Transient f_t (cps)	Steady f_s (cps)
5	144,8	atas	14,0	1,2	0,44	2,4
5	144,8	bawah	14,0	0,8	0,44	2,4
10	144,9	atas	15,0	1,2	0,44	2,4
10	144,9	bawah	15,0	0,8	0,44	2,4
15	145,2	atas	15,0	1,2	0,44	2,4
15	145,2	bawah	15,0	0,8	0,44	2,4
20	145,0	atas	16,0	1,2	0,44	2,4
20	145,0	bawah	16,0	0,8	0,44	2,4

Tabel 3. Hasil pengukuran respons model untuk frekuensi 100 cpm

Perlakuan landasan getar			Pengukuran respons model			
Amplitudo A_m (mm)	Frekuensi f_m (cpm)	level	Amplitudo		Frekuensi	
			Transient A_t (mm)	Steady A_s (mm)	Transient f_t (cps)	Steady f_s (cps)
5	100,1	atas	13,0	2,2	0,42	1,7
5	100,1	bawah	13,0	1,9	0,42	1,7
10	100,1	atas	15,0	2,2	0,42	1,7
10	100,1	bawah	15,0	1,9	0,42	1,7
15	100,1	atas	16,0	2,2	0,42	1,7
15	100,1	bawah	16,0	2,2	0,42	1,7
20	100,0	atas	22,0	2,2	0,42	1,7
20	100,0	bawah	22,0	1,9	0,42	1,7

Contoh bentuk kurva rekaman yang diukur, disimulasikan dengan MATLAB pada Gambar 4 (a, b dan c), untuk frekuensi landasan getar $f_m = 194$ cpm dan amplitudo $A_m = 15$ mm.

Respons total perpindahan pada Gambar 4a adalah merupakan superposisi dari komponen perpindahan *transient response*, (Gambar 4b) dengan komponen perpindahan *steady state response*, (Gambar 4c).

6.2 Penentuan rasio redaman

Rasio redaman ditentukan berdasarkan nilai penurunan logaritmis simpangan yang diukur langsung pada kurva getaran pada komponen *transien respons*. Penurunan logaritmis untuk menghitung rasio redaman:

$$\delta = \ln(x_1/x_2) = \xi \omega T_D = 2\pi\xi / \sqrt{1-\xi^2} \quad (14)$$

dimana x_1 dan x_2 adalah amplitudo pertama dan kedua yang diukur pada kurva rekaman respons. Dari hubungan tersebut didapatkan rasio redaman rata-rata pengukuran sebesar :

$$\xi = 32\% \quad (15)$$

6.3 Analisis respons model

Matriks massa :

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix} \quad (16)$$

dimana $m_1 = m_2 = 30$ kg

Matriks kekakuan :

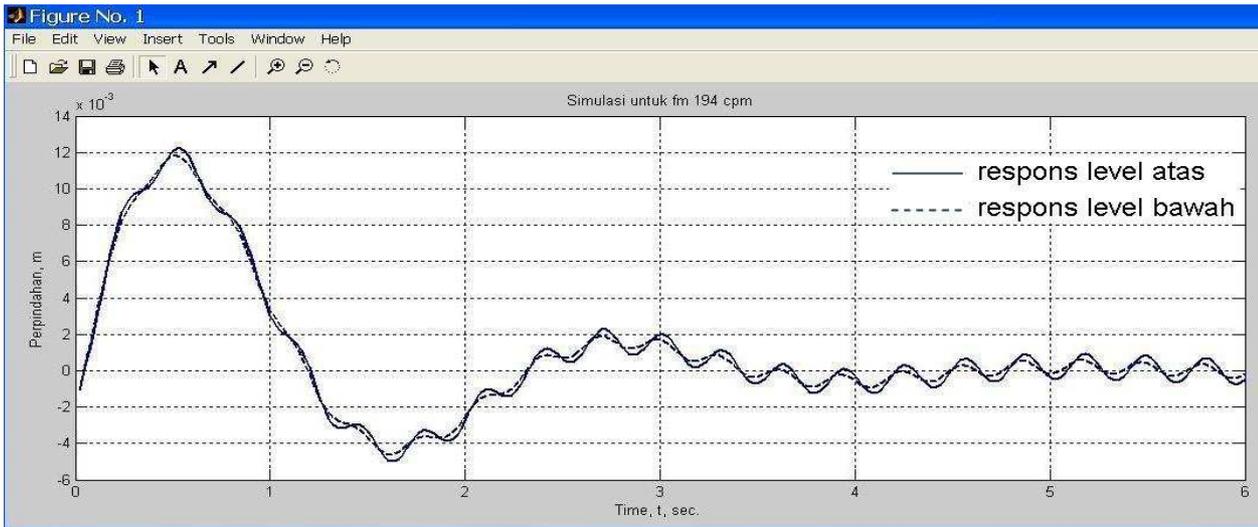
$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22617 & -22117 \\ -22117 & 22117 \end{bmatrix} \quad (17)$$

dimana konstanta pegas, pegas pemulih $k_1 = 500$ N/m dan konstanta pegas kolom model $k_2 = 22117$ N/m.

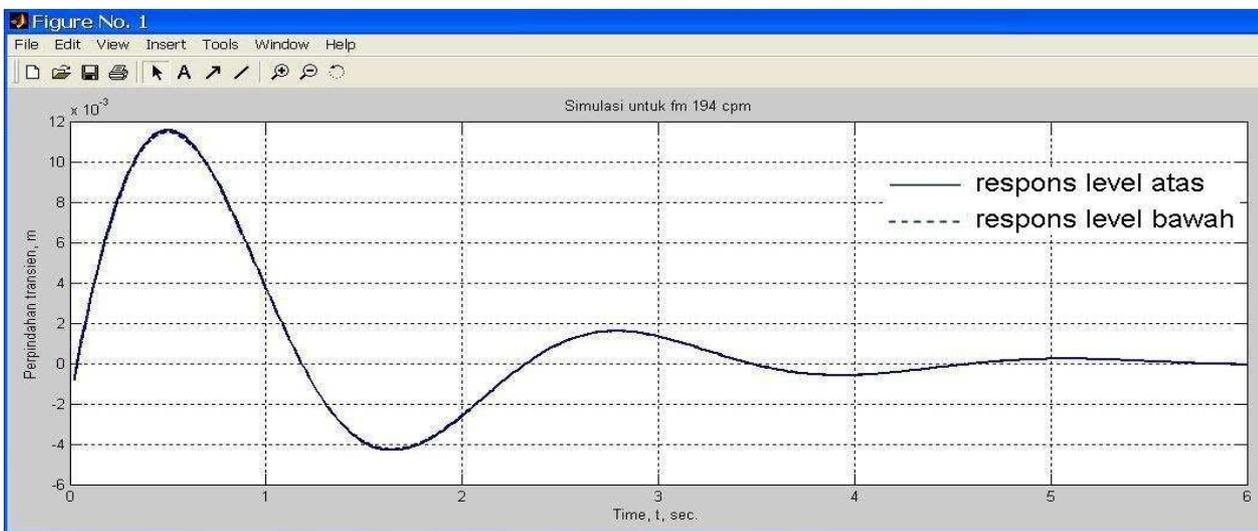
Persamaan di atas menghasilkan nilai-nilai sepasang *eigen value* : masing-masing 8.28 dan 1.48×10^3 , serta nilai *eigen vector* :

$$[h] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.01137 & -0.98876 \end{bmatrix} \quad (18)$$

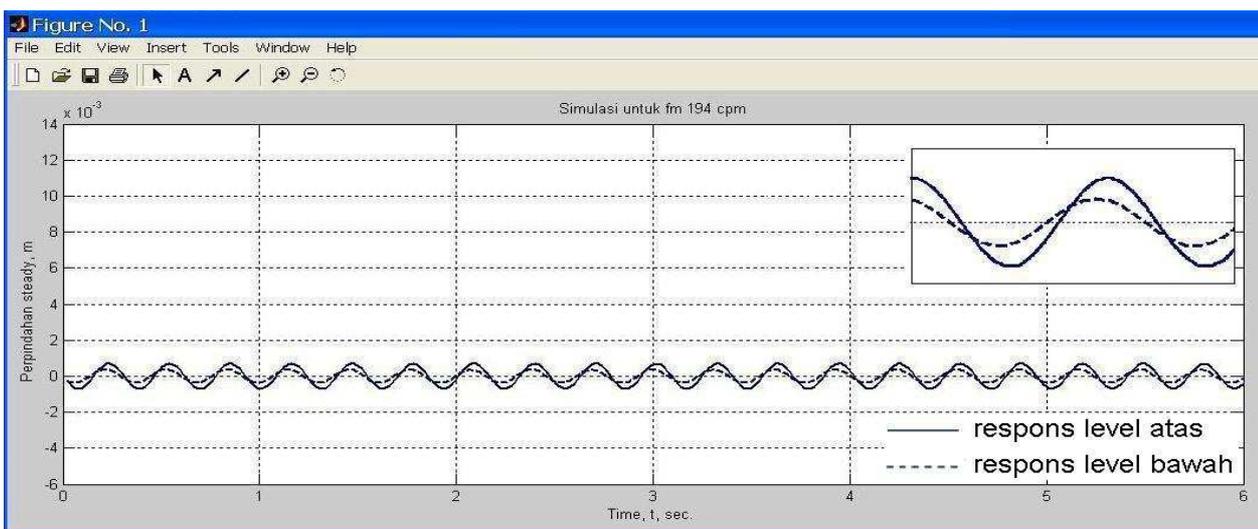
Dan frekuensi natural : $\omega_{n1} = 2.878$ rad/s dan $\omega_{n2} = 38.508$ rad/s



(a) Respons total



(b) Transient response



(c) Steady state response

Gambar 4. Simulasi Respons Perpindahan Model untuk f_m 194 cpm dan A_m 15 mm

Bontong, dkk.

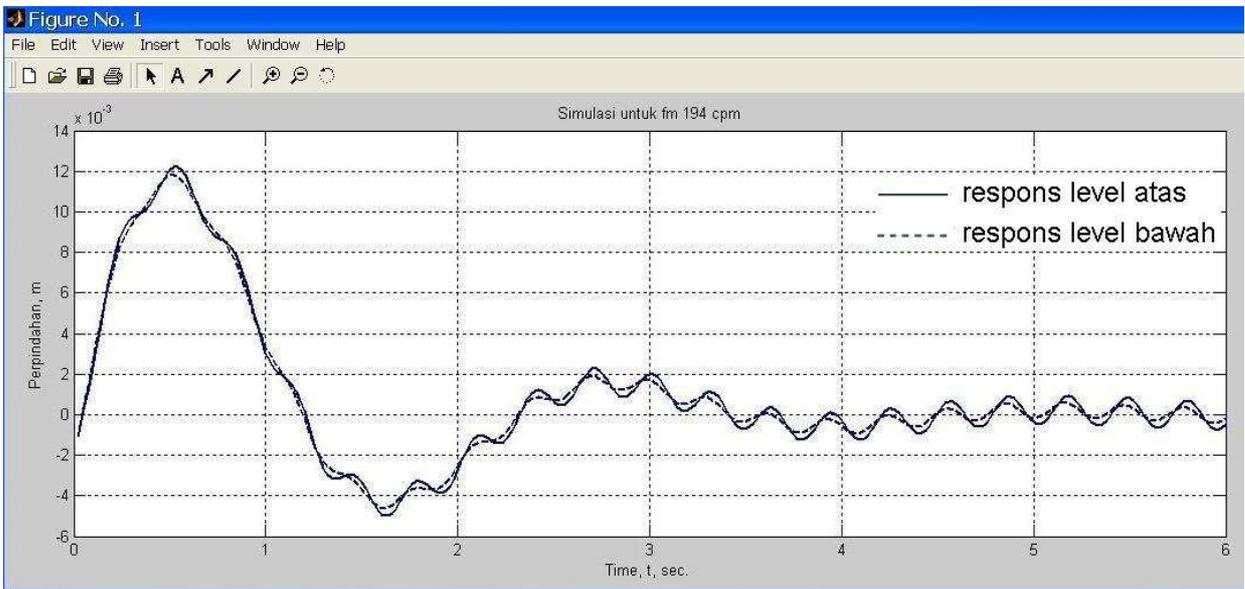
Perhitungan dilakukan dengan bantuan program MATLAB. Parameter yang dihitung yaitu nilai ekstrim dari respons perpindahan dan percepatan model pada masing-masing level. Salah satu hasil eksekusi program ditampilkan dalam bentuk kurva pada **Gambar 5**.

Nilai ekstrim respons untuk frekuensi landasan getar $f_m = 194\text{cpm}$ (20.32rad/s) adalah; Respons perpindahan maksimum level bawah 11.81 mm dan level atas 12.22 mm , serta respons percepatan maksimum level bawah 25.51 cm/s^2 dan level atas 41.4 cm/s^2 . Nilai maksimum respons tersebut diambil dari data numerik output program MATLAB. Nilai lengkap ditampilkan pada **Tabel 4, 5 dan 6**.

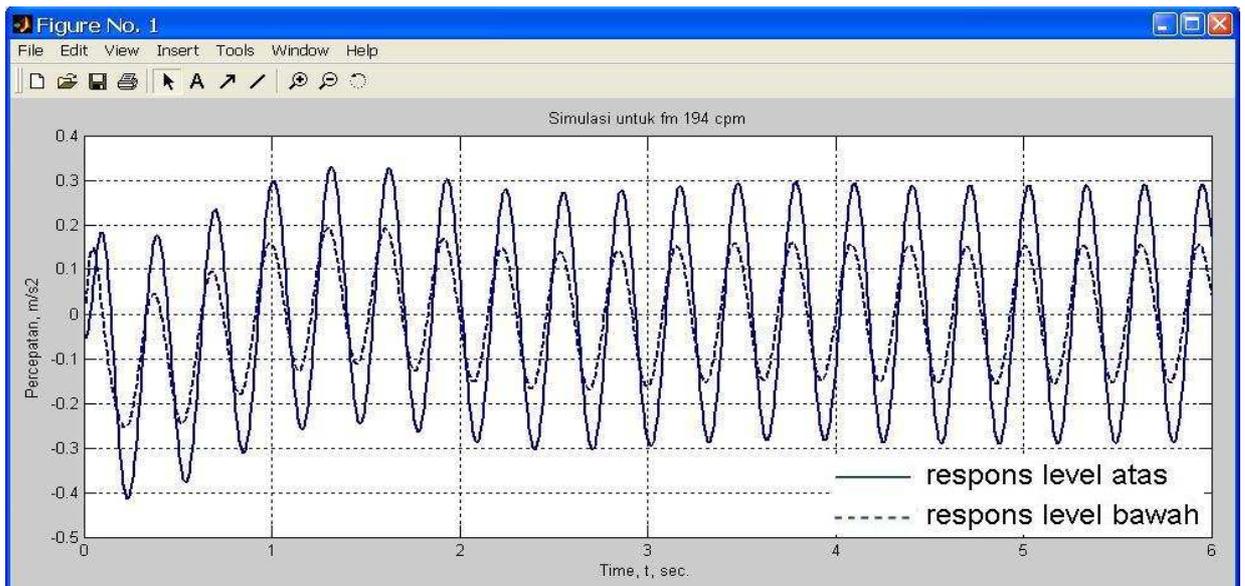
Pada **Tabel 6** diperlihatkan perbandingan antara parameter respons model dengan parameter perlakuan landasan. Pada tabel tersebut, A adalah amplitudo respons maksimum model yaitu superposisi dari A_t dengan A_s . Sedangkan A_m adalah amplitudo landasan getar, a_s adalah percepatan maksimum respons model dan a_m adalah percepatan maksimum landasan getar.

6.4 Pembahasan hasil

Hubungan antara respons percepatan model struktur (a_s) terhadap variasi percepatan landasan dipresentasikan pada **Gambar 6**.



(a) Respons perpindahan model



(b) Respons percepatan model

Gambar 5. Simulasi respons perpindahan dan respons percepatan model untuk f_m 194 cpm dan A_m 15mm

Tabel 4. Hasil analisis respons model level bawah

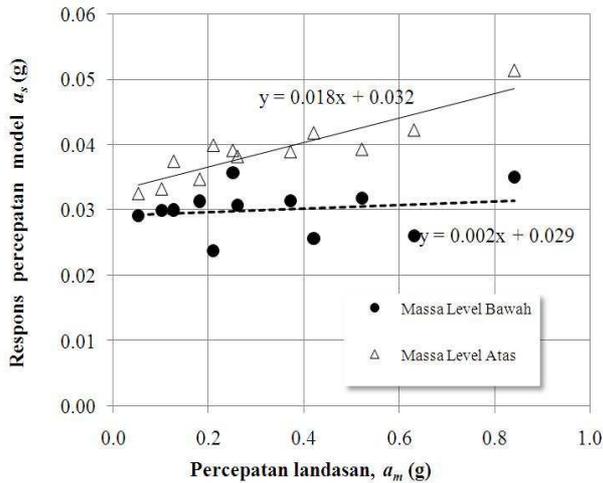
Perlakuan landasan getar				Respons maksimum model level bawah				
Amplitudo A_m (mm)	Frekuensi ω_m (rad/s)	Percepatan, a_m		Amplitudo transient, A_t (mm)	Amplitudo steady A_s (mm)	Amplitudo total, A (mm)	Percepatan, a_s	
		gals	g				gals	g
5	10,20	52,02	0,05	13,25	1,89	14,43	28,61	0,029
10	10,00	100,00	0,10	14,49	1,89	15,61	29,32	0,030
15	10,90	178,22	0,18	16,96	1,89	18,00	30,75	0,031
20	11,10	246,42	0,25	24,38	1,89	25,19	35,03	0,036
5	15,80	124,82	0,13	14,44	0,86	14,78	29,41	0,030
10	16,00	256,00	0,26	15,54	0,86	15,85	30,12	0,031
15	15,60	365,04	0,37	16,64	0,86	16,93	30,83	0,031
20	16,00	512,00	0,52	17,19	0,86	17,46	31,18	0,032
5	20,32	206,45	0,21	8,25	0,37	8,45	23,29	0,024
10	20,32	412,90	0,42	9,93	0,37	10,10	25,14	0,026
15	20,32	619,35	0,63	11,46	0,37	11,81	25,51	0,026
20	20,32	825,80	0,84	18,30	0,37	18,39	34,37	0,035

Tabel 5. Hasil analisis respons model level atas

Perlakuan landasan getar				Respons maksimum model level atas				
Amplitudo A_m (mm)	Frekuensi ω_m (rad/s)	Meja, a_m		Amplitudo transient, A_t (mm)	Amplitudo steady A_s (mm)	Amplitudo total, A (mm)	Percepatan, a_s	
		gals	g				gals	g
5	10,20	52,02	0,05	13,35	2,21	14,84	31,89	0,033
10	10,00	100,00	0,10	14,59	2,21	16,03	32,61	0,033
15	10,90	178,22	0,18	17,08	2,21	18,43	34,04	0,035
20	11,10	246,42	0,25	24,56	2,21	25,65	38,35	0,039
5	15,80	124,82	0,13	14,54	1,20	15,11	36,73	0,037
10	16,00	256,00	0,26	15,65	1,20	16,19	37,45	0,038
15	15,60	365,04	0,37	16,76	1,20	17,26	38,16	0,039
20	16,00	512,00	0,52	17,31	1,20	17,79	38,51	0,039
5	20,32	206,45	0,21	8,36	0,70	8,74	39,12	0,040
10	20,32	412,90	0,42	10,05	0,70	10,39	40,99	0,042
15	20,32	619,35	0,63	11,59	0,70	12,22	41,40	0,042
20	20,32	825,80	0,84	18,52	0,70	18,68	50,34	0,051

Tabel 6. Rasio parameter respons model terhadap parameter input

Perlakuan landasan getar			Level bawah			Level atas		
Amplitudo A_m (mm)	Percepatan, a_m (g)	Rasio amplitudo, A/A_m (%)	Rasio percepatan, a_s/a_m (%)	Reduksi percepatan, $(a_m-a_s)/a_m$ (%)	Rasio amplitudo, A/A_m (%)	Rasio percepatan, a_s/a_m (%)	Reduksi percepatan, $(a_m-a_s)/a_m$ (%)	
5	0,05	288,60	54,99	45,01	296,85	61,30	38,70	
10	0,10	156,14	29,32	70,68	160,34	32,61	67,39	
15	0,18	119,98	17,25	82,75	122,85	19,10	80,90	
20	0,25	125,93	14,21	85,79	128,25	15,56	84,44	
5	0,13	295,58	23,57	76,43	302,30	29,43	70,57	
10	0,26	158,53	11,77	88,23	161,85	14,63	85,37	
15	0,37	112,84	8,45	91,55	115,04	10,45	89,55	
20	0,52	87,32	6,09	93,91	88,95	7,52	92,48	
5	0,21	168,91	11,28	88,72	174,88	18,95	81,05	
10	0,42	100,98	6,09	93,91	103,91	9,93	90,07	
15	0,63	78,72	4,12	95,88	81,45	6,68	93,32	
20	0,84	91,96	4,16	95,84	93,38	6,10	93,90	

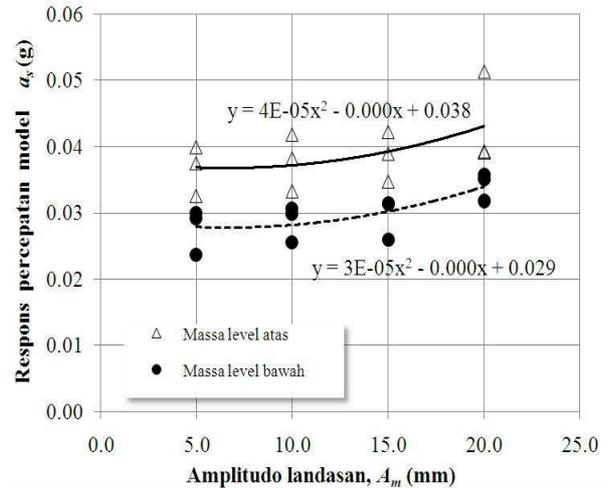


Gambar 6. Respons percepatan model vs percepatan landasan

Pada pengujian ini telah diaplikasikan tiga variasi frekuensi landasan (ω_m) dengan nilai rata-rata berturut-turut 10,5 rad/s, 15.2 rad/s dan 20.3 rad/s, serta empat variasi amplitudo landasan masing-masing 5, 10, 15 dan 20mm. Variasi perlakuan ini menghasilkan percepatan landasan dalam rentang 0,05g sampai dengan 0.84g, yang mengakibatkan respons percepatan model dari 0,029g sampai dengan 0,051g, dimana g adalah percepatan gravitasi sebesar 9.81 m/s². Pada **Gambar 6** dapat dilihat bahwa respons percepatan model dapat dianggap mengalami perubahan secara linier terhadap perubahan percepatan landasan. Pengaruh peningkatan percepatan landasan lebih tajam pada massa level atas dibandingkan dengan massa level bawah. Pengaruh tersebut terbaca pada gradien garis regresi yang lebih besar pada massa level atas yaitu 0.018 dibandingkan dengan level bawah yang bernilai 0.002.

Pengaruh amplitudo landasan terhadap respons percepatan model diperlihatkan pada **Gambar 7**. Gambar tersebut mempresentasikan bagaimana amplitudo landasan mempengaruhi respons percepatan model. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk semua besaran amplitudo landasan yang diaplikasikan (5 sd. 20mm), respons percepatan level atas lebih besar sekitar 0.01 g daripada respons percepatan level bawah. Pada amplitudo landasan yang lebih besar, respons percepatan model mengalami peningkatan yang lebih tajam dibandingkan dengan amplitudo landasan yang lebih kecil. Dalam rentang amplitudo landasan yang diaplikasikan, pengaruh perubahan amplitudo landasan terhadap respons percepatan, dapat didekati dengan fungsi polinom derajat dua sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 7**.

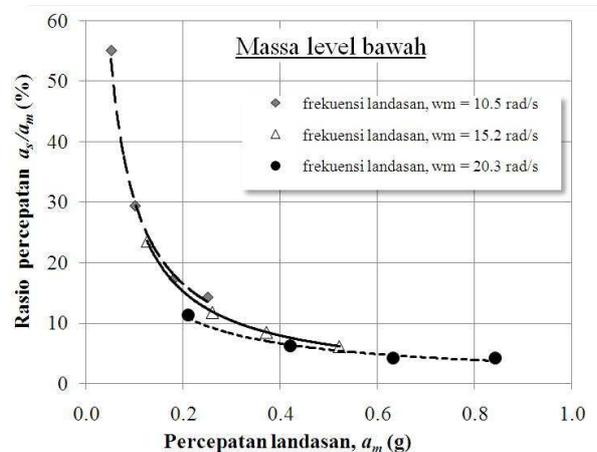
Seberapa besar pengaruh percepatan landasan (a_m) terhadap respons percepatan model (a_s) dapat lebih jelas dilihat jika perubahan respons percepatan model dinyatakan dalam bentuk perbandingan terhadap



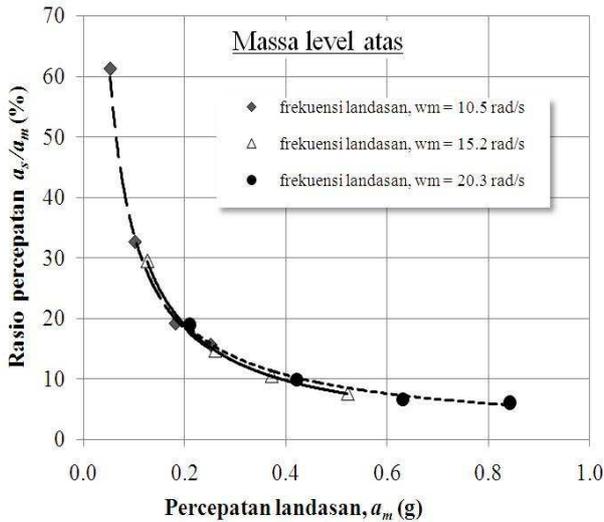
Gambar 7. Respons percepatan model struktur terhadap variasi amplitudo landasan

percepatan landasan. Dalam hal ini adalah rasio a_s/a_m yang dinyatakan dalam persentase (%). Misalkan rasio $a_s/a_m = 7\%$ ini berarti respons percepatan model a_s adalah sebesar 7% terhadap percepatan landasan a_m . Nilai-nilai perbandingan ini dipresentasikan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.

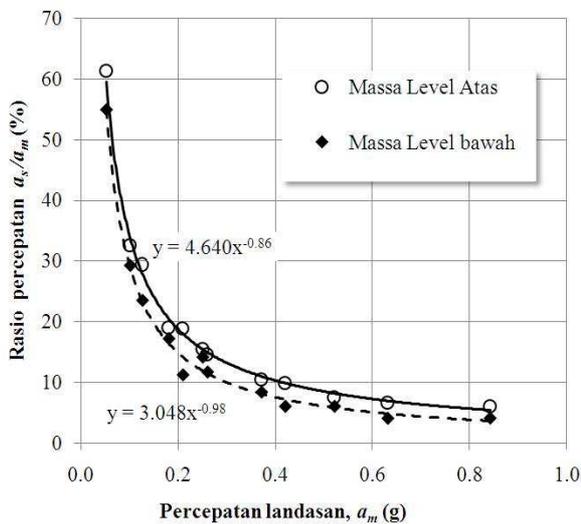
Pada **Gambar 8** maupun **9** dapat dilihat bahwa variasi frekuensi tidak begitu banyak mempengaruhi perubahan rasio percepatan a_s/a_m . Hal ini nampak pada kurva dimana titik-titik data nilai rasio percepatan a_s/a_m sebagai fungsi dari perubahan percepatan landasan a_m dapat dikatakan berimpit (*overlapping*) satu dengan yang lain untuk variasi frekuensi yang menyebabkan percepatan landasan yang sama. Hal ini dapat dilihat baik pada respons level bawah maupun pada level atas dari model struktur. Berdasarkan kenyataan ini, maka hubungan antara rasio percepatan a_s/a_m sebagai fungsi dari percepatan landasan a_m , dapat didekati dengan satu kurva tunggal tanpa melihat kepada variasi frekuensi. Hubungan tersebut diperlihatkan pada **Gambar 10**.



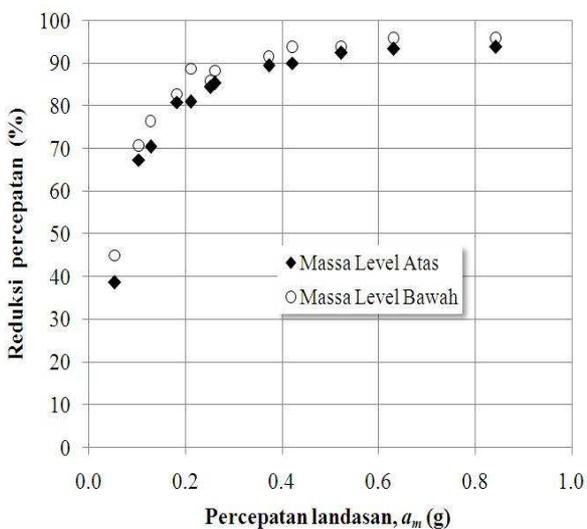
Gambar 8. Rasio percepatan (a_s/a_m) vs. percepatan landasan (a_m), untuk massa level bawah



Gambar 9. Rasio percepatan (a_s/a_m) vs. percepatan landasan (a_m), untuk massa level atas



Gambar 10. Kurva tunggal rasio percepatan (a_s/a_m) versus percepatan landasan a_m



Gambar 11. Reduksi percepatan (%) sebagai fungsi dari percepatan landasan a_m

Pada Gambar 10, pengaruh percepatan landasan terhadap rasio percepatan ($x = a_m$ dan $y = a_s/a_m$) dapat didekati dengan suatu persamaan pangkat (*power equation*) sebagai berikut :

Untuk massa level atas :

$$a_s/a_m = 4.64 \cdot a_m^{-0.86} \quad (19)$$

Untuk massa level bawah

$$a_s/a_m = 3.048 \cdot a_m^{-0.98} \quad (20)$$

Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa pada percepatan landasan yang kecil, rasio percepatan lebih besar, dibandingkan dengan pada percepatan landasan yang besar. Misalnya untuk percepatan landasan sekitar 0.05g pada Gambar 10, rasio a_s/a_m pada kurva adalah sekitar 55% untuk massa level bawah dan sekitar 62% untuk massa level atas. Artinya Respons percepatan model pada kondisi ini sama dengan 55% kali 0.05g = 0.028g untuk level bawah dan sebesar 0.31g untuk level atas. Sebaliknya jika a_m pada kurva sekitar 0.9g, maka a_s/a_m sekitar 5% saja, atau respons percepatan $a_s = 5\% \times 0.09g = 0.045g$. Hal ini berarti bahwa semakin besar percepatan pada landasan, semakin kecil persentasi respons percepatan model terhadap percepatan landasan. Dengan kata lain, semakin besar percepatan landasan, respons percepatan model semakin jauh dibawah percepatan landasan. Sebaliknya semakin kecil percepatan landasan, respons percepatan model semakin mendekati percepatan landasan. Hal ini menggambarkan bahwa penggunaan isolator bola-pegas pada struktur fleksibel akan bekerja semakin efektif pada saat percepatan landasan semakin besar dimana rasio a_s/a_m semakin berkurang.

Misalkan Δa adalah reduksi percepatan yaitu selisih percepatan landasan dengan percepatan respons ($\Delta a = a_m - a_s$) dan persentasi reduksi percepatan adalah $\Delta a / a_m$ (%). Kurva persen reduksi percepatan sebagai fungsi dari percepatan landasan diperlihatkan pada Gambar 11. Pada gambar tersebut, titik-titik data untuk respons massa level atas hanya sedikit lebih besar dari massa level bawah.

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa untuk percepatan landasan yang rendah (sekitar 0.05g s/d 0.1g), persen reduksi percepatan relatif lebih kecil yaitu 39% s/d 67% pada level atas dan 45% s/d 71% pada level bawah. Sebaliknya pada percepatan landasan yang lebih besar dari 0.2g, persen reduksi percepatan sangat signifikan yaitu lebih dari 80%, baik pada massa level atas maupun massa level bawah, dan pada percepatan landasan lebih dari 0.4g, persen reduksi mencapai 90% pada kedua level.

7. Kesimpulan

1. Respons percepatan model dapat dianggap meningkat secara linier terhadap peningkatan percepatan landasan. Pengaruh tersebut lebih tajam pada massa level atas dibandingkan dengan massa level bawah dimana gradien garis regresi peningkatan respons pada massa level atas sekitar 0.018 sedangkan level bawah bernilai hanya 0.002.
2. Rasio respons percepatan (a_s/a_m) sangat tergantung pada variasi percepatan landasan a_m . Semakin besar a_m , semakin kecil rasio a_s/a_m , dan pengaruhnya dapat didekati dengan fungsi pangkat yaitu $a_s/a_m = 4.64 \cdot a_m^{-0.86}$ untuk massa level atas dan $a_s/a_m = 3.048 \cdot a_m^{-0.98}$ untuk massa level bawah.
3. Semakin besar percepatan landasan (a_m), semakin besar pula reduksi percepatan ($\Delta a = a_m - a_s$). Untuk percepatan landasan yang rendah (sekitar 0.05g sampai 0.1g), persen reduksi percepatan, ($\Delta a/a_m$ %) sebesar 39% sampai 67% pada level atas dan 45% sampai 71% pada level bawah. Pada percepatan landasan yang lebih besar dari 0.2g, persen reduksi percepatan sangat signifikan yaitu lebih dari 80%, baik pada massa level atas maupun massa level bawah.

8. Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dirjen Dikti yang telah membiayai penelitian ini melalui DIPA Universitas Tadulako Sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: 174/UN28.11.1.3/LK/2012 Tanggal 14 Maret 2012.

Daftar Pustaka

- Bontong, B., Mallisa, H., Sollu, T.S., 2012, *Sistem Isolasi Seismik Bola-pegas pada Model Rumah Skala Kecil*, Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun ke-II, Lemlit Untad Palu.
- Bontong, B., Mallisa, H., Sollu, T.S., 2010, Karakteristik Dinamik Bola Baja sebagai Material Isolasi Seismik, *Jurnal Teknik Sipil ITB Vol. 17 No. 1*, hal 39-46.
- Clough, R.W., and Penzien, J., 1975, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc.
- Kajima, T., Ito, A., and Fujita, H., 2004, Earthquake record of 2003 Off Koshiro Earthquake at Koshiro-government office, *Mensin Journal*, N0.43, pp. 36-38.
- Saito, T., et. al. 2005, *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*, London: SPON Press.

Sakai, S., Ito, Y., and Iida, T., 2004, Earthquake response of base isolation hospital, *Mensin Journal*, N0.43, pp. 41-43

Takenaka, Y., Yasuda, T., and Suzuki, Y., 2004, Earthquake observation of base isolation building in Koshiro city at 2003 Off Koshiro Earthquake, *Mensin Journal*, N0.43, pp. 31-35

Todo, M., and Seki, H., 2004, Earthquake record of 2003 Off Koshiro Earthquake at Koshiro-bank headquarter, *Mensin Journal*, N0.43, pp. 39-40

Tuma, J.J., and Cheng, F.Y., 1983, *Dynamic Structural Analysis*, McGraw-Hill Book Company.

