

KAJI TEORITIK EFEKTIFITAS PEREDAM GETARAN HIBRID PADA STRUKTUR BANGUNAN

Lovely Son, Mulyadi Bur, Eka Satria dan Ega Asyura Rizfa

Laboratorium Dinamika Struktur
Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas
Kampus Unand Limau Manis, Padang-25163
Sumatera Barat, Indonesia

Phone: +62-751-72586, FAX: +62-751-72566, E-mail: lovelyson@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Gempa, khususnya gempa tektonik, merupakan gejala alam yang saat ini belum dapat diprediksi oleh manusia. Kondisi ini menyebabkan perlunya upaya-upaya antisipasi oleh masyarakat termasuk mempersiapkan infrastruktur yang memadai agar kerugian yang timbul akibat gempa bisa diminimalisir. Salah satu cara untuk meminimalisir dampak dari gempa terhadap bangunan adalah penggunaan sistem isolasi getaran pada landasan bangunan. Akan tetapi, penggunaan teknik isolasi getaran ini belum begitu memuaskan, karena respon getaran dalam bentuk simpangan pada struktur masih cukup besar. Respon simpangan yang besar ini dapat merusak interior dan peralatan furnitur yang berada dalam bangunan. Untuk mengurangi respon ini, perlu ditambahkan suatu mekanisme peredam pada bangunan. Salah satu jenis peredam yang cukup efektif digunakan pada struktur bangunan adalah peredam getaran dinamik. Dalam makalah ini dibicarakan tentang kombinasi penggunaan teknik isolasi getaran dan peredam getaran dinamik yang disebut sebagai Teknik Peredam Getaran Hibrid. Teknik isolasi getaran yang digunakan diadopsi dari prinsip tumpuan fleksibel sedangkan peredam getaran dinamik yang diusulkan merupakan jenis peredam getaran dinamik pasif. Selanjutnya perlu disampaikan bahwa efektifitas peredam getaran Hibrid yang dianalisis dan dilaporkan pada makalah ini hanya yang bersifat teoritik. Dari hasil kajian diperoleh bahwa penggunaan Teknik Peredam Getaran Hibrid cukup efektif mengurangi respon simpangan pada struktur bangunan.

Keywords: Peredam dinamik, bangunan, gempa, isolasi getaran, model

1. Pendahuluan

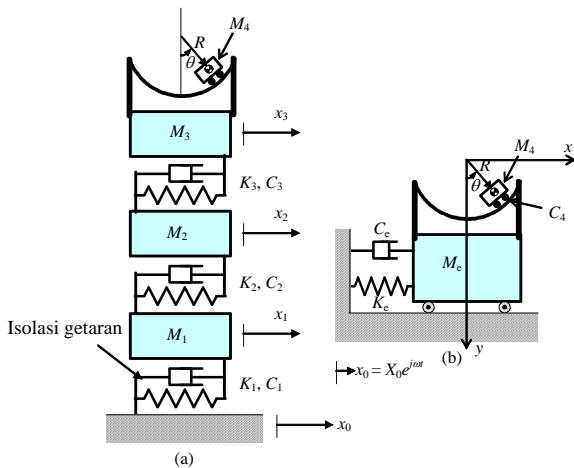
Perlindungan struktur bangunan dari beban gempa telah menjadi topik penelitian para ahli selama beberapa tahun belakangan ini. Penggunaan isolator komposit karet-baja, sistem pendulum gesekan, mekanisme tendon aktif, sistem rolling dan sliding, tune mass damper dan liquid absorber merupakan beberapa sistem peredam getaran yang banyak digunakan untuk mengurangi pengaruh energi gempa pada bangunan [1] s/d [6].

Pada penelitian ini, diusulkan suatu mekanisme peredam getaran pada struktur bangunan bertingkat menggunakan kombinasi teknik isolasi getaran dan peredam dinamik. Metode isolasi getaran yang akan digunakan dalam penelitian ini diadopsi dari prinsip tumpuan fleksibel sedangkan peredam getaran dinamik yang digunakan merupakan jenis peredam getaran dinamik pasif.

Pada Gambar 1(a) diperlihatkan model peredam getaran Hibrid pada bangunan bertingkat. Struktur bangunan dimodelkan sebagai suatu sistem getaran tiga derajat kebebasan. Sistem pegas dan peredam pada bagian paling bawah bangunan melambangkan sistem isolasi getaran. Peredam dinamik diletakkan pada lantai paling atas bangunan.

2. Model Teoretik Peredam Getaran





Gambar 1 Model Simulasi

Peredam dinamik ini dirancang sebagai suatu massa yang bergerak pada lintasan berbentuk busur lingkaran.

2.1 Perancangan Peredam Dinamik

Untuk dapat digunakan sistem peredam dinamik pada sistem maka pertama-tama harus ditemukan ekivalensi modus getar terendah sistem bangunan bertingkat tiga seperti terlihat pada gambar 1(a) dengan sistem getaran satu derajat kebebasan seperti terlihat pada gambar 1(b). M_e , K_e dan C_e melambangkan massa, kekakuan dan redaman ekivalen dari sistem.

Persamaan gerak sistem dapat diperoleh melalui metode Lagrange. Pertama-tama dihitung operator Lagrange L yang secara matematis dapat dituliskan sebagai

$$L = T - U \quad (1)$$

Harga T dan U pada Pers.(1) di atas merupakan energi kinetik dan energi potensial sistem yang dihitung menggunakan:

$$T = \frac{1}{2} M_e v_e^2 + \frac{1}{2} M_4 v_4^2 \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} K_e (x_0 - x_e)^2 + M_4 g R (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

Untuk sistem getaran non konservatif, energi sistem getaran yang hilang dalam bentuk panas dinyatakan oleh

$$D = \frac{1}{2} C_e (\dot{x}_0 - \dot{x})^2 + \frac{1}{2} C_4 (R\dot{\theta})^2 \quad (4)$$

Persamaan Lagrange untuk sistem mekanik non konservatif disusun dalam bentuk persamaan umum berikut:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k} = Q_k^{nc} \quad (5)$$

Pada Pers.(5) di atas, Q_k^{nc} menyatakan seluruh gaya luar yang bekerja pada sistem. Dengan menggunakan metode Lagrange, diperoleh persamaan gerak model struktur bangunan dengan peredam hibrid sebagai berikut:

➤ Untuk koordinat x

$$(M_e + M_4) \ddot{x} + M_4 R \ddot{\theta} + C_e \dot{x} + K_e x = K_e x_0 + C_e \dot{x}_0 \quad (6)$$

➤ Untuk koordinat θ

$$M_4 R^2 \ddot{\theta} + M_4 R \ddot{x} + C_4 R^2 \dot{\theta} + M_4 g R \theta = 0 \quad (7)$$

Keempat suku pada bagian kiri Pers.(6) melambangkan gaya inersia translasi dari $(M_e + M_4)$, gaya inersia rotasi pada M_4 , gaya dashpot dan gaya pegas. Pada penelitian ini, analisis hanya ditujukan untuk respon getaran paksa dari sistem dengan mengabaikan respon getaran bebas transiennya. Simpangan x dan θ adalah getaran harmonik dengan frekuensi ω dan digambarkan dengan vektor. Oleh karena itu, setiap suku pada Pers.(6) dan (7) juga dapat digambarkan dengan suatu vektor yang berputar dengan kecepatan ω . Cara paling mudah untuk menyelesaikan persamaan ini adalah dengan menuliskannya sebagai suatu bilangan kompleks yaitu

$$-\omega^2 (M_e + M_4) x - M_4 R \omega^2 \theta + j\omega C_e x + K_e x = K_e x_0 + j\omega C_e \dot{x}_0 \quad (8)$$

$$-M_4 R^2 \omega^2 \theta - M_4 R \omega^2 x + j\omega C_4 R^2 \theta + M_4 g R \theta = 0 \quad (9)$$

dimana x dan θ merupakan respon dalam bentuk bilangan kompleks yang saat ini belum diketahui, sedangkan besaran lainnya berbentuk bilangan riil.

Pers.(8) dan Pers.(9) di atas dapat diselesaikan untuk mendapatkan harga x dan θ . Penyelesaian kedua persamaan ini untuk x menghasilkan

$$x = x_0 \frac{(K_e + j\omega C_e)(-M_4 R^2 \omega^2 + j\omega C_4 R^2 + M_4 g R)}{\left\{ \left[-(M_e + M_4) \omega^2 + j\omega C_e + K_e \right] \left[-M_4 R^2 \omega^2 + j\omega C_4 R^2 + M_4 g R \right] - (M_4 R \omega^2)^2 \right\}} \quad (10)$$

Untuk menjadikan Persamaan (10) dalam bentuk nondimensional, digunakan besaran nondimensi berikut:

$$\mu = \frac{M_4}{M_e}; \quad \Omega^2 = \frac{K_e}{M_e} \quad (11)$$

$$\omega_a^2 = \frac{g}{R}; \quad \zeta = \frac{C_4}{2M_4 \Omega}; \quad f = \frac{\omega_a}{\Omega} \quad (12)$$

$$h = \frac{\omega}{\Omega}; \quad x_{st} = x_0 \quad (13)$$

Dengan menggunakan besaran nondimensi pada Pers.(11) s/d Pers.(13) di atas maka Pers.(10) dapat dituliskan kembali menjadi

$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{\left[\mu \left(\frac{\omega_a}{\Omega} \right)^2 - \mu \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + j2\zeta \left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \mu \right]}{\left\{ \left[-(1 + \mu) \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 1 \right] \left[-\mu \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + j2\zeta \left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \mu + \mu \left(\frac{\omega_a}{\Omega} \right)^2 \right] - \left(\mu \frac{\omega^2}{\Omega^2} \right)^2 \right\}} \quad (14)$$

Atau dapat disederhanakan menjadi

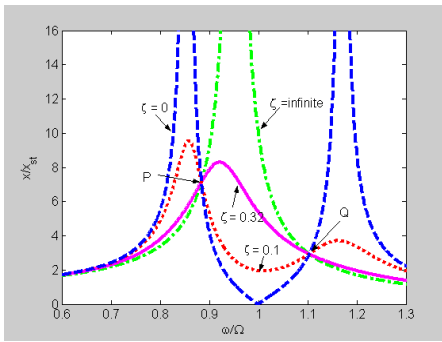
$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{(f^2 - h^2) + j2\zeta h}{h^4 - (1 + \mu) f^2 h^2 - (h^2 - f^2) - j2\zeta h [(1 + \mu) h^2 - 1]} \quad (15)$$

Panjang vektor pada Pers.(15) adalah



$$\left| \frac{x}{x_{st}} \right| = \sqrt{\frac{(2\zeta h)^2 + (f^2 - h^2)^2}{(2\zeta h)^2 [(1+\mu)h^2 - 1]^2 + [h^4 - (1+\mu)f^2 h^2 - (h^2 - f^2)]^2}} \quad (16)$$

Persamaan (16) menunjukkan rasio amplitudo $|x/x_{st}|$ dari massa ekuivalen sebagai fungsi dari empat variable penting yaitu μ , ζ , f dan h . Gambar 2 menunjukkan plot dari $|x/x_{st}|$ sebagai fungsi dari rasio frekuensi h untuk kondisi $f = 1$, $\mu = 0.1$ dan beberapa harga rasio redaman ζ . Gambar 2 ini dapat dianggap sebagai karakteristik peredam dinamik pada sistem getaran struktur bangunan jika massa ekuivalen struktur 10 kali lebih besar dibandingkan massa peredam sedangkan frekuensi peredam sama dengan frekuensi sistem utama ($f=1$).



Gambar 2 Karakteristik peredam dinamik

Jika harga rasio redaman tak berhingga seperti terlihat pada Gbr.2, kedua massa tersambung secara kaku dan sistem menjadi satu derajat kebebasan dengan massa total sebesar $1.1 M_e$. Dua kurva lain digambarkan pada Gbr.2 untuk $\zeta = 0.1$ dan $\zeta = 0.32$.

Secara umum, penambahan peredam dinamik pada suatu sistem getaran bertujuan untuk mengurangi sekecil mungkin puncak resonansi dari amplitudo. Pada harga $\zeta = 0$ puncak amplitudo berharga tak hingga dan pada $\zeta = \infty$, puncak amplitudo juga tak hingga. Hal ini disebabkan pada saat $\zeta = \infty$, maka peredam dinamik berubah menjadi benda kaku, sehingga massa dari peredam dinamik menjadi satu kesatuan dengan massa system. Dengan demikian, terdapat satu kondisi optimum rasio redaman sehingga puncak amplitudo berharga minimum. Pada Gambar 2 terlihat bahwa keempat kurva melalui dua titik yaitu titik P dan titik Q. Jika kedua titik ini diketahui maka kondisi redaman optimum dapat diperoleh karena amplitudo resonansi terbaik yang didapatkan pada kondisi redaman optimum adalah ordinat dari kedua titik tersebut.

Meskipun kondisi optimum dari redaman dapat diketahui akan tetapi harga ordinat dari titik P dan Q masih berbeda sehingga salah satu titik lebih tinggi dari yang lain. Untuk menyamakan harga ordinat titik P dan

Q maka harga $f = \omega_a/\Omega$ harus diset sehingga titik P dan Q bergeser naik maupun turun sehingga kedua puncak berharga sama. Dengan demikian, langkah awal yang dilakukan dalam perancangan peredam dinamik adalah dengan pemilihan harga f yang sesuai sehingga ordinat titik P dan Q berharga sama. Langkah selanjutnya adalah dengan pemilihan harga ζ sehingga didapatkan titik puncak yang minimum. Berdasarkan referensi [7], harga f yang menghasilkan harga ordinat yang sama untuk titik P dan titik Q adalah:

$$f = \frac{1}{1 + \mu} \quad (17)$$

Harga optimum dari rasio redaman diperoleh dari kondisi pada saat kurva pada Gbr.(2) melalui titik P dan Q dengan slope garis berharga nol(garis horisontal). Harga redaman optimum ini dinyatakan oleh [7].

$$\zeta^2 = \frac{\mu [3 - \sqrt{\mu/(\mu + 2)}]}{8(1 + \mu)^2} \quad (18)$$

2.2 Model Dinamik Struktur Bangunan dengan Peredam Getaran

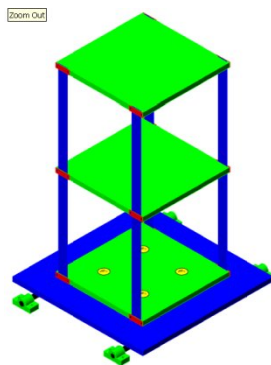
Model simulasi getaran bangunan dengan peredam getaran dinamik diperlihatkan pada Gambar 1(a). Persamaan gerak sistem getaran ini diberikan oleh:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 + m_4 & m_4 R \\ 0 & 0 & m_4 R & m_4 R^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 R^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 g R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} x_0 + \begin{Bmatrix} c_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dot{x}_0 \quad (19)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam perancangan model uji simulasi untuk struktur bangunan, frekuensi pribadi terendah dari sistem dibuat lebih kecil dari 4 Hz. Untuk mendapatkan harga frekuensi ini digunakan model struktur bangunan 3 lantai yang dibangun oleh tiga balok baja yang disambungkan dengan menggunakan pegas daun yang terbuat dari pelat baja seperti diperlihatkan pada Gbr. 3.

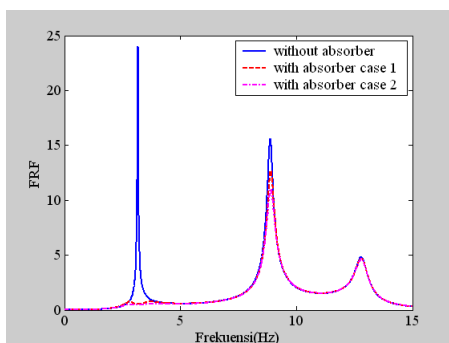




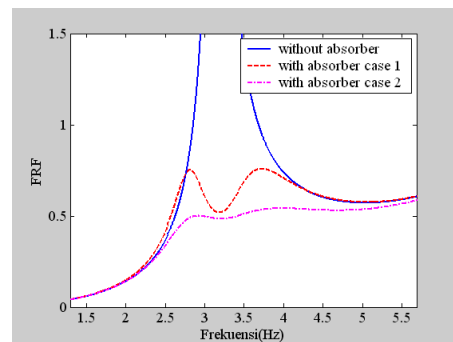
Gambar 3 Model uji struktur bangunan

Simulasi peredam getaran dinamik dilakukan pada model bangunan tiga derajat kebebasan seperti ditunjukkan pada Pers.(19). Dalam simulasi ini diasumsikan bahwa massa dan kekakuan sistem adalah $M_1 = M_2 = M_3 = 1 \text{ kg}$, $K_1 = K_2 = K_3 = 2000 \text{ N/m}$ dan $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ N.s/m}$. Dengan harga massa dan kekakuan ini didapatkan frekuensi pribadi model bangunan sebesar 3.1676 Hz, 8.8755 Hz dan 12.8255 Hz. Pada Gbr. 4 diperlihatkan fungsi respon frekuensi dari model bangunan sebelum dan setelah penambahan peredam. Dalam simulasi ini, massa peredam dinamik dipilih sebesar 0.1 kg. Seperti dapat dilihat pada Gbr. 4, untuk kasus 1, rasio redaman peredam dinamik dipilih sebesar 0.18 sedangkan pada kasus 2, rasio redamannya 0.32. Dari Gbr.4 ini dapat dilihat bahwa peredam dinamik cukup efektif mengurangi puncak FRF pada modus getar pertama dari sistem. Pada Gbr. 5 diperlihatkan perbesaran (*zoom*) FRF sistem di dekat frekuensi pribadi pertama. Dari Gbr.5 ini dapat dilihat bahwa peningkatan harga rasio redaman dari peredam dinamik akan meningkatkan unjuk kerja dari peredam.

Gambar 6 menunjukkan respon simpangan bangunan pada lantai 3 saat diganggu oleh gaya gangguan berupa fungsi random di landasannya. Dalam simulasi ini, massa dan rasio redaman dari peredam dinamik dipilih sebesar 0.1 kg dan 0.32. Dari Gbr. 6 dapat dilihat bahwa amplitudo getaran bangunan berkurang cukup besar dengan penambahan peredam dinamik.



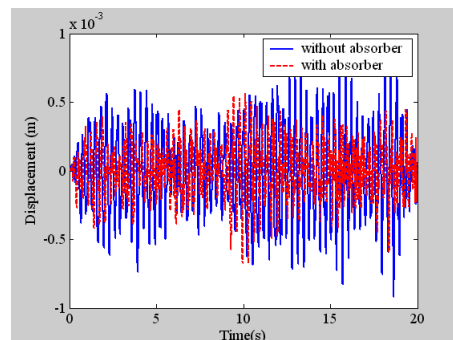
Gambar 4 Fungsi respon frekuensi sistem dengan dan tanpa Absorber



Gambar 5 Zoom FRF di dekat frekuensi pribadi pertama

4. Kesimpulan

Pada makalah ini telah dikembangkan model teoretik dari struktur bangunan yang menggunakan peredam dinamik Hibrid. Suatu program simulasi dikembangkan untuk melihat unjuk kerja peredam getaran dinamik dalam mereduksi getaran pada struktur bangunan. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa peredam dinamik bekerja cukup efektif dalam mengurangi respon simpangan sistem bangunan akibat beban gempa.



Gambar 6 Respon getaran bangunan pada lantai 3

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai dari dana Research Grant Proyek I-MHERE Universitas Andalas B1 batch IV tahun 2010. Atas bantuan dana ini penulis mengucapkan terima kasih banyak.

Referensi

- [1] Kaplan, H and Seireg, A, "A Computer Controlled System for Earthquake Protection of Structures." Int. Journal of Computer Applications in Technology, Vol.13, No.1/2.
- [2] Kaplan, H and Seireg, H, "Optimal design of a base Isolated system for a high rise steel structure" Earthquake Engineering And Structural Dynamics 30, 287- 302 (2001).



- [3] Kaplan, H and Seireg, A, "A Base Isolation system for Bridges Subjected to Seismic Disturbances." (Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume: 31, Issue: 5, Date: May 2002, Pages: 1093-1112).

- [4] Kareem, A " The Next Generation of Tuned Liquid Dampers." First World Conference on Structural Control, 3-5 August 1994, Los Angeles, California, USA.

- [5] Wang, Y.P, and Liu, C.J, "Active Control of Sliding Structures under Strong Earthquakes." , FP1-23. First World Conference on Structural Control, 3-5 August 1994, Los Angeles, California, USA.

- [6] Wang, Y.P and Reinhorn, A.M, " Motion Control of sliding Isolated Structures." Seismic, Shock and Vibration Isolation-edited by H. Chung and T. Fujita, vol 181, ASME (1989).

- [7] Den Hartog, J.P, Mechanical Vibrations (1956) pp. 87, McGraw-Hill



