

Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Struktur

Herlien D. Setio

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: herlien@si.itb.ac.id

Diah Kusumastuti

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: dkusumastuti@si.itb.ac.id

Sangriyadi Setio

Kelompok Keahlian Konversi Energi, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: setio@lmbasp.ms.itb.ac.id

Pratama H.R. Siregar

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132

Andy Hartanto

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132

Abstrak

Penelitian ini membahas studi teori dan eksperimental mengenai kontrol pasif getaran pada struktur yang mengalami beban eksitasi gempa dengan menggunakan teknik isolasi yang dilakukan pada dasar struktur bangunan. Pada penelitian ini diusulkan penggunaan sistem isolasi dasar dengan menggunakan bantalan karet yang diletakkan di antara kolom pada lantai dasar dengan pondasi yang diharapkan mampu memperkecil perpindahan horisontal struktur bangunan. Model eksperimental yang digunakan adalah model portal baja dua tingkat dengan isolator bantalan karet pada tumpuannya dan diberi beban eksitasi dinamik dengan menggunakan meja getar. Hasil studi teori dan eksperimental untuk berbagai beban dinamik seperti percepatan horisontal gempa El Centro N-S menunjukkan penggunaan isolator pada dasar struktur bangunan memberikan hasil yang memuaskan dalam hal pengurangan tingkat getaran sehingga dapat meningkatkan kualitas keamanan dan kenyamanan struktur. Selain itu penggunaan isolator dasar pada struktur bangunan sangat menguntungkan karena pelaksanaannya yang relatif sederhana.

Kata-kaa Kunci: Kontrol pasif, isolasi dasar, bantalan karet.

Abstract

This study presents a theoretical and experimental study on passive vibration control for structures which are subjected to earthquake excitations using isolation technique which is implemented on the base of the building structure. The base isolation system, made of rubber pads, was proposed in this study to reduce the relative horizontal displacement of the structure. The experimental model for the study is a two-storey steel frame with rubber pads installed on its base. The dynamic excitations were given to the structure through a small shaking table. The theoretical and experimental studies for various dynamic loads, such as sinusoidal acceleration and simulation of El Centro NS earthquake acceleration, show that the use of the base isolator on the structure gives satisfactory results. The base isolation system reduces significantly the vibration level and improves the quality of safety and comfort of the structure. In addition, the use of the base isolator on the structure is very attractive because its implementation is relatively simple.

Keywords: Passive control, base isolator, rubber bearing.

1. Pendahuluan

Indonesia adalah negara kepulauan yang merupakan daerah rawan gempa yang dilalui oleh tiga jalur gempa dunia. Dengan demikian setiap bangunan di Indonesia harus direncanakan tahan terhadap beban gempa dan beban-beban dinamik lainnya sepanjang umur hidup rencananya. Selain itu peraturan dan standar-standar bangunan menuntut persyaratan keamanan dan kenyamanan yang semakin lama semakin tinggi, sehingga perlu dikembangkan suatu konsep perancangan struktur bangunan yang mampu memberikan keamanan dan kenyamanan baik untuk struktur bangunan itu sendiri maupun untuk pemakai bangunan. Hal ini mengakibatkan semakin pentingnya mempelajari masalah struktur bangunan dan perilaku dinamik struktur yang mengalami beban-beban dinamik.

Beban-beban dinamik yang merusak struktur bangunan umumnya adalah beban-beban alam seperti beban gempa yang sulit diukur baik jenis maupun besarnya. Dimensi dan geometri struktur yang tidak tepat dapat memperbesar getaran yang terjadi akibat terjadinya resonansi dan ketidakmampuan struktur bangunan untuk menerima beban-beban dinamik tersebut, sehingga performa bangunan menjadi sangat rendah dan dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang tidak diharapkan. Selain itu getaran yang besar pada struktur bangunan dapat mengganggu fungsi peralatan dan kesehatan manusia yang menempatnya yang pada akhirnya dapat menurunkan kualitas operasi dan kualitas hidup pemakainya. Keamanan dan keandalan struktur seringkali dihubungkan langsung dengan kekakuan dan *massiveness* struktur bangunan. Rancangan konvensional yang konservatif akan menghasilkan struktur yang kaku, yang mengakibatkan buruknya perilaku dinamik dari struktur tersebut.

Beberapa penelitian mengenai isolasi dasar telah dilakukan sebagai upaya melindungi struktur dari kegagalan dengan mengurangi deformasi relatif dari elemen-elemen struktur (Setio, dkk., 2007). Isolasi dasar adalah alternatif yang menjanjikan untuk desain struktur tahan gempa.

Beberapa peneliti (Connor, 2003; Housner, et.al., 1997; Kelly, 1986) telah berusaha untuk mempelajari kinerja dan parameter desain paling menguntungkan untuk sistem isolasi dasar dengan menggunakan berbagai jenis isolator yang berbeda. Berbagai perangkat isolasi seperti *elastomeric bearings*, *lead rubber bearings*, *frictional/sliding bearings* juga telah dikembangkan dan digunakan dalam desain bangunan anti-seismik dan jembatan selama 30 tahun terakhir di banyak negara seperti Selandia Baru, Jepang, Amerika Serikat dan Inggris. (Buckle and Mayes, 1990; Christopolous, and Filiatrault, 2006).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji penggunaan bantalan karet sebagai isolator dasar bangunan yang dapat mengurangi tingkat getaran horisontal struktur bangunan dan dapat dilaksanakan dengan mudah baik pada struktur bangunan baru maupun untuk perbaikan performa struktur bangunan lama.

2. Kontrol Pasif Getaran Struktur Bangunan

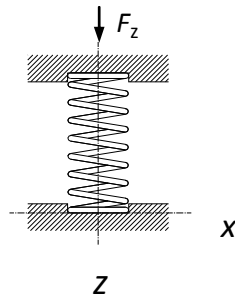
Isolasi getaran struktur bangunan adalah usaha-usaha yang dilakukan untuk mengurangi tingkat getaran yang tidak diinginkan sampai mencapai suatu tingkat getaran yang dapat diterima. Mengingat usaha mengurangi beban eksitasi getaran yang bersumber dari alam seperti beban gempa sangat sulit dilakukan, maka usaha lain yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan isolasi struktur bangunan dengan menggunakan isolator yang diletakkan pada dasar struktur bangunan (Setio, 2009). Kemudian untuk kemudahan penulisan, isolator bantalan karet disebut sebagai isolator dasar. Isolator yang umum digunakan adalah jenis pegas spiral baja dan isolator karet yang dipasang baik dalam bentuk individu atau unit isolator yang terdiri dari masing-masing jenis isolator atau kombinasi dari keduanya.

Jenis dan ukuran isolator dipilih berdasarkan beban yang dapat dipikul, perpindahan maksimum yang boleh terjadi, kekakuan arah aksial dan lateral, redaman, umur material, dan ketahanannya terhadap lingkungan seperti temperatur tinggi, oli, air, asam, dan bahan-bahan merusak lainnya.

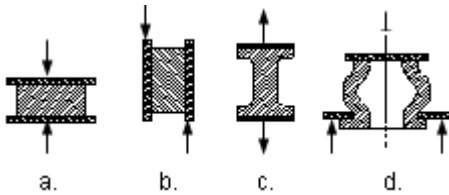
Secara umum, tujuan dari penggunaan isolator adalah untuk mendapatkan harga frekuensi natural dan redaman sistem struktur sesuai dengan nilai yang diinginkan. Frekuensi natural dari sistem ditentukan oleh massa dan kekakuan sistem yang merupakan kekakuan gabungan antara struktur bangunan dengan kekakuan isolator. Nilai kekakuan dan redaman sistem ditentukan dengan melakukan pemilihan jenis isolator yang sesuai dengan nilai yang diinginkan.

2.1 Pegas spiral

Pegas spiral telah digunakan sejak lama untuk keperluan isolasi getaran. Pegas spiral memiliki kekakuan pada arah aksial dan lateral yang besarnya akan menentukan harga frekuensi natural sistem. Pada keadaan kerja normal, perpindahan aksial dari pegas adalah proporsional dengan beban. Hubungan beban dan perpindahan adalah linier. Pegas spiral jarang digunakan sebagai isolator dasar struktur bangunan bertingkat karena mempunyai keterbatasan dalam hal pembuatan. Bentuk pegas spiral yang biasa digunakan sebagai isolator getaran dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Isolator dasar pegas spiral



Gambar 2. Beberapa jenis fungsi isolator karet terhadap gaya luar: a. tekan, b. geser, c. tarik, d. lentur

2.2 Bantalan karet

Material karet telah digunakan sebagai material isolasi getaran selama lebih dari satu abad. Perkembangan yang terbesar pada isolator karet terjadi karena penemuan teknik penggabungan metal dengan karet melalui proses vulkanisasi, sehingga dimungkinkan membuat unit isolator dengan dimensi dan karakteristik yang diinginkan yang dapat menerima beban tekan, tarik dan geser. **Gambar 2** menunjukkan beberapa jenis isolator karet yang biasa digunakan sebagai bantalan.

Karakteristik bantalan karet sangat tergantung dari jenis material, karet alam atau karet sintetis, bentuk dan ukuran material yang digunakan. Material karet selain mempunyai kekakuan juga mempunyai redaman yang cukup penting yang dapat membantu meredam sebagian energi luar yang masuk ke struktur. Karakteristik kekakuan bantalan karet umumnya dapat diidealisasikan dengan perilaku histeretik atau viskoelastik. Semakin sedikit energi gempa diterima oleh struktur bangunan berarti semakin sedikit kerusakan struktur bangunan dan isinya.

Sistem isolator dasar yang paling banyak digunakan adalah dengan menggunakan bantalan elastomer yang terbuat dari karet alam atau karet sintetis yang disebut sebagai neoprene. Dalam pendekatan ini, struktur bangunan diisolasi dari eksitasi horisontal beban gempa dengan menggunakan material yang mempunyai kekakuan horisontal yang relatif rendah dibandingkan dengan kekakuan vertikalnya yang diletakkan di antara struktur atas dan pondasi.

Penggunaan isolator dasar akan menggeser frekuensi natural struktur bangunan ke arah yang lebih kecil. Kekakuan horisontal isolator harus diatur sedemikian

rupa sehingga frekuensi struktur bangunan jauh lebih rendah dari pada frekuensi dominan gerakan tanah akibat gempa. Struktur bangunan yang terisolasi akan mengisolasi gerakan struktur dari mode-mode rendahnya sehingga respon struktur akibat beban gempa akan terjadi pada mode-mode yang lebih tinggi yang mempunyai bentuk yang lebih kaku sehingga respon relatif antara lantai bangunan akibat beban gempa akan menjadi lebih kecil.

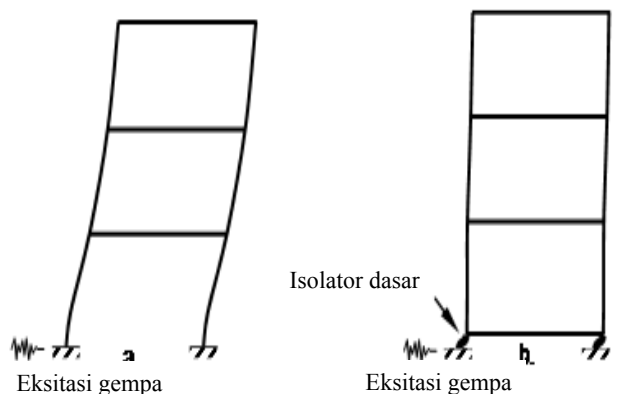
Sebagai ilustrasi pola deformasi struktur bangunan konvensional dan struktur bangunan yang menggunakan isolator dasar ketika menerima beban gempa dapat dilihat pada **Gambar 3**. Pada **Gambar 3b** terlihat bentuk struktur bangunan yang diberikan isolator dasar mempunyai bentuk respon dinamik yang lebih kaku dibandingkan dengan struktur bangunan konvensional pada **Gambar 3.a**. Sifat pegas bantalan tidak menyerap energi gempa, melainkan hanya mengalihkan bentuk deformasi bangunan melalui perhitungan dinamika struktur. Redaman yang ada dalam bantalan karet sangat bermanfaat untuk mengurangi respon getaran yang terjadi ketika struktur bangunan mengalami eksitasi dengan frekuensi eksitasi yang berada di sekitar frekuensi resonansi struktur.

3. Analisis Dinamik Struktur

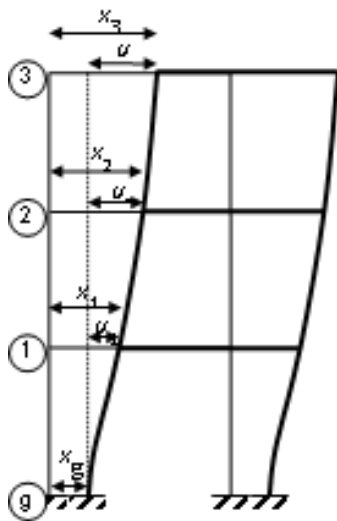
Model struktur bangunan yang digunakan dalam penelitian ini adalah model struktur portal tiga dimensi dua tingkat yang diidealisasikan sebagai model struktur bangunan geser konvensional dua dimensi dengan tiga derajat kebebasan. Sedangkan untuk struktur bangunan yang menggunakan isolator dasar, struktur bangunan dimodelkan sebagai model bangunan geser dengan empat derajat kebebasan.

3.1 Model matematik struktur bangunan

Model struktur portal dengan tiga derajat kebebasan yang mengalami beban gempa $x_g(t)$ diperlihatkan pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Deformasi struktur bangunan yang mengalami eksitasi beban gempa: a. struktur konvensional, b. struktur dengan isolasi dasar



Gambar 4. Model portal dengan beban gempa $x_g(t)$

Persamaan gerak dari model portal jika dikenai beban gempa \ddot{u}_g adalah:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

Dengan $u_i = x_i - x_g$

Untuk menyederhanakan penulisan, bentuk matriks dan vektor selanjutnya ditulis dengan menggunakan huruf besar tebal:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} - \mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g \quad (2)$$

dengan \mathbf{M} , \mathbf{C} , dan \mathbf{K} berturut-turut adalah matriks massa, redaman, dan kekakuan. \mathbf{f} , $\mathbf{1}$, dan \ddot{x}_g adalah vektor gaya, vektor dengan elemen 1, dan percepatan gempa pada tumpuan $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ dan \mathbf{u} berturut-turut adalah vektor percepatan, perpindahan dan kecepatan relatif terhadap tumpuan.

3.1.1 Rasio redaman

Dalam hal praktis nilai redaman suatu sistem biasanya dibandingkan dengan nilai redaman kritis $c_{cr} = 2m\omega$. Perbandingan nilai redaman ξ didefinisikan sebagai:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (3)$$

3.2 Kondensasi dinamik

Pada tahap pengujian eksperimental, pengukuran hanya dilakukan pada beberapa derajat kebebasan dari struktur. Pemilihan titik-titik pengukuran dilakukan berdasarkan kemudahan pengukuran kepentingan analisis dari derajat kebebasan tersebut. Dengan penentuan titik ukur yang tepat, diharapkan dapat dikumpulkan informasi semaksimal mungkin dari respon dan karakteristik struktur.

Dengan adanya pembatasan titik pengukuran, maka derajat kebebasan struktur secara keseluruhan harus dikondensasikan pada titik-titik ukur yang diambil. Pada kondensasi Guyan ini titik-titik yang tidak diukur tidak diabaikan, melainkan dipadatkan sebagai fungsi dari deformasi titik yang diukur.

Untuk tujuan ini, kita melakukan pembagian derajat kebebasan struktur, yaitu:

- derajat kebebasan utama m (dengan $m \ll n$), n adalah jumlah derajat kebebasan total.
- derajat kebebasan sekunder s

Dengan demikian kita dapat melakukan pembagian vektor perpindahan, matriks kekakuan dan matriks massa sebagai berikut:

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_s \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Dengan \mathbf{x}_m dan \mathbf{x}_s adalah koordinat yang berhubungan dengan derajat kebebasan utama dan derajat kebebasan sekunder.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Derajat kebebasan utama dipilih sedemikian rupa sehingga gaya inersia yang berhubungan dengan derajat kebebasan sekunder dapat diabaikan.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_m \\ \mathbf{F}_s \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Dengan $\mathbf{F}_s \approx 0$

Gaya inersia \mathbf{F}_s dapat diabaikan jika massa yang berhubungan dengan derajat kebebasan sekunder sangat kecil, sehingga didapatkan hubungan berikut:

$$\mathbf{K}_{sm} \mathbf{x}_m + \mathbf{K}_{ss} \mathbf{x}_s = 0 \quad (7)$$

dimana,

$$\mathbf{x}_s = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \mathbf{x}_m \quad (8)$$

Selanjutnya didefinisikan transformasi di bawah ini:

$$\mathbf{x} = \Psi \mathbf{x}_m \quad (9)$$

dengan

$$\Psi = \begin{Bmatrix} \mathbf{I} \\ \Psi_{sm} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Transformasi (11) dapat dipakai untuk menyatakan energi kinetik dan energi deformasi sebagai fungsi dari koordinat umum yang baru, untuk energi kinetik

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_m^T \bar{\mathbf{M}}_{mm} \dot{\mathbf{q}}_m \quad (11)$$

untuk energi deformasi

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} = \frac{1}{2} \mathbf{q}_m^T \bar{\mathbf{K}}_{mm} \mathbf{q}_m \quad (12)$$

persamaan Euler-Lagrange dapat ditulis:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_m} \right) + \frac{\delta U}{\delta q_m} = Q_m(t)$$

dengan

$$Q_m = \Psi^T \mathbf{F} \quad (13)$$

Berdasarkan teori osilasi, akan didapatkan persamaan nilai eigen yang terkondensasi dengan dimensi yang lebih kecil dari sistem asalnya.

$$\bar{\mathbf{K}}_{mm} \mathbf{x}_m = \omega^2 \bar{\mathbf{M}}_{mm} \mathbf{x}_m \quad (14)$$

dengan

$$\bar{\mathbf{M}}_{mm} = \Psi^T \mathbf{M} \Psi \text{ matriks massa terkondensasi} \quad (15)$$

$$\bar{\mathbf{K}}_{mm} = \Psi^T \mathbf{K} \Psi \text{ matriks kekakuan terkondensasi} \quad (16)$$

atau

$$\bar{\mathbf{K}}_{mm} = \mathbf{K}_{mm} - \mathbf{K}_{sm}^T \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}$$

$\bar{\mathbf{M}}_{mm}$ dan $\bar{\mathbf{K}}_{mm}$ adalah matriks massa dan kekakuan yang telah dikondensasi dan mempunyai derajat kebebasan yang lebih kecil dari model asalnya. Frekuensi natural sistem terkondensasi dapat diperoleh dengan menggunakan solusi eigen standar.

Persamaan untuk model dinamik dengan banyak derajat kebebasan setelah dikondensasi menjadi:

$$\bar{\mathbf{M}}_{mm} \ddot{\mathbf{x}}_m + \bar{\mathbf{C}}_{mm} \dot{\mathbf{x}}_m + \bar{\mathbf{K}}_{mm} \mathbf{x}_m = \bar{\mathbf{f}}_m - \bar{\mathbf{M}}_{mm} \mathbf{1} \ddot{x}_g \quad (17)$$

Respon dinamik dari **Persamaan (17)** baik untuk jawab stasioner maupun transien dapat diperoleh dengan menggunakan solusi standar.

Untuk kemudahan penulisan, selanjutnya simbol m dan bar dari **Persamaan (17)** akan dihilangkan.

3.3 Respon dinamik struktur

a. Respon stasioner dalam domain frekuensi

Sistem dinamik dengan banyak derajat kebebasan yang mengalami beban eksitasi dinamik sinusoidal dapat diselesaikan dengan menggunakan metode eksak.

Jawab dari **Persamaan (17)** adalah fungsi periodik sinusoidal:

$$x_i(t) = A_i \cos \Omega t + B_i \sin \Omega t$$

$$\dot{x}_i(t) = -\Omega A_i \sin \Omega t + \Omega B_i \cos \Omega t$$

$$\ddot{x}_i(t) = -\Omega^2 A_i \cos \Omega t - \Omega^2 B_i \sin \Omega t \quad (18)$$

dimana A_i dan B_i adalah konstanta-konstanta yang akan dihitung.

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (18)** ke dalam **Persamaan (17)**, kemudian memisahkan suku-suku yang mengandung sinus dan kosinus, dan menyusunnya kembali ke dalam bentuk matriks, maka **Persamaan (17)** dapat ditulis menjadi:

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M} & \Omega \mathbf{C} \\ \hline -\Omega \mathbf{C} & \mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M} \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_c \\ \mathbf{F}_s \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{M} \mathbf{1} \ddot{x}_{gc} \\ \mathbf{M} \mathbf{1} \ddot{x}_{gs} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

Persamaan (19) dapat ditulis dalam bentuk sederhana:

$$D\mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (20)$$

dimana \mathbf{K} , \mathbf{M} , dan \mathbf{C} berturut-turut adalah matriks kekakuan, massa, dan redaman sistem terkondensasi.

Sedangkan \mathbf{v} \ddot{x}_{gc} dan \ddot{x}_{gs} berturut-turut adalah vektor amplitudo komponen sinus dan kosinus dari jawab **Persamaan (18)**, amplitudo beban gempa komponen kosinus dan sinus.

Persamaan (20) adalah persamaan simultan linier. Harga \mathbf{v} dapat diperoleh dengan cara numerik berikut:

$$\mathbf{v} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f} \quad (21)$$

Dari **Persamaan (21)**, amplitudo respon dinamik struktur untuk derajat kebebasan ke i dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan (18)**.

$$x_i(t) = A_i \cos \Omega t + B_i \sin \Omega t$$

atau

$$x_i(t) = R_i \cos(\Omega t - \theta_{id}),$$

$$\dot{x}_i(t) = \Omega R_i \cos(\Omega t - \theta_{iv}),$$

$$\ddot{x}_i(t) = \Omega^2 R_i \cos(\Omega t - \theta_{ia})$$

dengan

$$R_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$$

$$\theta_d = \tan^{-1} \frac{B}{A}, \theta_v = \theta_d + \frac{\pi}{2}, \theta_a = \theta_d + \pi$$

Amplitudo respon dinamik fungsi frekuensi dapat disajikan dalam kurva respon domain frekuensi.

b. Respon tidak stasioner dalam domain waktu

Untuk sistem dinamik dengan banyak derajat kebebasan yang mengalami beban eksitasi sembarang seperti beban gempa, respon struktur dalam domain waktu dapat dihitung dengan menggunakan integrasi numerik standar.

4. Studi Eksperimental

4.1 Pemodelan struktur

Model struktur yang digunakan adalah portal baja tiga dimensi dua tingkat. Dalam perhitungan parameter fisik dan parameter dinamik, model portal baja diidealisasikan sebagai sebuah bangunan geser dua dimensi dengan tiga dan empat derajat kebebasan. Sketsa model dan dimensi struktur yang digunakan diperlihatkan pada **Gambar 5**.

4.1.1 Struktur portal baja

Material struktur portal baja yang digunakan adalah baja A36 dengan modulus elastisitas $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, berat volume $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$, dan properti elemen struktur sebagai berikut: (**Gambar 5**)

Karakteristik mekanik dan dimensi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Balok memanjang:
 - besi pelat,

panjang = 450 mm, lebar = 50 mm, tebal = 5 mm, sofs

- b. Balok melintang:

besi siku L 40x40x3,

panjang = 350 mm, lebar = 40 mm, tebal = 3 mm,

- c. Kolom:

besi pelat,

tinggi kolom dasar = 600 mm, tinggi kolom atas = 550 mm,

lebar = 50 mm, tebal = 5 mm,

4.1.2 Isolator Dasar

Dimensi dan spesifikasi isolator dasar adalah sebagai berikut:

- a. Dimensi dan mutu dudukan pelat baja:

Material pelat baja yang digunakan adalah baja A36 dengan modulus elastisitas $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, berat volume $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$.

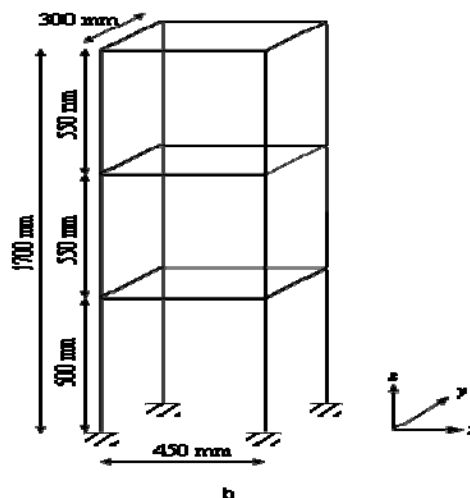
lebar pelat = 50 mm, panjang = 70 mm, dan tebal = 3 mm.

- b. Dimensi karet:

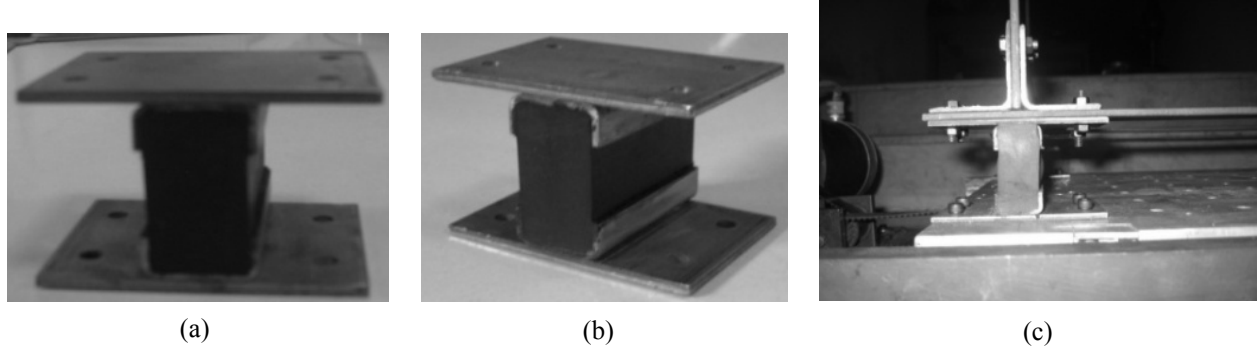
lebar = 20 mm, panjang = 50 mm, dan tinggi = 40 mm,

Isolator berupa bantalan karet yang dipegang oleh dudukan pelat baja seperti diperlihatkan pada **Gambar 6**.

Material bantalan karet yang digunakan berdasarkan nilai kekerasannya dibuat menjadi tiga jenis, yaitu kekerasan lembut, sedang, dan keras, dengan nilai kekerasan karet 25, 50, dan 60. Nilai kekakuan geser horisontal dari ketiga bantalan karet diperlihatkan pada **Tabel 1**.



Gambar 5. Model struktur portal: a. Model fisik, b. Dimensi struktur portal baja



Gambar 6. Isolator dasar bantalan karet; a. Tampak depan, b. Tampak samping, c. Terpasang pada dasar struktur

Tabel 1. Properti bantalan karet

Properti	Lembut (1)	Sedang (2)	Keras (3)
Hardness	25	50	60
G (kg/cm ²)	4,98	14,13	16,07
K_g (kg/m)	1.243	3.532	4.017

dengan G dan K_g adalah modulus geser dan kekakuan geser horisontal bantalan karet. K_g ditentukan dengan melakukan uji geser static pada isolator.

4.2 Model matematik elemen hingga

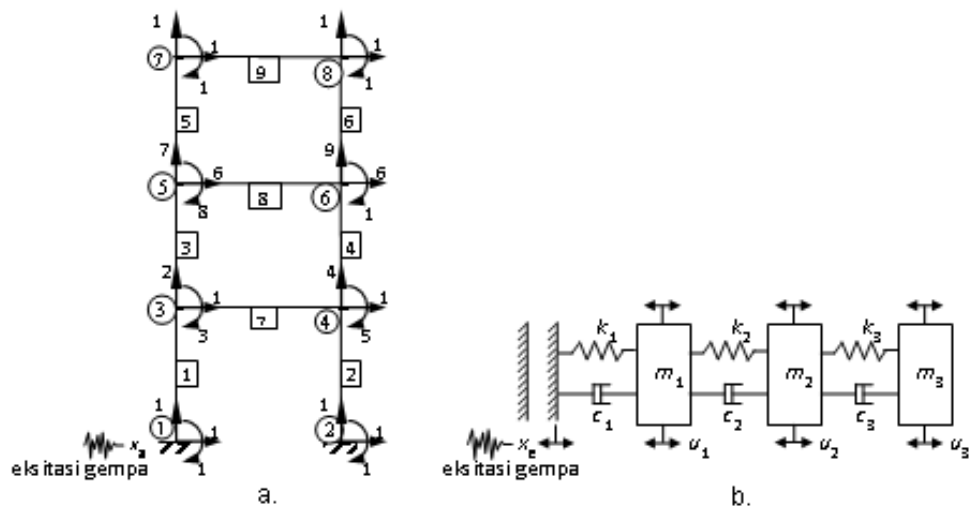
Model matematik struktur portal 3D dibuat dengan menggunakan model matematik elemen hingga frame 2D dengan setiap titik nodal mempunyai 3 derajat kebebasan pada arah lateral horisontal, vertikal, dan rotasi.

Struktur portal baja tanpa isolator dasar mempunyai 15 derajat kebebasan yang disederhanakan menjadi struktur bangunan geser dua dimensi dengan menganggap simpangan horisontal di setiap lantai sama, perpindahan pada arah vertikal dan rotasional relatif kecil sehingga dapat dipadatkan.

Penyederhanaan model matematik portal frame menjadi portal bangunan geser dilakukan dengan menggunakan metode kondensasi Guyan dengan memadatkan derajat kebebasan pada arah vertikal dan rotasi sehingga jumlah derajat kebebasan struktur portal menjadi 3 derajat kebebasan.

Dengan prosedur yang sama, struktur portal baja dengan isolator dasar mempunyai 20 derajat kebebasan disederhanakan dengan menggunakan metode kondensasi Guyan menjadi struktur bangunan geser dua dimensi dengan 4 derajat kebebasan.

Pemodelan matematik elemen hingga struktur portal tanpa isolator dasar beserta model massa-pegas ekivalennya dapat dilihat pada Gambar 7. Nomor derajat kebebasan ekuivalen dari model portal dapat dilihat pada model massa-pegas ekivalen pada Gambar 7b. Model elemen hingga dan model massa-pegas ekivalen dari struktur portal dengan isolator dasar dapat dilihat pada Gambar 8a dan 8b. Untuk selanjutnya, istilah derajat kebebasan disingkat menjadi DOF (*degree-of-freedom*).



Gambar 7. Model matematik struktur portal tanpa isolator dasar: a. model matematik elemen hingga, b. model matematik massa-pegas ekivalen

4.3 Identifikasi struktur berdasarkan pengujian eksperimental

Parameter-parameter struktur yang diperoleh dari perhitungan secara teoritis dengan menggunakan model matematik elemen hingga harus diuji ketepatannya dengan melakukan identifikasi karakteristik dinamik dari prototipe model eksperimental (Setio, dkk., 1999; Setio, 2008). Pengujian dinamik akan menghasilkan fungsi respon frekuensi yang digunakan untuk menghitung parameter-parameter dinamik dari model struktur yaitu frekuensi natural, rasio redaman dan mode getar. Dalam studi eksperimental ini digunakan metode penghalusan kurva untuk mencari parameter-parameter dinamik model struktur yang digunakan. Hasil pengujian eksperimental berdasarkan metode penghalusan kurva diperoleh frekuensi natural, mode getar, dan rasio redaman berikut:

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 24,89 \\ 82,28 \\ 149,88 \end{bmatrix} \text{ rad/s} \quad \bar{\Phi} = \begin{bmatrix} -0.1419 & -0.3257 & 0.2660 \\ -0.2743 & -0.0953 & -0.3409 \\ -0.3411 & 0.3493 & 0.2868 \end{bmatrix} \quad \bar{\xi} = \begin{bmatrix} 0,0199 \\ 0,0258 \\ 0,0418 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan parameter-parameter dinamik model struktur yang diperoleh dari pengujian eksperimental dapat dihitung parameter-parameter fisik model struktur yaitu matriks massa, matriks kekakuan, dan matriks redaman. Matriks massa dan matriks kekakuan model matematik yang bersesuaian dengan parameter dinamik hasil pengujian diperoleh dengan melakukan koreksi terhadap matriks massa dan matriks kekakuan

yang diperoleh dari perhitungan secara teoritis dengan menggunakan model matematik elemen hingga. Matriks redaman diperoleh dengan menggunakan rasio redaman hasil pengujian dan besarnya diambil secara proporsional terhadap matriks massa dan matriks kekakuan. Parameter-parameter fisik model struktur yang diperoleh dari hasil perhitungan teoritis dan dari hasil identifikasi eksperimental dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Selanjutnya untuk perhitungan teori, parameter-parameter model struktur yang digunakan untuk simulasi adalah matriks massa dan matriks kekakuan hasil koreksi yang diperoleh berdasarkan pengujian eksperimental yang diperlihatkan pada **Tabel 2**.

Pemodelan matematik elemen hingga portal dengan menggunakan isolator dasar beserta model massa-pegas ekuivalennya dapat dilihat pada **Gambar 8**

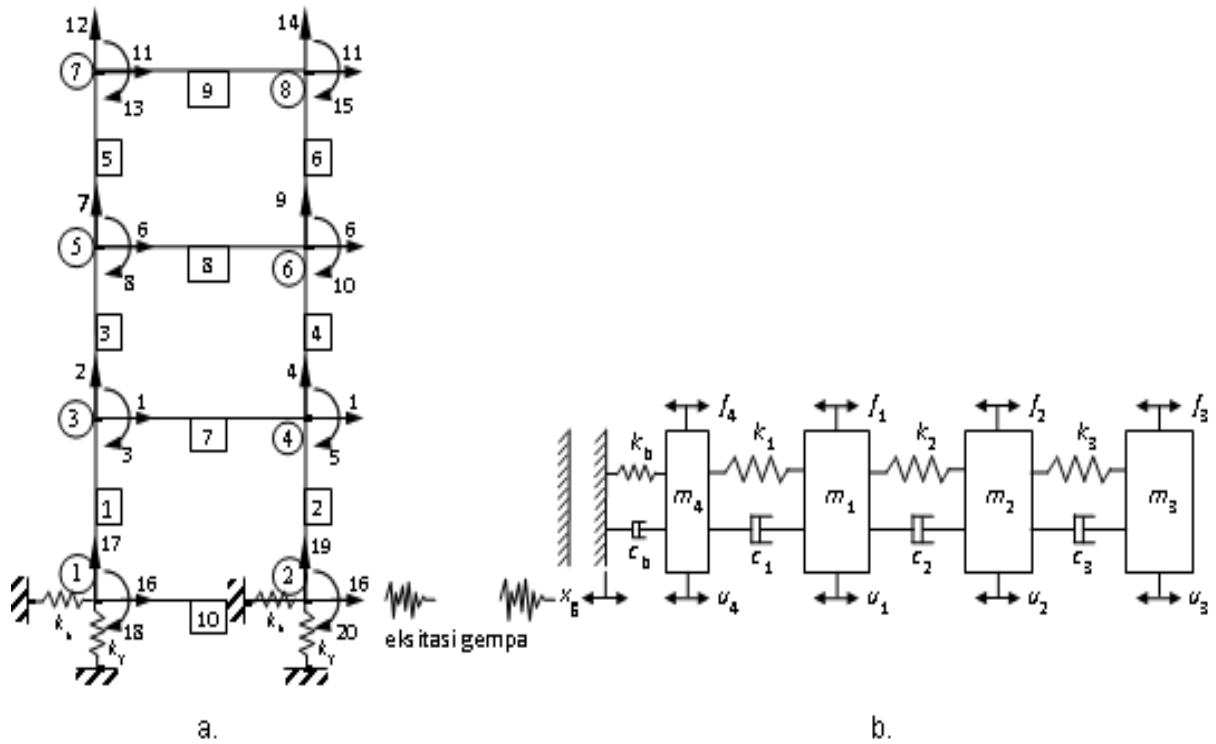
k_h diperoleh dari pengukuran kekakuan geser horizontal isolator dasar seperti diperlihatkan pada **Tabel 1**. Tidak dilakukan pengukuran pada k_y karena derajat kebebasan terkait dapat diabaikan.

Karakteristik dinamik portal dihitung dengan menggunakan solusi problem eigen standar. Frekuensi natural beserta mode getar struktur dengan dan tanpa isolator dasar dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Mode-mode getar bangunan geser struktur portal tanpa isolator dasar dan dengan isolator dasar dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 2. Frekuensi natural dan mode getar struktur portal tanpa isolator dasar diperoleh berdasarkan model matematik elemen hingga dan model eksperimental

TANPA ISOLATOR DASAR		
Model matematik	Hasil identifikasi	Model koreksi
$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 5,2426 & 0,5204 & -0,1178 \\ 0,5204 & 5,2515 & 0,5973 \\ -0,1178 & 0,5973 & 3,2585 \end{bmatrix} \text{ kg}$		$\hat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 5,1376 & 0,5089 & -0,1152 \\ 0,5089 & 5,1488 & 0,5841 \\ -0,1152 & 0,5841 & 3,1916 \end{bmatrix} \text{ kg}$
$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 49536 & -30277 & 5189 \\ -30277 & 48431 & -23426 \\ 5189 & -23426 & 18830 \end{bmatrix} \text{ N/m}$	$\bar{\xi} = \begin{bmatrix} 0,0199 \\ 0,0258 \\ 0,0418 \end{bmatrix}$	$\hat{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} 51666 & -31578 & 5412 \\ -31578 & 50514 & -24434 \\ 5412 & -24434 & 19640 \end{bmatrix} \text{ N/m}$
$\omega = \begin{bmatrix} 24,12 \\ 79,75 \\ 145,33 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$	$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 24,89 \\ 82,28 \\ 149,88 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$	$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 24,89 \\ 82,28 \\ 149,88 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$
$\Phi = \begin{bmatrix} -0.1404 & -0.3224 & 0.2633 \\ -0.2715 & -0.0944 & -0.3376 \\ -0.3376 & 0.3457 & 0.2839 \end{bmatrix}$	$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} -0.1419 & -0.3257 & 0.2660 \\ -0.2743 & -0.0953 & -0.3409 \\ -0.3411 & 0.3493 & 0.2868 \end{bmatrix}$	$\hat{\Phi} = \begin{bmatrix} -0.1419 & -0.3257 & 0.2660 \\ -0.2743 & -0.0953 & -0.3409 \\ -0.3411 & 0.3493 & 0.2868 \end{bmatrix}$



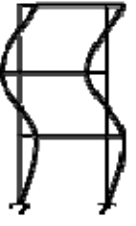
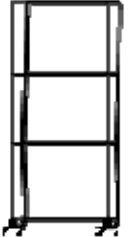





Gambar 8. Model matematik struktur portal dengan isolator dasar: a. model matematik elemen hingga, b. model matematik massa-pegas ekivalen

Tabel 3. Frekuensi natural dan mode getar struktur portal dengan isolator dasar

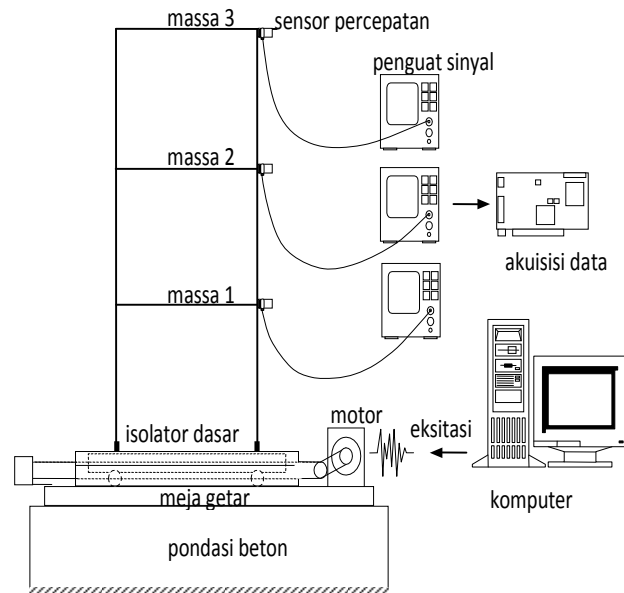
Jenis isolator dasar	Dengan isolator dasar	
	Frekuensi natural	Mode
Lembut (1)	$\omega_1 = \begin{bmatrix} 2,42 \\ 22,78 \\ 93,57 \\ 130,69 \end{bmatrix} \text{ rad/s}, f_1 = \begin{bmatrix} 0,38 \\ 3,63 \\ 14,89 \\ 20,80 \end{bmatrix} \text{ Hz}$	$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 0.2870 & -0.5804 & -0.2740 & -0.6608 \\ 0.5390 & -0.2495 & -0.3100 & 0.6627 \\ 0.7918 & 0.1528 & 0.4410 & -0.1673 \\ 0.0097 & -0.7600 & 0.7965 & 0.3100 \end{bmatrix}$
Sedang (2)	$\omega_2 = \begin{bmatrix} 2.43 \\ 34.08 \\ 104.15 \\ 131.71 \end{bmatrix} \text{ rad/s}, f_2 = \begin{bmatrix} 0.39 \\ 5.42 \\ 16.58 \\ 20.96 \end{bmatrix} \text{ Hz}$	$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 0.2836 & 0.6786 & -0.1644 & 0.6601 \\ 0.5382 & 0.3114 & -0.3360 & -0.6133 \\ 0.7937 & -0.2388 & 0.4335 & 0.1127 \\ 0.0034 & 0.6209 & 0.8199 & -0.4189 \end{bmatrix}$
Keras (3)	$\omega_3 = \begin{bmatrix} 2.43 \\ 35.51 \\ 106.30 \\ 132.03 \end{bmatrix} \text{ rad/s}, f_3 = \begin{bmatrix} 0.39 \\ 5.65 \\ 16.93 \\ 21.01 \end{bmatrix} \text{ Hz}$	$\Phi_3 = \begin{bmatrix} 0.2834 & 0.6930 & -0.1387 & 0.6576 \\ 0.5382 & 0.3208 & -0.3479 & -0.5970 \\ 0.7938 & -0.2539 & 0.4340 & 0.0965 \\ 0.0030 & 0.5936 & 0.8194 & -0.4492 \end{bmatrix}$

Tabel 4. Mode-mode getar struktur portal tanpa isolator dasar dan dengan isolator dasar

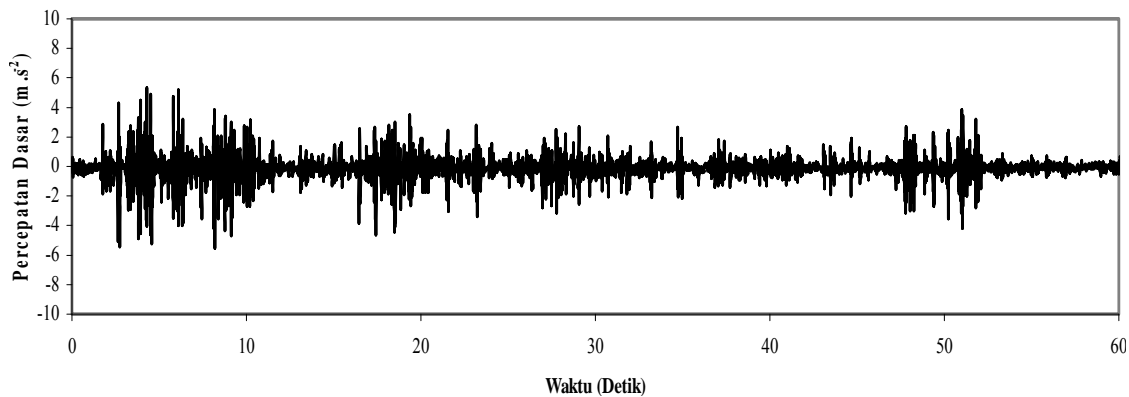
Jenis Struktur	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Tanpa isolator dasar				
Dengan isolator dasar				

Dalam studi ini model struktur diberi eksitasi luar berupa percepatan dasar yang dibangkitkan oleh motor step yang menggerakkan landasan meja getar. Motor step ini bekerja berdasarkan sinyal analog yang dibangkitkan oleh pembangkit sinyal yang telah dikonversi sebelumnya oleh perangkat akuisisi data menjadi dua sinyal digital dan satu sinyal analog (Setio, dkk., 1999) Akibat dari percepatan dasar ini, struktur melakukan suatu gerakan osilasi. Gerakan struktur ini diamati dan diukur besar respon percepatan di tiga titik derajat kebebasan struktur. Kemudian sinyal respon percepatan yang berupa sinyal analog yang telah diperkuat oleh perangkat penguat sinyal, diumpungkan ke perangkat akuisisi data untuk diolah. Konfigurasi perangkat keras yang digunakan dalam studi eksperimental dapat dilihat pada Gambar 9.

Percepatan dasar yang digunakan dalam studi eksperimental ini adalah percepatan gempa El Centro N-S yang merupakan pola rekaman percepatan gempa El Centro arah Utara-Selatan dengan selang waktu 0,02 detik. Gambar grafik percepatan gempa El Centro N-S yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 9. Skema studi eksperimental dengan menggunakan meja getar



Gambar 10. Percepatan dasar horizontal gempa El Centro N-S

5. Hasil Studi dan Pembahasan

Pada studi ini, model struktur diberikan eksitasi percepatan gempa El Centro N-S, masing-masing untuk struktur tanpa isolator dasar dan struktur dengan isolator dasar jenis isolator-1 (lembut), isolator-2 (sedang), dan isolator-3 (keras).

Hasil pengujian eksperimental berupa respon simpangan struktur tanpa isolator dasar dan struktur dengan isolator dasar dalam domain waktu dapat dilihat pada **Gambar 11-13**. Perbandingan performa respon struktur tanpa isolator dan struktur dengan berbagai jenis isolator dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Dari **Tabel 5** dapat dilihat, perbandingan antara respon simpangan struktur tanpa isolator dan respon simpangan struktur dengan isolator beserta reduksinya. Reduksi simpangan struktur yang diperoleh dengan menggunakan isolator-1 berkisar antara 84,60 – 92,57%, dengan isolator-2 berkisar antara 58,13 – 79,78%, dan dengan isolator-3 berkisar antara 52,84 – 77,21%.

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa efektivitas penggunaan isolator dasar sangat tergantung pada kekakuan geser isolator. Makin kecil kekakuan gesernya, makin besar reduksi respon struktur yang diperoleh. Namun demikian, kelenturan isolator harus dibatasi untuk menghindari deformasi dasar yang berlebihan.

6. Kesimpulan

1. Berdasarkan parameter dinamik yang diperoleh dari pengujian dan dengan melakukan koreksi terhadap matriks massa dan kekakuan, dapat dihitung model matematik struktur riil dengan akurasi sangat baik.
2. Serangkaian uji eksperimental dengan simulasi eksitasi dasar gempa El-Centro 1940 menunjukkan bahwa penggunaan isolator dasar dengan bantalan karet dapat memberikan pengurangan respon dinamik yang cukup penting. Isolator dengan kekakuan rendah, isolator 1, memberikan reduksi respon yang paling besar dibandingkan dengan isolator yang lebih kaku.
3. Penggunaan bantalan karet sebagai isolator dasar sangat menguntungkan karena pembuatannya yang relatif sederhana dan memiliki kemampuan meredam respon dinamik yang sangat baik.

7. Ucapan Terimakasih dan Penghargaan

Penelitian ini didanai oleh program *Research Grant 2009 IMHERE Project B.2C*, Institut Teknologi Bandung. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah

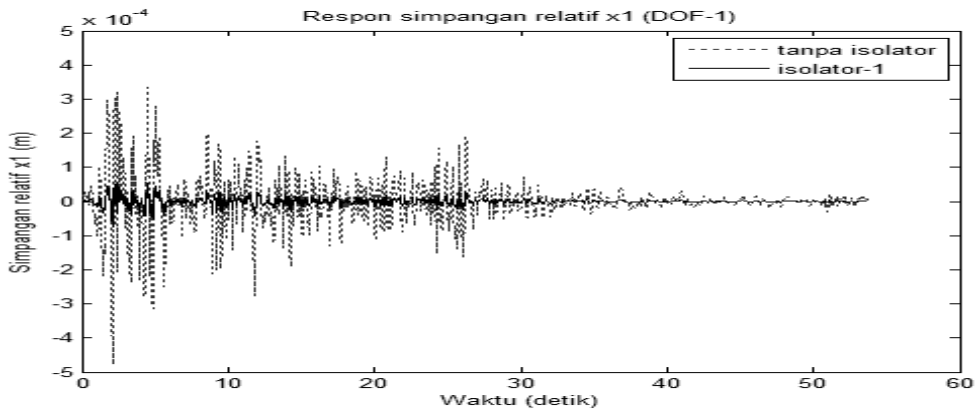
mendukung terlaksananya penelitian ini yang diharapkan dapat memberikan dampak nyata bagi pengembangan infrastruktur tahan gempa.

Daftar Pustaka

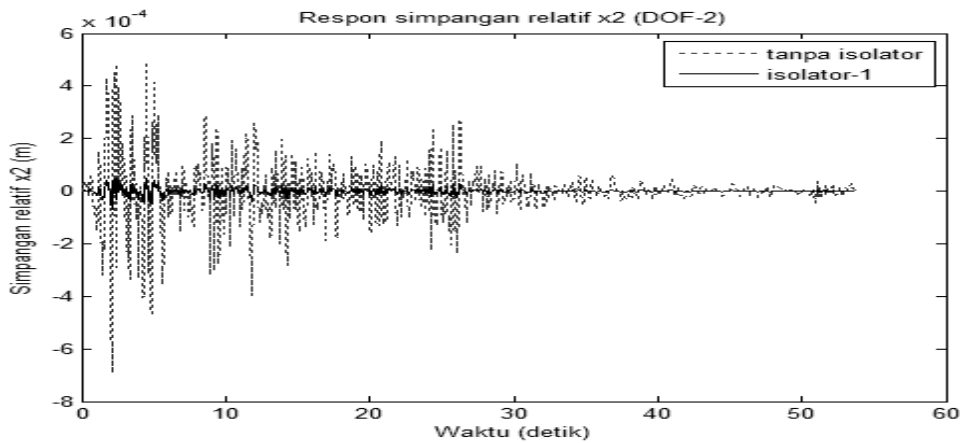
- Buckle, I.G., Mayes, R.L., 1990, *Seismic Isolation: History, Application, and Performance - A World Overview*, Earthquake Spectra, 6, 161-202.
- Christopolous, C., Filiatrault, A., 2006, *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, Pavia, Italy: IUSS Press.
- Connor, J.J., 2003, *Introduction to Structural Motion Control*, Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T.P., 1997, Structural Control: Past, Present, and Future, *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897-971.
- Kelly, J.M., 1986, *Aseismic Base Isolation: A Review and Bibliography*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 5, 202-216.
- Setio, H.D., Halim, Budi S., Gunawan, Tommy, Setio, S., 1999, *Studi Eksperimental Kontrol Aktif Struktur dengan Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan*, Bandung: Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan.
- Setio, H.D., 2009, *Base Isolation of Structures Using Hysteretic Non-Linear Passive Damper*, Bandung, West Java, Indonesia: International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries, November, 2-3, ISBN 978-979-98278-2-1.
- Setio, H.D., 2008, Smart Structure under Dynamic Loading, Taiwan: *Proceeding The Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC - 11)*.
- Setio, H.D., dan Setio, S., Kusuma, S., 2007, A Comparative Study an Active and Passive Control System of Building Structures Excited by Seismic Loadings, Jakarta: European Asian Civil Engineering Forum, *Proceeding The Future Development in Structural and Civil Engineering Based on Research and Practical Experience*.

Tabel 5. Perbandingan reduksi respon relatif simpangan struktur tanpa dan dengan isolator akibat eksitasi percepatan dasar gempa El Centro N-S

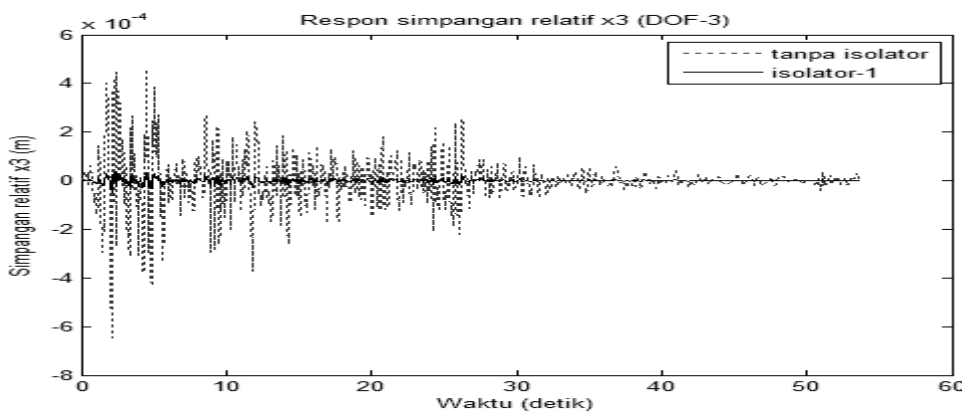
Derajat Kebebasan	Respon Simpangan RMS Struktur (10^{-5} m)						
	Tanpa Isolator Dasar	Isolator-1	Reduksi (%)	Isolator-2	Reduksi (%)	Isolator-3	Reduksi (%)
DOF-1	6,473	0,971	84,60	2,710	58,13	3,053	52,84
DOF-2	9,420	0,926	90,17	2,523	73,22	2,843	69,82
DOF-3	8,781	0,652	92,57	1,776	79,78	2,001	77,21



(a)

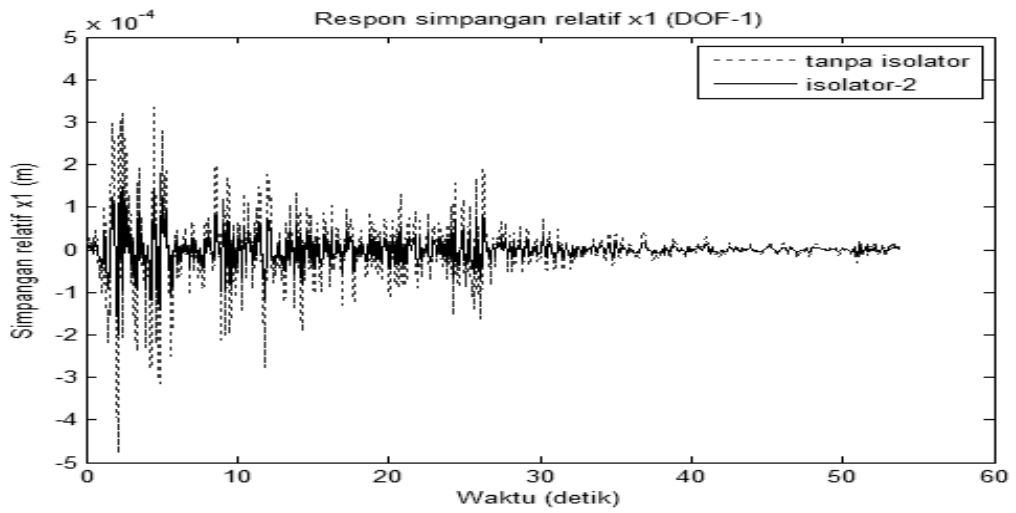


(b)

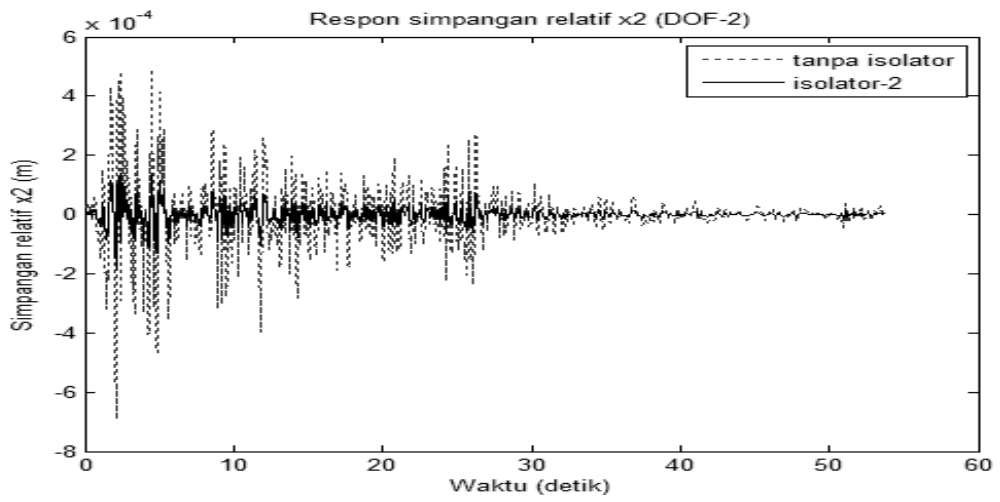


(c)

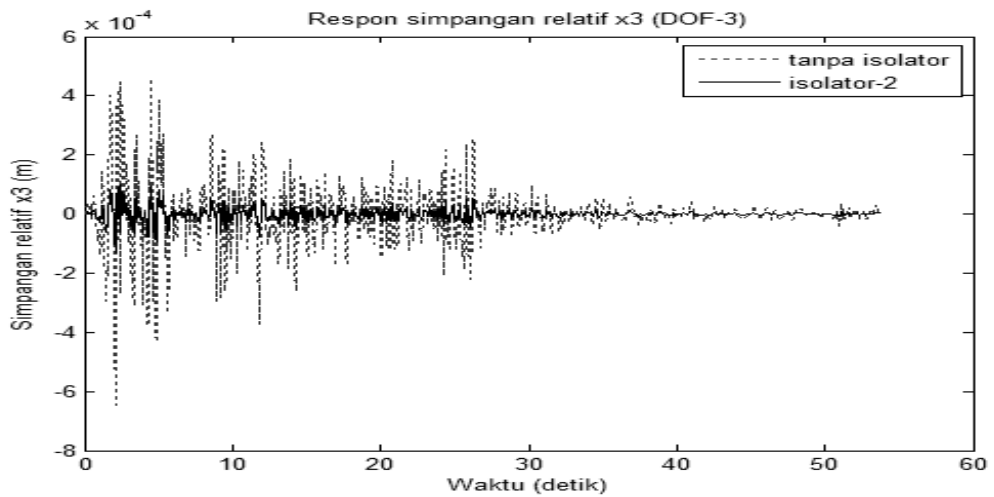
Gambar 11. Respon simpangan struktur dengan isolator-1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: a. DOF-1, b. DOF-2, c. DOF-3



(a)

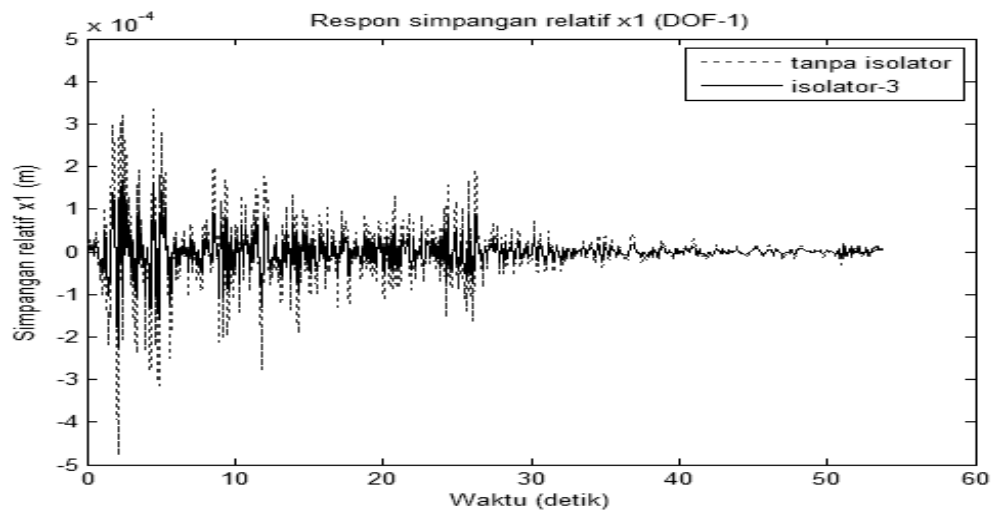


(b)

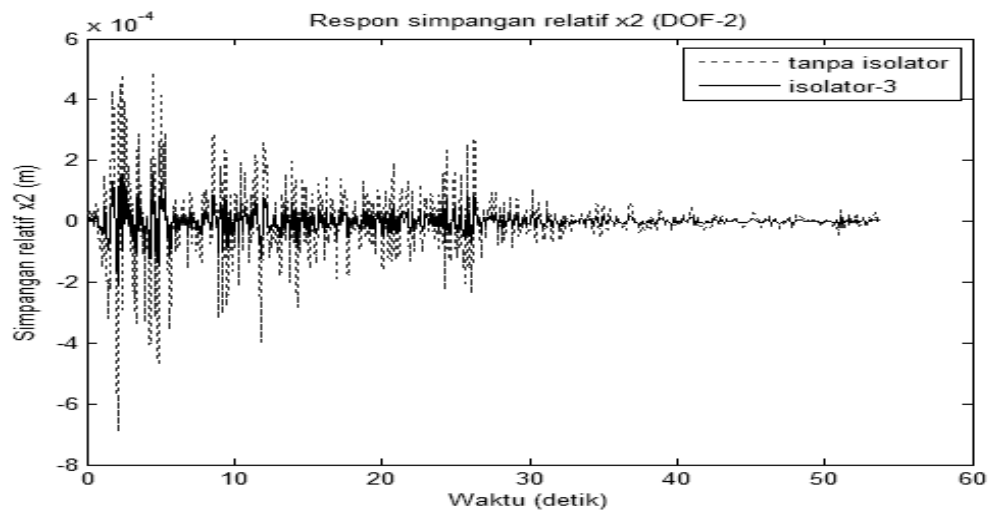


(c)

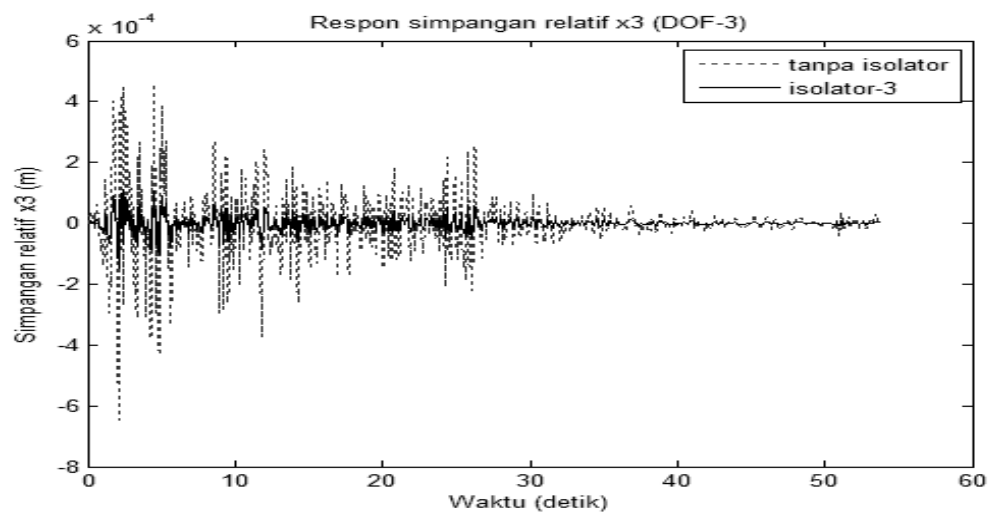
Gambar 12. Respon simpangan struktur dengan isolator-2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: a. DOF-1, b. DOF-2, c. DOF-3



(a)



(b)



(c)

Gambar 13. Respon simpangan struktur dengan isolator-3 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S:
a. DOF-1, b. DOF-2, c. DOF-3