

STUDI EFEKTIFITAS PENGGUNAAN *TUNED MASS DAMPER* PADA STRUKTUR GEDUNG DALAM MEREDUKSI RESPONS DINAMIK AKIBAT BEBAN SEISMIK

Wong Foek Tjong, Takim Andriono

Dosen Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil - Universitas Kristen Petra

Robby Sumendap

Site Engineer, Nusa Raya Cipta

Freddy Gunawan

Site Engineer, Surya Bangun Persada Indah

ABSTRAK

Untuk mengatasi masalah guncangan yang berlebihan pada struktur gedung akibat beban dinamis, telah dikembangkan konsep kontrol pada struktur dengan menggunakan *Tuned Mass Damper* (TMD). Tulisan ini menyajikan studi efektifitas TMD yang dipasang pada struktur gedung 1, 5, 10, dan 15 tingkat yang dikenai akselerogram gempa-gempa El Centro 1940, Denpasar 1981, dan Pacoima 1971 (modifikasi). Dalam melakukan analisis dinamis, struktur dimodelkan sebagai bangunan geser elastis linier dua dimensi dengan TMD pada lantai teratas. Efektifitas TMD dievaluasi dengan membandingkan respons perpindahan, simpangan antar tingkat, dan percepatan dari struktur tanpa dan dengan TMD. Massa TMD ditetapkan sebesar 1%, 2%, dan 3% dari massa struktur utamanya. Hasil studi menunjukkan umumnya respons struktur dapat teredam. Meskipun demikian, pada beberapa kasus dapat terjadi respons struktur bertambah besar, sehingga penggunaan TMD untuk mereduksi respons akibat gempa perlu dipertimbangkan lagi.

Kata kunci: kontrol, TMD, gempa, analisis dinamis, perpindahan, simpangan antar tingkat, percepatan.

ABSTRACT

One of the approaches to reduce excessive oscillation on buildings due to dynamic forces is by installing a mechanical device called tuned mass damper (TMD). This paper presents a study on the effectiveness of TMDs installed on the top story of 1, 5, 10, and 15-story buildings excited by earthquake accelerograms of El Centro 1940, Denpasar 1981, and Pacoima 1971. Two-dimensional linear-elastic shear building model with TMD on the top is used in performing dynamic analysis. The effectiveness of the TMD is evaluated by comparing the responses: displacement, inter-story drift, and acceleration, with and without TMD. The results of the study show that the responses are generally damped. However, in some cases the responses could be larger, thus using of TMD for reducing seismic response should be reconsidered.

Keywords: control, TMD, earthquake, displacement, inter-story drift, acceleration.

PENDAHULUAN

Struktur-struktur seperti gedung bertingkat tinggi, jembatan berbentuk panjang, menara pemancar televisi, dan landasan lepas pantai umumnya sangat fleksibel sehingga bila terkena beban dinamis mudah mengalami per-

goyangan yang berlebihan. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menerapkan teknologi kontrol pada struktur.

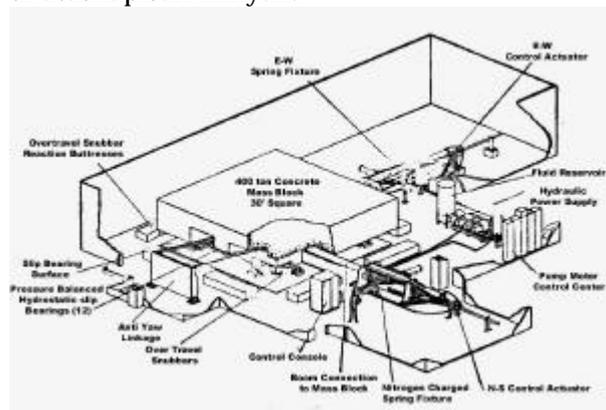
Kontrol pada struktur dibagi menjadi dua jenis berdasarkan perlu tidaknya energi untuk menghasilkan gaya kontrol, yaitu kontrol aktif dan kontrol pasif. Kontrol aktif memerlukan arus listrik untuk operasi alat dan menghasilkan gaya kontrol, sedangkan kontrol pasif menggunakan energi potensial yang dibangkit-

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 November 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Dimensi Teknik Sipil Volume 6 Nomor 1 Maret 2004.

kan oleh respons struktur untuk menghasilkan gaya kontrol. Kelebihan kontrol aktif adalah karakteristik dinamik struktur dapat beradaptasi dengan beban dinamis yang timbul, sedangkan kelebihan kontrol pasif adalah karena kesederhanaan dalam desain, pemasangan, dan terutama pemeliharannya.

Salah satu alat kontrol pasif pada struktur yang berdasarkan penggunaan massa tambahan sebagai sistem penyerap energi adalah *Tuned Mass Damper* (TMD). Alat ini dapat dipasang pada bermacam-macam struktur: gedung bertingkat tinggi, menara, bentangan yang panjang, dan jembatan [1]. Tujuan utama pemasangan TMD: pada gedung tinggi untuk mengurangi goyangan gedung akibat angin, pada menara untuk mengurangi goyangan akibat gempa bumi dan angin, pada struktur berbentuk panjang untuk mengurangi getaran akibat lalu lintas, dan pada jembatan untuk mengurangi goyangan akibat angin atau getaran akibat lalu lintas.

Contoh gedung bertingkat tinggi yang menggunakan TMD adalah gedung Citicorp Center di Manhattan, New York [2,3,4]. Gambar 1 memperlihatkan sistem TMD yang dipasang pada gedung 59 lantai Citicorp Center di Manhattan, New York. Massanya berupa blok beton berbobot sekitar 373 ton. Blok ini bergeser di atas lapisan minyak.



Gambar 1. Sistem *Tuned Mass Damper* MTS Corp., Citicorp Center, New York [4].

Telah disebutkan bahwa TMD dipasang pada gedung bertingkat tinggi terutama untuk mereduksi respons dinamis akibat beban angin. Meskipun demikian keberadaan TMD itu tentu akan mempengaruhi respons dinamis akibat beban gempa bumi. Diharapkan respons dinamis dari gedung dengan TMD, akibat gempa, lebih kecil daripada respons dinamis seandainya gedung itu tanpa TMD.

Dalam tulisan ini akan disajikan studi efektifitas TMD dalam mereduksi respons struktur gedung dengan berbagai tingkat terhadap beberapa macam gempa. Struktur gedung yang ditinjau adalah struktur rangka satu, lima, sepuluh, dan 15 lantai. Akselerogram-akselerogram gempa yang digunakan adalah El Centro 1940, Pacoima Dam 1971 Modifikasi [5], dan Denpasar 1981. Di dalam melakukan analisis dinamis, struktur gedung dimodelkan sebagai bangunan geser (*shear building*) linear-elastis dengan perletakan jepit. Redaman pada bangunan geser dianggap redaman *viscous*, yaitu redaman yang besarnya sebanding dengan kecepatan relatif. Karakteristik dinamik (massa, kekakuan dan redaman) dari bangunan geser dan TMD dianggap tidak berubah terhadap waktu (*time-invariant*).

Respons akibat gempa pada bangunan yang memakai TMD dihitung dengan metode *state-space*, suatu metode pemecahan masalah dinamis yang banyak digunakan dalam bidang teknik kontrol [6]. Respons yang ditinjau adalah simpangan antar tingkat, perpindahan relatif, dan percepatan total. Efektifitas TMD dievaluasi dengan membandingkan respons struktur dengan TMD dengan massa 1%, 2%, dan 3% dari massa total struktur utamanya dengan respons yang tidak menggunakan TMD. Proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan program komputer yang ditulis dalam bahasa pemrograman MATLAB 5.2.

DASAR TEORI

Representasi *State-Space* dari Sistem Berderajat Kebebasan Banyak

Tinjau struktur gedung yang mengalami gaya-gaya luar dan gaya-gaya kontrol dan dimodelkan sebagai bangunan geser dua dimensi berderajat kebebasan n . Persamaan gerak bangunan geser itu adalah

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = du(t) + ef(t) \quad (1)$$

Matriks m , c , dan k masing-masing adalah matriks massa, redaman, dan kekakuan, berdimensi $n \times n$. Vektor $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, dan $x(t)$ masing-masing menyatakan vektor percepatan, kecepatan, dan perpindahan arah horizontal dari lantai-lantai bangunan geser, berdimensi n . Vektor $f(t)$ adalah vektor berdimensi $r \leq n$, yang mewakili gaya-gaya luar. Vektor $u(t)$ adalah vektor gaya kontrol berdimensi $m \leq n$. Matriks d ($n \times m$) dan matriks e ($r \times n$) adalah matriks-

matriks lokasi, masing-masing mendefinisikan lokasi dari gaya kontrol dan gaya luar.

Representasi *state-space* dari persamaan (1) adalah [7]

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}\mathbf{f}(t), \quad \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0 \quad (2)$$

di mana

$$\mathbf{z}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

adalah vektor *state* berdimensi $2n$.

Matriks \mathbf{A} adalah matriks sistem, berdimensi $2n \times 2n$.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{m}^{-1}\mathbf{k} & -\mathbf{m}^{-1}\mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matriks \mathbf{B} dan \mathbf{H} masing-masing adalah matriks lokasi gaya kontrol (berdimensi $2n \times m$) dan matriks lokasi gaya luar (berdimensi $2n \times r$) dalam bentuk *state-space*.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{m}^{-1}\mathbf{d} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{m}^{-1}\mathbf{e} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dalam persamaan (4) dan (5), $\mathbf{0}$ dan \mathbf{I} masing-masing adalah matriks nol dan matriks identitas berdimensi $n \times n$.

Untuk kasus bangunan geser bertingkat n yang diguncang oleh percepatan pada tumpuan dalam arah horizontal, $\ddot{y}_s(t)$, persamaan geraknya adalah

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}_{cf}(t), \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{cf}(t) = -\mathbf{m}\{\mathbf{1}\}\ddot{y}_s(t)$$

di mana $\{\mathbf{1}\}$ adalah vektor berdimensi n yang semuanya berisi angka 1. Vektor $\ddot{\mathbf{x}}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$, dan $\mathbf{x}(t)$ masing-masing adalah vektor percepatan, kecepatan, dan perpindahan relatif terhadap tanah.

Dengan membandingkan persamaan (6) dan persamaan (1) dapat disimpulkan bahwa persamaan (6) dapat diperoleh dari persamaan (1) dengan menetapkan

$$\mathbf{d} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{e} = -\mathbf{m}, \quad \text{dan } \mathbf{f}(t) = \{\mathbf{1}\}\ddot{y}_s(t).$$

Dengan demikian persamaan *state* untuk bangunan geser yang diguncang gempa bumi dapat ditulis sebagai

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{H}\{\mathbf{1}\}\ddot{y}_s(t) \quad (7)$$

dengan

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{m}^{-1}\mathbf{k} & -\mathbf{m}^{-1}\mathbf{c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Solusi Persamaan State

Solusi persamaan *state* yang dibahas di dalam bagian ini dibatasi untuk kasus sistem dinamik yang linier dan *time-invariant*.

Solusi umum persamaan *state*

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (9)$$

dengan kondisi awal $\mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0$ terdiri atas dua bagian, yaitu bagian solusi homogen dan bagian solusi khusus. Solusi persamaan *state* homogen

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) \quad (10)$$

dengan kondisi awal $\mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0$ adalah [6]

$$\mathbf{z}(t) = \left[\mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{1}{2!}\mathbf{A}^2t^2 + \dots + \frac{1}{j!}\mathbf{A}^jt^j + \dots \right] \mathbf{z}_0 \quad (11)$$

Pernyataan di dalam kurung siku pada ruas kanan dari persamaan (11) adalah suatu matriks yang dimensinya sama dengan dimensi matriks \mathbf{A} . Karena kemiripannya dengan deret pangkat tak terhingga dari fungsi eksponensial (skalar), maka pernyataan di dalam kurung itu disebut eksponensial matriks dan ditulis

$$\mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{1}{2!}\mathbf{A}^2t^2 + \dots + \frac{1}{j!}\mathbf{A}^jt^j + \dots = e^{\mathbf{A}t} \quad (12)$$

Dinyatakan dalam eksponensial matriks, persamaan (12) dapat ditulis sebagai

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}t}\mathbf{z}_0 \quad (13)$$

Solusi khusus dari persamaan (9) dengan kondisi awal $\mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0 = \mathbf{0}$ adalah

$$\mathbf{z}(t) = \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau)d\tau \quad (14)$$

Dengan demikian, solusi lengkap persamaan (9) adalah penjumlahan dari solusi homogen dan solusi khusus, yaitu

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}t}\mathbf{z}_0 + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau)d\tau \quad (15)$$

Tuned Mass Dampers

Ide dasar TMD dijelaskan secara teoritis oleh Den Hartog [8]. Andaikan terdapat suatu sistem massa-pegas menerima gaya harmonis, lalu kepada sistem itu ditambahkan sistem getaran

lain (osilator) dengan massa m_d dan konstanta pegas k_d yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan sistem utamanya. Jika frekuensi alami dari osilator itu, $\sqrt{k_d/m_d}$, diatur sedemikian rupa sehingga sama dengan frekuensi getar dari gaya harmonis, maka dapat diperlihatkan secara teoritis bahwa massa utama menjadi tidak bergetar sama sekali. Pengaturan frekuensi osilator umumnya dilakukan dengan menyesuaikan massa osilator sehingga disebut *tuned mass damper*.

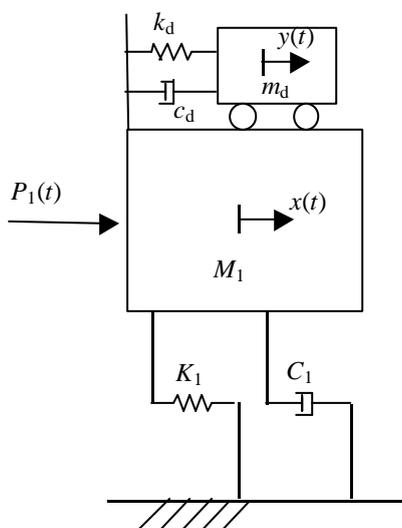
Gambar 2 mendeskripsikan sistem struktur-TMD secara skematis. Suatu struktur gedung dimodelkan sebagai sistem berderajat kebebasan tunggal dengan massa \mathbf{M}_1 , konstanta redaman \mathbf{C}_1 , dan konstanta pegas \mathbf{K}_1 , yang masing-masing berarti massa, redaman, dan kekakuan yang berhubungan dengan ragam getar pertama dari gedung itu, yaitu

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{j}_1^T \mathbf{m} \phi_1; \mathbf{C}_1 = \mathbf{j}_1^T \mathbf{c} \phi_1; \mathbf{K}_1 = \mathbf{j}_1^T \mathbf{k} \phi_1 \quad (16)$$

di mana ϕ_1 adalah vektor ragam getar pertama dari struktur gedung yang didapatkan dari solusi masalah eigen. Lambang $\mathbf{P}_1(t)$ menunjukkan gaya dinamis yang berhubungan dengan ragam getar pertama, yaitu

$$\mathbf{P}_1(t) = \mathbf{j}_1^T \mathbf{F}_{ef}(t) \quad (17)$$

Lambang-lambang m_d , c_d , dan k_d masing-masing merepresentasikan massa, redaman, dan kekakuan yang berhubungan dengan TMD. Model struktur gedung dan TMD ini membentuk sistem dinamik baru berderajat kebebasan dua.



Gambar 2. Sistem struktur gedung-TMD [2].

Persamaan gerak sistem gedung-TMD (Gambar 2) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$x(t)$ dan $y(t)$ masing-masing menyatakan perpindahan dari massa m dan massa m_d terhadap suatu sumbu referensi tetap.

Agar respons sistem utama (struktur gedung) dapat diminimalkan, karakteristik osilator c_d dan k_d harus diatur besarnya sehingga optimum. Nilai-nilai optimum menurut Den Hartog adalah:

$$r_{opt} = \frac{1}{1+m}; \quad x_{d,opt} = \sqrt{\frac{3m}{8(1+m)}} \quad (19)$$

di mana:

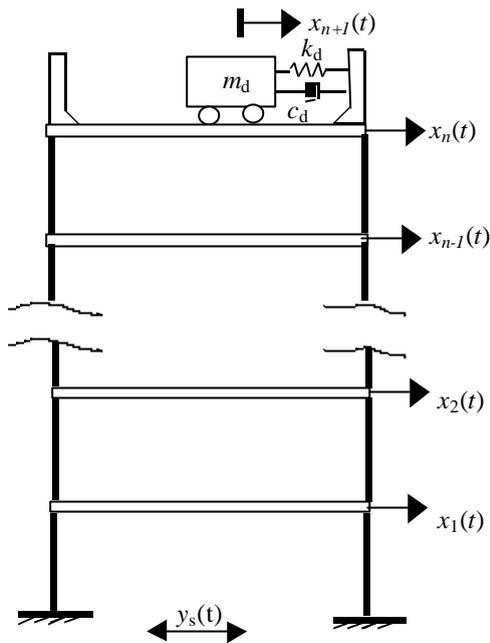
- $r_{opt} = w_d/w$ adalah rasio frekuensi optimum
- $x_{d,opt} = c_d/2m_d w_d$ adalah rasio redaman optimum dari sistem TMD
- $m = m_d/m$ adalah rasio antara massa TMD dengan massa total sistem utama

Dengan menggunakan persamaan (19) ini dapat ditentukan kekakuan dan redaman yang harus disediakan pada sistem TMD bila rasio massa, m telah ditetapkan.

Sistem Bangunan Geser-TMD

Massa, kekakuan, dan redaman dari TMD yang dihitung dengan persamaan (19) adalah berdasarkan anggapan sistem dua massa (Gambar 2). Meskipun demikian untuk mendapatkan respons dinamis sistem bangunan geser n tingkat dan TMD akibat pengaruh gempa, perhitungan harus tetap berdasarkan model bangunan geser n tingkat dan TMD seperti pada Gambar 3.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa dengan adanya massa tambahan pada lantai teratas bangunan, derajat kebebasan sistem bangunan geser-TMD ini menjadi $(n+1)$. Persamaan gerak dari sistem ini dalam bentuk *state-space* diberikan oleh persamaan (7) dan (8), yang untuk kasus ini: vektor $\mathbf{z}(t)$ berdimensi $2(n+1)$, matriks \mathbf{A} berdimensi $2(n+1) \times 2(n+1)$, matriks \mathbf{H} berdimensi $2(n+1) \times (n+1)$, dan vektor $\{\mathbf{1}\}$ berdimensi $(n+1)$. Solusi persamaan *state*, yang menghasilkan respons perpindahan dan kecepatan, diberikan oleh persamaan (15).



Gambar 3. Sistem bangunan geser n tingkat dan TMD.

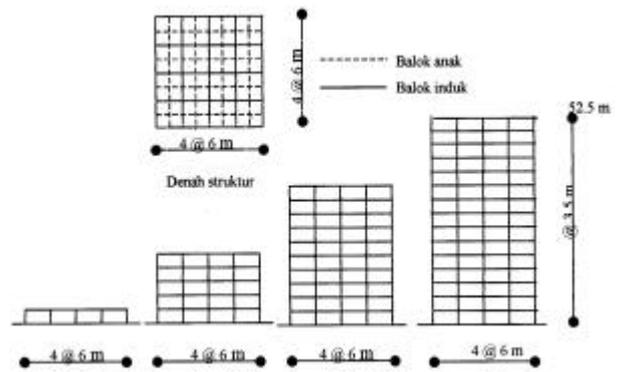
STUDI KASUS

Struktur gedung yang ditinjau di dalam studi ini adalah struktur rangka satu, lima, sepuluh, dan 15 lantai, terdiri atas empat bentang masing-masing berjarak 6 m, dengan ketinggian antar lantai 3.5 m (Gambar 4). Dimensi-dimensi elemen struktur rangka yang digunakan adalah seperti yang tercantum dalam Tabel 1. Akselerogram-akselerogram gempa yang digunakan:

1. Gempa El Centro 18 Mei 1940 N-S (Gambar 5) dengan *peak ground acceleration* (PGA) 0.35g, di mana g adalah percepatan gravitasi bumi.
2. Gempa Denpasar 1981 (Gambar 6) dengan PGA=0.15g .
3. Gempa Pacoima Dam 9 Februari 1971 Modifikasi [5] PGA=0.172g.

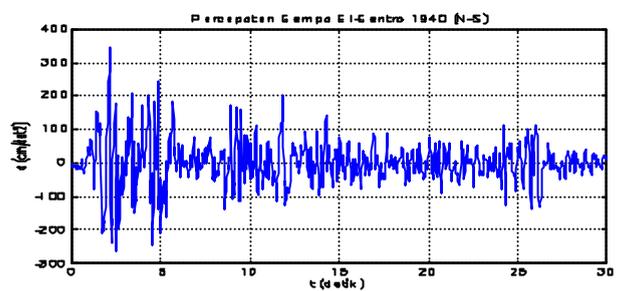
Tabel 1. Dimensi-dimensi elemen struktur

Elemen	Struktur 1 lantai		Struktur 5 lantai		Struktur 10 lantai		Struktur 15 lantai	
	b (mm)	h (mm)	b (mm)	h (mm)	b (mm)	h (mm)	b (mm)	h (mm)
Balok anak	200	300	350	500	200	400	200	400
Balok induk	400	400	400	500	300	400	300	400
Kolom 1-5	400	400	600	600	650	650	650	650
Kolom 6-10					450	450	550	550
Kolom 11-15							400	400
Pelat	Tebal pelat = 120 mm							

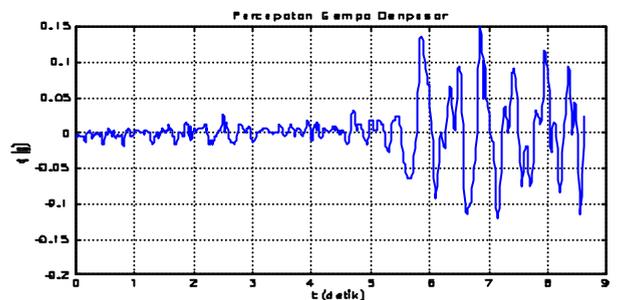


Tampak bangunan 1,5,10,15 tingkat

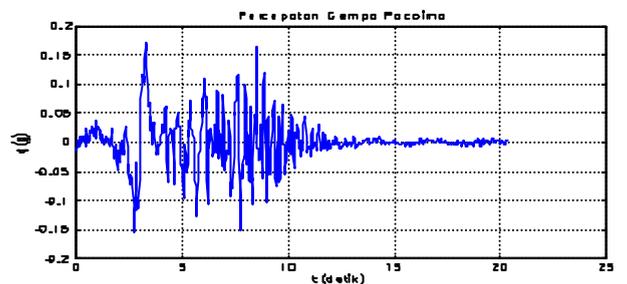
Gambar 4. Struktur Gedung 1,5,10,15 Lantai



Gambar 5. Akselerogram gempa El Centro 18 Mei 1940 N-S



Gambar 6. Akselerogram gempa Denpasar 1981



Gambar 7. Akselerogram gempa Pacoima Modifikasi [5]

Karakteristik Dinamik Bangunan Geser dan TMD

Karakteristik dinamik dari model bangunan geser mencakup massa tiap lantai, kekakuan lateral antar tingkat, dan rasio redaman untuk setiap ragam. Massa bangunan geser tanpa TMD yang digunakan di dalam studi ini ditampilkan masing-masing pada Tabel 2. Kekakuan lateral untuk bangunan satu lantai 68.824×10^6 N/m, untuk bangunan lima lantai 348.424×10^6 N/m, untuk bangunan sepuluh lantai 479.906×10^6 N/m pada lima tingkat pertama dan 110.243×10^6 N/m pada lima tingkat terakhir, untuk bangunan 15 lantai 479.906×10^6 N/m pada lima tingkat pertama, 246.010×10^6 N/m pada lima tingkat berikutnya, dan 68.824×10^6 N/m pada lima tingkat terakhir. Rasio redaman untuk setiap ragam ditetapkan sebesar 5%.

Karakteristik dinamik dari TMD, yaitu m_d , k_d , dan c_d , dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (19) bila rasio massa, m ditetapkan sebesar 1%, 2%, dan 3%. Karakteristik dinamik dari TMD untuk bangunan geser satu, lima, sepuluh, dan 15 tingkat diperlihatkan pada Tabel 3.

Periode getar alami struktur untuk lima ragam pertama dari bangunan geser tanpa TMD (NTMD) dan bangunan geser dengan TMD yang rasio massanya 1%, 2%, dan 3% ditunjukkan pada Tabel 4. Dari Tabel itu terlihat bahwa dengan penambahan TMD pada bangunan, secara keseluruhan periode alami struktur mengalami peningkatan (lebih besar dari tanpa

TMD), periode getar ragam kedua bergeser mendekati periode getar ragam pertama.

Tabel 2. Massa tiap lantai, dalam satuan kg, untuk berbagai bangunan geser.

Lantai	Bangunan Geser			
	1 lantai	5 lantai	10 lantai	15 lantai
1	80940	148534	133152	133152
2	-	148534	133152	133152
3	-	148534	133152	133152
4	-	148534	133152	133152
5	-	118216	133152	133152
6	-	-	121602	126852
7	-	-	121602	126852
8	-	-	121602	126852
9	-	-	121602	126852
10	-	-	95419	126852
11	-	-	-	119371
12	-	-	-	119371
13	-	-	-	119371
14	-	-	-	119371
15	-	-	-	94303
Total	80940	712352	1247587	1871807

Evaluasi Efektifitas TMD

Evaluasi efektifitas TMD dalam mereduksi respons simpangan antar tingkat, perpindahan relatif, dan percepatan total dilakukan dengan meninjau nilai maksimum (Maks) dan *root mean square* (RMS) dari besaran-besaran tersebut. Yang dimaksud dengan reduksi di sini adalah respons (simpangan, perpindahan, dan percepatan total) bangunan tanpa TMD dikurangi dengan respons bangunan yang menggunakan TMD dan kemudian dibagi dengan respons bangunan tanpa TMD. Definisi RMS dari suatu riwayat waktu diskrit $x(t_i)$, i dari 0 sampai dengan n :

Tabel 3. Massa, kekakuan, dan redaman dari TMD dengan rasio massa 1%, 2%, dan 3%.

Karakteristik TMD	1 lantai			5 lantai			10 lantai			15 lantai		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	3%
m_d (kg)	809	1619	2428	7124	14247	21371	12476	24952	37428	18718	37436	56154
k_d (KN/m)	674.6	1322.3	1946.1	1430.3	2802.0	4126.0	634.2	1243.7	1830.8	421.8	826.6	1217.3
c_d (N.det/m)	2851	7958	14368	12315	34366	62067	10852	30299	54710	10840	30257	54644

Tabel 4. Periode getar alami (detik) untuk lima ragam getar pertama dari bangunan tanpa TMD (NTMD) dan dengan TMD 1%, 2%, dan 3%.

Ragam Getar	1 Lantai				5 Lantai				10 Lantai				15 Lantai			
	NTMD	TMD			NTMD	TMD			NTMD	TMD			NTMD	TMD		
		1%	2%	3%		1%	2%	3%		1%	2%	3%		1%	2%	3%
1	0.216	0.228	0.234	0.238	0.439	0.472	0.488	0.501	0.877	0.957	0.998	1.031	1.311	1.449	1.516	1.571
2		0.206	0.203	0.201	0.151	0.413	0.404	0.398	0.347	0.806	0.783	0.767	0.576	1.203	1.168	1.143
3					0.097	0.151	0.152	0.151	0.225	0.346	0.345	0.345	0.329	0.574	0.572	0.571
4					0.076	0.097	0.097	0.097	0.157	0.225	0.225	0.225	0.258	0.328	0.328	0.328
5					0.007	0.076	0.076	0.076	0.126	0.157	0.157	0.157	0.197	0.258	0.258	0.258

$$\text{RMS } [x(t_i)] \equiv \sqrt{E[x^2(t_i)] - E^2[x(t_i)]} \quad (20)$$

di mana $E[x^2(t_i)]$ dan $E^2[x(t_i)]$ masing-masing adalah rata-rata kuadrat (*mean square*) dan kuadrat dari rata-rata dari riwayat waktu itu, yakni

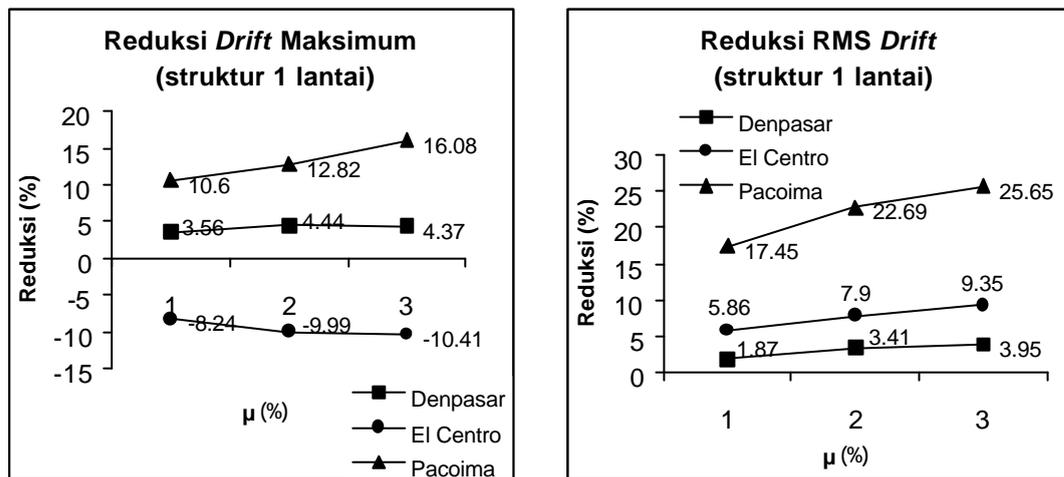
$$E[x^2(t_i)] = \frac{\sum_{i=0}^n x^2(t_i)}{n} \text{ dan } E^2[x(t_i)] = \left(\frac{\sum_{i=0}^n x(t_i)}{n} \right)^2 \quad (21)$$

Reduksi Simpangan Antar Tingkat

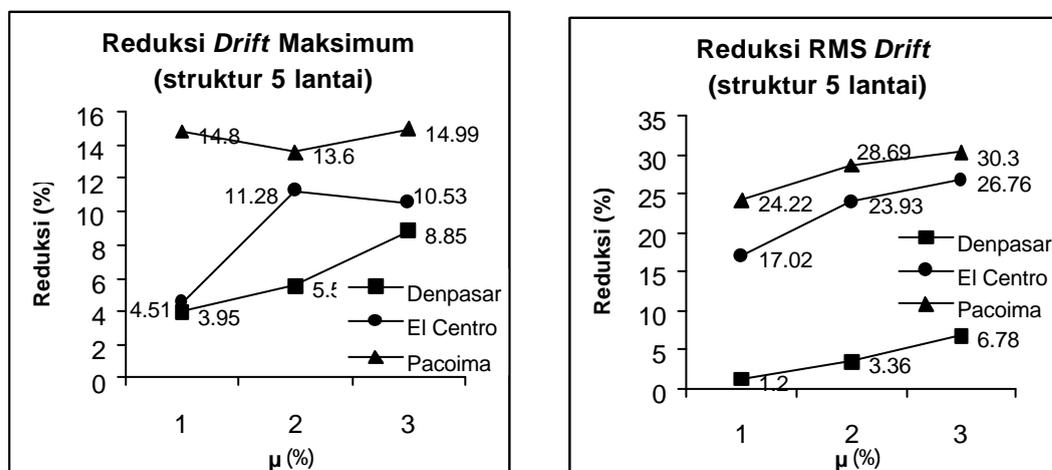
Simpangan antar tingkat (*drift*) merupakan selisih dari perpindahan antara tingkat ke- n dan ke- $(n-1)$. Untuk bangunan geser tanpa TMD, simpangan antar tingkat terbesar terjadi pada lokasi antara lantai dasar dan lantai ke-1 untuk bangunan geser satu dan lima lantai, antara lantai ke-5 dan ke-6 untuk bangunan sepuluh lantai dengan gempa El Centro dan

Pacoima, antara lantai ke-6 dan ke-7 untuk bangunan sepuluh lantai dengan gempa Denpasar, antara lantai ke-12 dan ke-13 untuk bangunan 15 lantai dengan gempa El Centro dan Denpasar, dan antara lantai ke-10 dan ke-11 untuk bangunan 15 lantai dengan gempa Pacoima. Reduksi Maks dan RMS dari simpangan-simpangan antar tingkat yang terjadi pada lokasi-lokasi tersebut untuk bangunan geser satu lantai ($T_{\text{NTMD}}=0.216$ detik), lima lantai ($T_{\text{NTMD}}=0.439$ detik), sepuluh lantai ($T_{\text{NTMD}}=0.877$ detik), dan 15 lantai ($T_{\text{NTMD}}=1.311$ detik) yang dikenai gempa Denpasar 1981, El Centro 1940, Pacoima 1971 diperlihatkan dalam Gambar 8 sampai dengan Gambar 11.

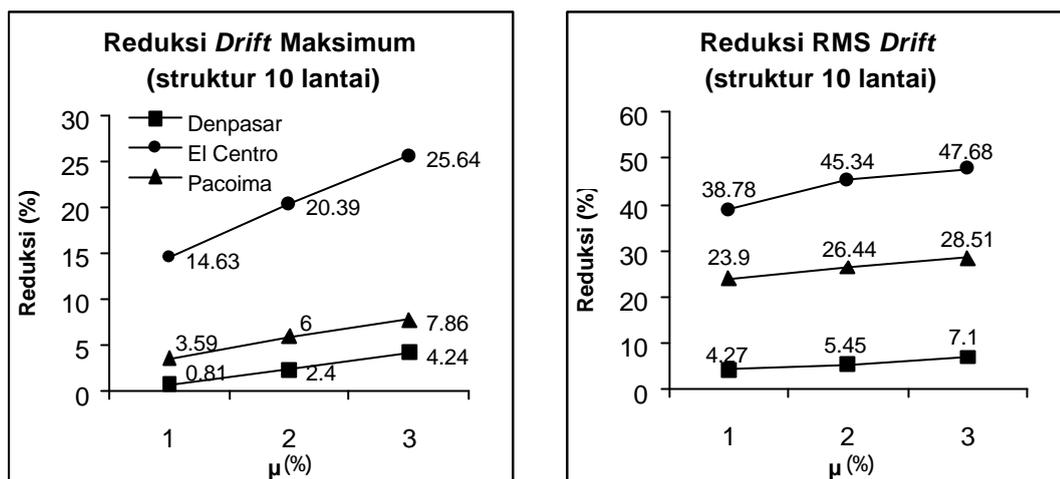
Dari Gambar 8 sampai dengan Gambar 11 terlihat bahwa untuk gempa El Centro pada bangunan satu lantai simpangan maksimum tidak tereduksi dengan adanya TMD, tetapi malah membesar seiring dengan penambahan i .



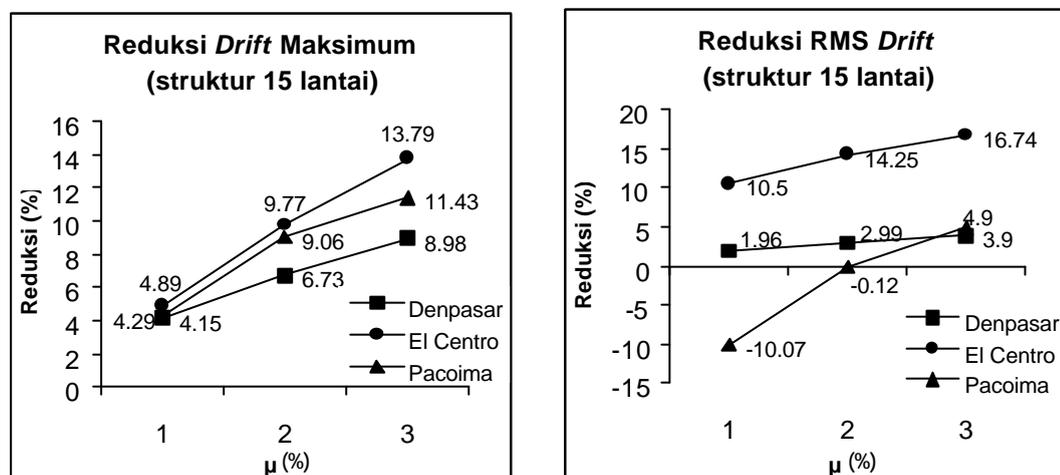
Gambar 8. Reduksi *drift* untuk struktur 1 lantai



Gambar 9. Reduksi *drift* untuk struktur 5 lantai.



Gambar 10. Reduksi *drift* untuk struktur 10 lantai.



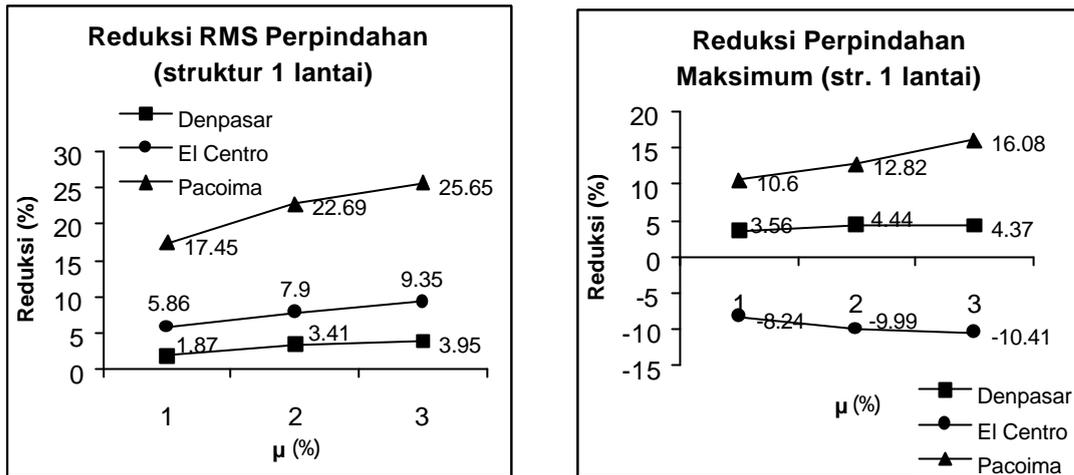
Gambar 11. Reduksi *drift* untuk struktur 15 lantai.

Meskipun demikian, untuk gempa yang sama pada bangunan sepuluh lantai justru menghasilkan hal yang berlawanan, yakni simpangan maksimum tereduksi paling baik dibandingkan dengan kasus gempa lainnya, yaitu sebesar 14.63% sampai 25.64%, bertambah seiring dengan kenaikan \dot{i} . Untuk kasus gempa Denpasar, reduksi yang didapatkan secara keseluruhan tidak terlalu besar (di bawah 9%). Untuk kasus gempa Pacoima, reduksi yang lebih baik dibandingkan dengan yang untuk dua kasus gempa lainnya, terjadi pada bangunan satu dan lima lantai, sedangkan pada bangunan 15 lantai dengan $\dot{i}=1\%$ dan 2% meskipun simpangan maksimum tereduksi, tetapi secara rata-rata (RMS) simpangannya malah membesar. Reduksi RMS simpangan secara keseluruhan naik seiring dengan bertambahnya \dot{i} .

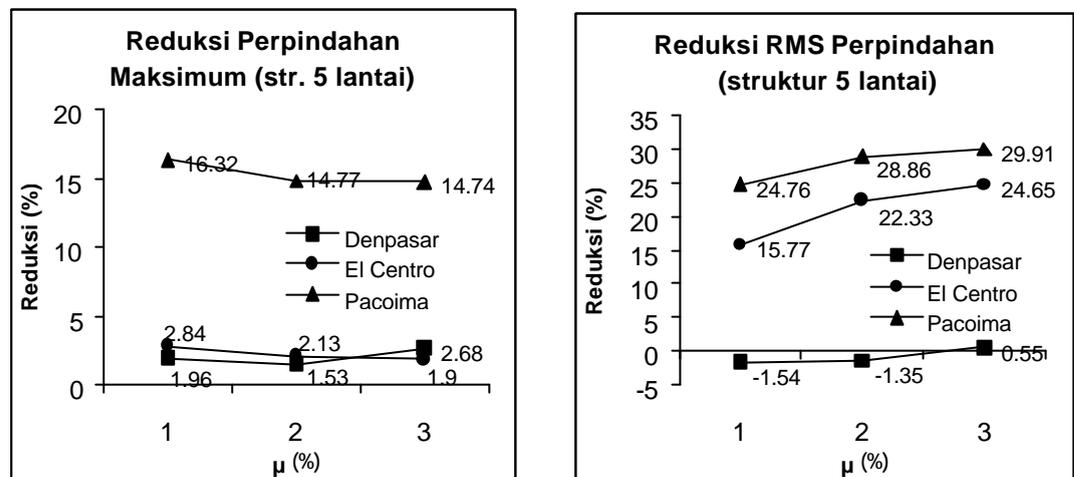
Reduksi Perpindahan Lantai Teratas

Tingkat reduksi nilai maksimum dan RMS respons perpindahan lantai teratas ditampilkan pada Gambar 12 sampai dengan Gambar 15.

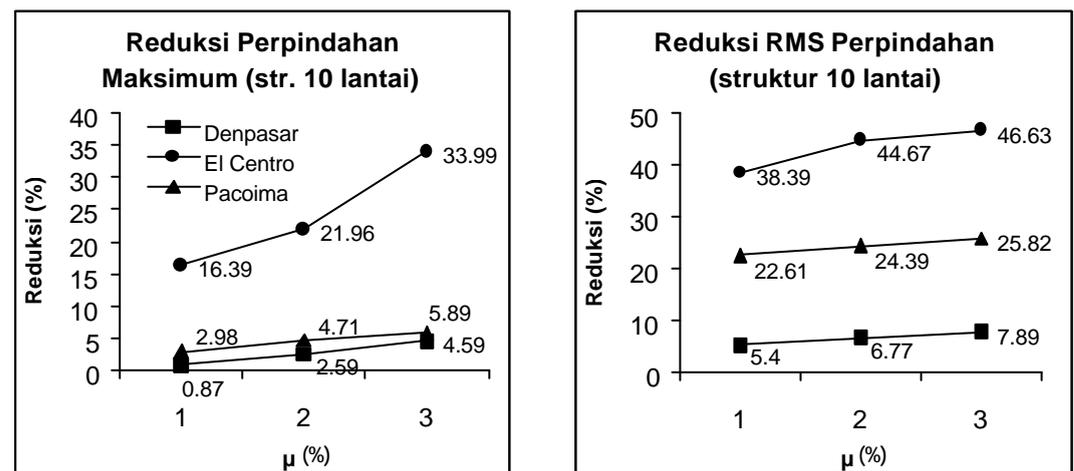
Dari Gambar 12 sampai dengan Gambar 15 terlihat bahwa untuk kasus gempa El Centro pada bangunan satu lantai, meskipun secara rata-rata perpindahan tereduksi (reduksi RMS bernilai positif), akan tetapi reduksi perpindahan maksimum adalah negatif, yang berarti perpindahan maksimum pada bangunan dengan TMD lebih besar daripada bangunan tanpa TMD. Reduksi perpindahan yang paling baik terjadi pada bangunan sepuluh lantai, yang untuk $\dot{i}=3\%$ reduksi maksimum dan RMS dari perpindahan masing-masing adalah 33.99% dan 46.63%. Untuk semua jenis struktur



Gambar 12. Reduksi perpindahan lantai teratas struktur 1 lantai



Gambar 13. Reduksi perpindahan lantai teratas struktur 5 lantai



Gambar 14. Reduksi perpindahan lantai teratas struktur 10 lantai

terlihat bahwa reduksi RMS yang terkecil terjadi untuk kasus gempa Denpasar. Reduksi RMS terbaik pada bangunan satu, lima, dan 15 lantai adalah reduksi yang untuk kasus gempa Pacoima.

Untuk kasus gempa Pacoima, reduksi perpindahan maksimum pada bangunan lima lantai berkurang seiring dengan penambahan m yaitu dari 16.32% menjadi 14.74%. Hal ini merupakan hal yang tidak umum terjadi. Pada bangunan

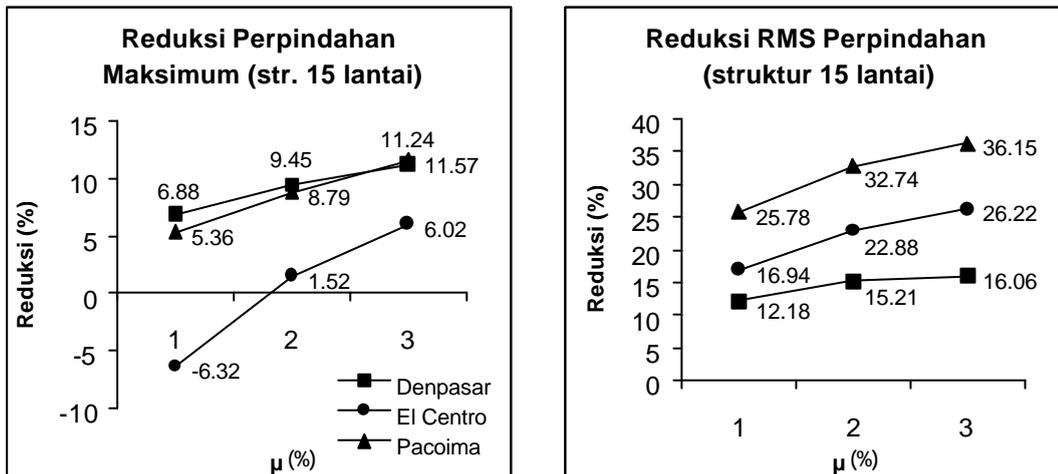
15 lantai yang dikenai gempa El Centro, dengan TMD sebesar $m=1\%$ terjadi reduksi perpindahan maksimum yang negatif, tetapi kondisi ini cenderung membaik seiring dengan pertambahan m Reduksi RMS semuanya meningkat seiring dengan pertambahan m

Reduksi Percepatan Total pada Lantai Teratas

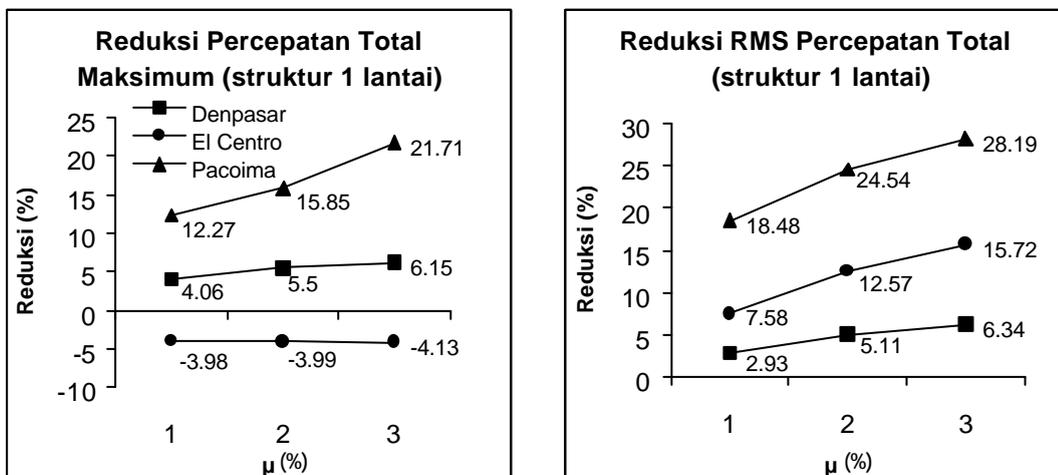
Percepatan total diperoleh dengan menjumlahkan percepatan gempa dengan respons percepatan bangunan yang diguncang gempa bumi. Reduksi dari maksimum dan RMS percepatan total dari lantai teratas ditampilkan pada Gambar 16 sampai dengan Gambar 19.

Dari Gambar 16 sampai dengan Gambar 19 terlihat bahwa RMS percepatan total tereduksi dengan adanya TMD dan reduksi itu bertambah

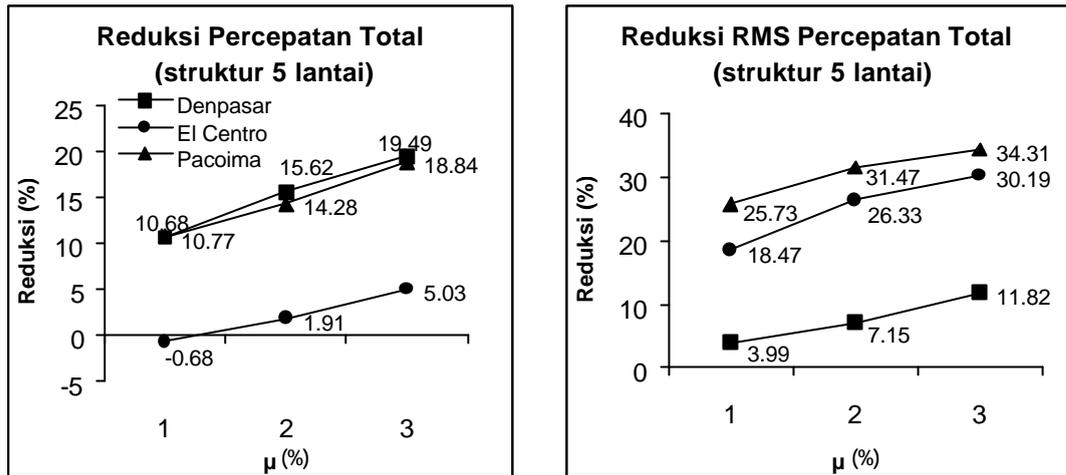
besar seiring dengan membesarnya rasio massa, m Meskipun demikian percepatan total maksimum belum tentu tereduksi, contohnya untuk kasus gempa El Centro pada bangunan satu tingkat, RMS-nya memang tereduksi tetapi maksimumnya tidak tereduksi. Tingkat reduksi RMS yang terbaik terjadi untuk kasus gempa El Centro pada bangunan sepuluh lantai, yang mana dengan TMD $m=3\%$ RMS percepatan tereduksi 40.82%. Dari gambar-gambar itu terlihat bahwa besar atau kecilnya reduksi percepatan total maksimum tidak dapat dijadikan indikator besar kecilnya reduksi RMS percepatan total. Sebagai contoh pada struktur lima lantai reduksi percepatan total maksimum untuk kasus gempa Denpasar tampaknya lebih besar daripada yang untuk gempa-gempa lainnya, akan tetapi reduksi RMS-nya paling kecil dibandingkan dengan yang untuk kasus dua gempa lainnya.



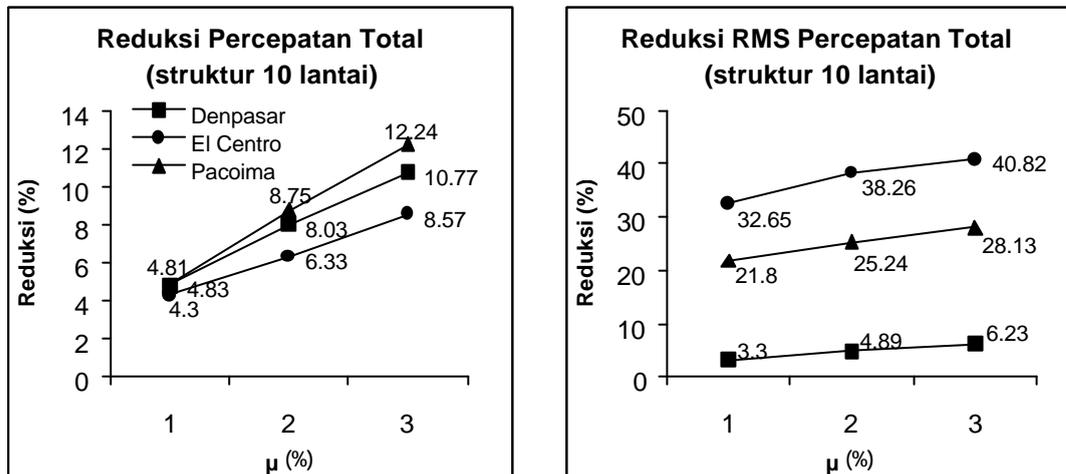
Gambar 15. Reduksi perpindahan lantai teratas struktur 15 lantai



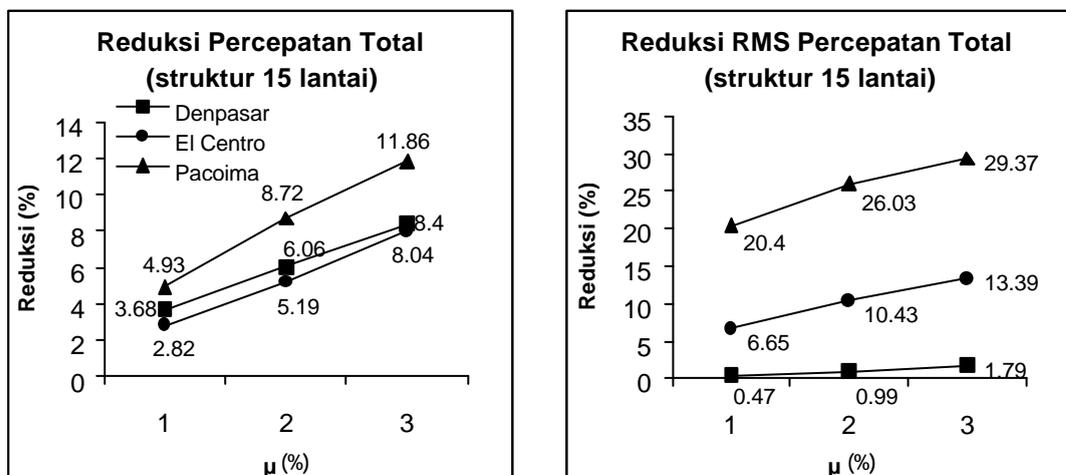
Gambar 16. Reduksi percepatan total dari lantai teratas struktur 1 lantai.



Gambar 17. Reduksi percepatan total dari lantai teratas struktur 5 lantai



Gambar 18. Reduksi percepatan total dari lantai teratas struktur 10 lantai



Gambar 19. Reduksi percepatan total dari lantai teratas struktur 15 lantai

KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan studi efektifitas pada bangunan satu, lima, sepuluh, 15 lantai yang dikenai gempa El Centro 1940, Denpasar 1981, dan Pacoima 1971 dapat disimpulkan bahwa efektifitas TMD dalam meredam respons simpangan antar tingkat, perpindahan, dan percepatan sangat bervariasi, bergantung kepada jenis gempa bumi yang bekerja dan periode dasar struktur atau jumlah tingkat bangunan. Reduksi respons yang terbaik terjadi untuk kasus gempa El Centro pada bangunan sepuluh lantai (periode getar 0.877 detik), dengan TMD rasio massa 3% dapat mereduksi maksimum dan RMS simpangan antar tingkat masing-masing 25.64% dan 47.68%, mereduksi maksimum dan RMS perpindahan masing-masing 33.99% dan 46.63%, dan mereduksi maksimum dan RMS percepatan total masing-masing 8.57% dan 40.82%. Pada kasus tertentu dapat terjadi penambahan TMD malah memperbesar respons struktur. Umumnya reduksi respons akibat gempa membaik bila rasio massa TMD/struktur membesar.

Dengan fakta bahwa efektifitas TMD dalam mereduksi respons akibat gempa sangat bergantung kepada jenis gempa yang terjadi pada lokasi bangunan itu berdiri, maka TMD tidak dianjurkan digunakan untuk mereduksi respons akibat gempa pada bangunan yang berdiri di atas lokasi yang karakteristik gempanya tidak bisa diduga atau diketahui. Bila terdapat bangunan pada lokasi rawan gempa dengan TMD yang didesain dengan tujuan untuk mereduksi respons akibat angin, maka disarankan untuk meninjau perilaku struktur itu terhadap pengaruh gempa dengan melakukan analisis riwayat waktu yang memakai beberapa sampel gempa yang pernah terjadi di lokasi bangunan itu berdiri.

DAFTAR PUSTAKA

1. Takenaka Corporation. (2001). *Structural Control System*. http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/quake_e/seishin/seishin.htm (29 Jan. 2003).
2. Wong, Foek Tjong, *Kontrol Vibrasi Aktif Struktur dengan Menggunakan Observer Jaringan Syaraf Tiruan*, Tesis Magister, Program Studi Rekayasa Sipil, Institut Teknologi Bandung, 1998, pp. 40-45, 53-60.
3. Chopra, Anil K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1995, pp. 432-433.
4. McNamara, Robert J., Tuned Mass Dampers for Buildings, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.103. No. 9, Sept. 1977, pp 1795.
5. Wirawan, Bobby dan Yonawan, Jemmy, *Analisa Riwayat Waktu Menggunakan Gempa Modifikasi Dengan Spektrum Respon Menurut Konsep SNI 1726-1998*, Skripsi Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya, 1999.
6. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik (Sistem Pengaturan)*, Jilid 2, Erlangga, Cetakan Keempat, 1994.
7. Soong, T.T., *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific and Technical, Harlow, 1990. pp. 7-10, 177-183.
8. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1956, pp. 87-106.