

PENGARUH GETARAN GEMPA YANG MENGANDUNG EFEK *PULSE* DAN TANPA *PULSE* PADA STRUKTUR TIDAK SIMETRIS SEBIDANG

Ade Faisal^{1,2}, Denny Meisandy Hutauruk², Johannes Tarigan²

¹Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan

Email: adefaisal@yahoo.com

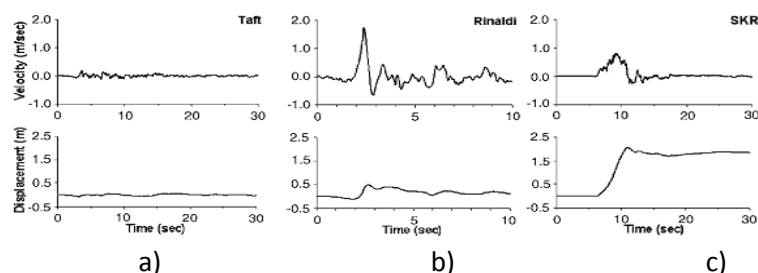
²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan

Abstrak: Getaran gempa dekat yang mengandung efek *pulse* dapat menyebabkan bangunan yang tidak direncanakan secara baik akan mengalami kerusakan. Bangunan yang tidak simetris sebidang termasuk yang memiliki resiko rusak bila mengalami getaran gempa dekat. Efek torsi pada lantai adalah salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan pada bangunan selama getaran gempa terjadi. Efek torsi ini terjadi akibat tidak simetrisnya distribusi massa dan kekakuan. Elemen penahan lateral harus mampu menahan berbagai jenis karakteristik gempa yang terjadi. Kurva *backbone* material dan gabungan kurva histeresisnya menggambarkan perilaku siklik struktur beton bertulang. Pada penelitian ini akan dilakukan studi parametrik pada model bangunan tidak simetris sebidang satu tingkat dengan elemen struktur dinding sebagai penahan gaya lateral yang memiliki variasi pada eksentrisitas kekakuan dan variasi kapasitas rotasi plastis struktur. Tinjauan dilakukan terhadap simpangan yang terjadi pada arah dinding fleksibel dan pada arah dinding yang kaku. Struktur ini dianalisis secara elastis dan tidak elastis dengan metode analisa riwayat waktu dan diberikan eksitasi gempa dengan karakteristik gempa *pulse* dan tanpa-*pulse*.

Kata kunci: Bangunan asimetris, kapasitas rotasi plastis, eksitasi gempa *pulse* dan tanpa *pulse*.

1. Pendahuluan

Karakteristik getaran tanah akibat gempa, seperti efek *pulse*, sangat mempengaruhi respon struktur. Efek *pulse* ialah salah satu jenis efek pada getaran yang dimiliki oleh getaran gempa dekat (*near-fault*), yang ditandai dengan adanya efek lonjakan yang bersifat monotonik. Efek lainnya yang dimiliki oleh getaran gempa dekat adalah efek *fling step*, dimana simpangan yang terjadi jauh dari titik nol setelah terjadinya sebuah lonjakan simpangan yang besar. Gambar 1a dan 1b menjelaskan bagaimana karakteristik getaran gempa dengan dan tanpa efek *pulse*, sedangkan Gambar 1c menjelaskan getaran gempa dekat yang mengandung efek *fling step*.

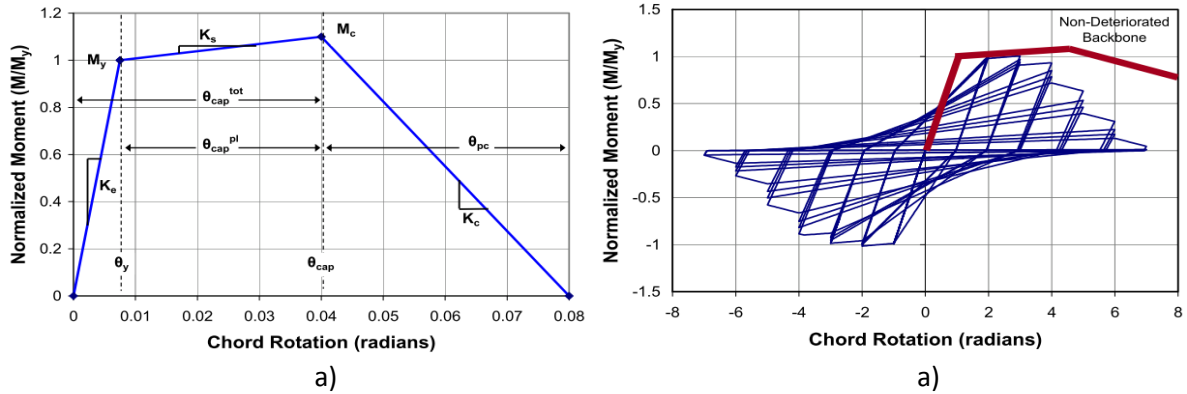


Gambar 1: Tipikal kecepatan dan perpindahan rekaman gempa: a) *far-fault*, b) *near-fault (forward directivity)*, dan c) *near-fault (fling-step)* (Kalkan dan Kunnath, 2006).

Bentuk denah dan konfigurasi bangunan sangat menentukan perilaku bangunan pada saat menerima getaran gempa. Ketidakmerataan kekakuan lateral pada elemen penahan gaya lateral akan menyebabkan rotasi pada lantai. Menurut Roy dan Chackoborty (2013), selama gempa dua arah bergetar dalam struktur dengan eksentrisitas 2 arah, eksentrisitas sepanjang 2 arah utama menghasilkan 2 momen torsi. Penyebab terjadinya torsi, seperti yang dikemukakan Stathopoulos dan Anagnostopoulos (2004), adalah karena berbagai faktor. Namun yang paling sering terjadi adalah

akibat distribusi massa dan kekakuan lateral yang tidak simetris. Oleh sebab itu, elemen penahan gaya lateral harus direncanakan untuk bisa bertahan hingga torsi terjadi.

Kurva *backbone* dan kurva histeresisnya menggambarkan model serbaguna, memodelkan kekakuan negatif respon pasca-puncak untuk mensimulasikan keruntuhan struktur beton bertulang. Menggunakan model histeresis Ibarra dkk. (2005, 2003), Haselton melakukan analisis dan menyederhanakan parameter pembentuk kurva *backbone* (Gambar 2). Salah satu parameter pembentuk kurva *backbone* ialah kapasitas rotasi plastis (θ_{cap}^{pl}). Hasil penelitian Haselton terkait kapasitas rotasi plastis dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2: Kurva *backbone*: a) parameter yang mempengaruhi b) gabungan kurva histeresis (Haselton, 2008).

Tabel 1: Efek parameter desain dalam memprediksi nilai θ_{cap}^{pl} (Haselton, 2008).

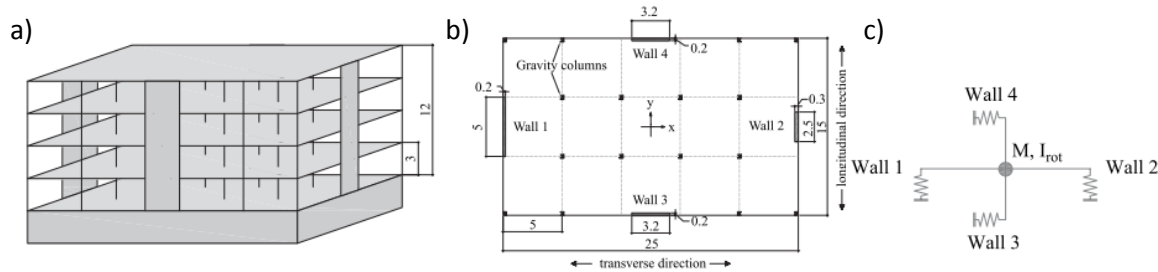
Parameter	θ_{cap}^{pl} Value	θ_{cap}^{pl}
<i>Baseline</i>	$\rho_{sh} = 0.0075, f'_c = 30 \text{ Mpa}, \nu = 0.10, \alpha_{sl} = 1, S_n = 12.7, \rho = 0.02$	0.055
α_{sl}	0	0.035
V	0	0.066
	0.3	0.038
ρ_{sh}	0.8	0.015
	0.002	0.033
	0.01	0.062
$f'_c \text{ (Mpa)}$	0.02	0.082
	20	0.058
	40	0.052
	80	0.040
S_n	8	0.067
	16	0.048
	20	0.040
P	0.01	0.050
	0.03	0.059

Dapat dilihat parameter yang mempengaruhi nilai θ_{cap}^{pl} seperti rasio tulangan longitudinal (ρ) rasio tulangan transversal (ρ_{sh}), dan lainnya. Hal ini menunjukkan daktilitas mempengaruhi nilai kapasitas rotasi plastis. Nilai kapasitas rotasi plastis sangat berpengaruh dalam respon penahan lateral dalam kondisi inelastis. Namun, tak ada aturan spesifik mengenai pengaruh dan batasan dari respon struktur dalam kondisi tidak elastis. Dalam studi parametrik ini struktur yang dianalisa adalah bangunan tidak simetris sebidang, dimana pusat kekakuan (CR) tak berhimpit dengan pusat massa (CM). Pada pusat massa diberikan eksitasi gempa dengan karakteristik *pulse* dan tanpa *pulse* dalam dua arah. Elemen yang digunakan bervariasi yaitu pada kapasitas rotasi plastis (θ_{cap}^{pl}) penahan lateral. Analisis dilakukan dengan bantuan program Ruaumoko 3D secara 2 dimensi untuk melihat perilaku rotasi lantai melalui deformasi pada penahan gaya lateral dalam kondisi elastis dan tidak elastis.

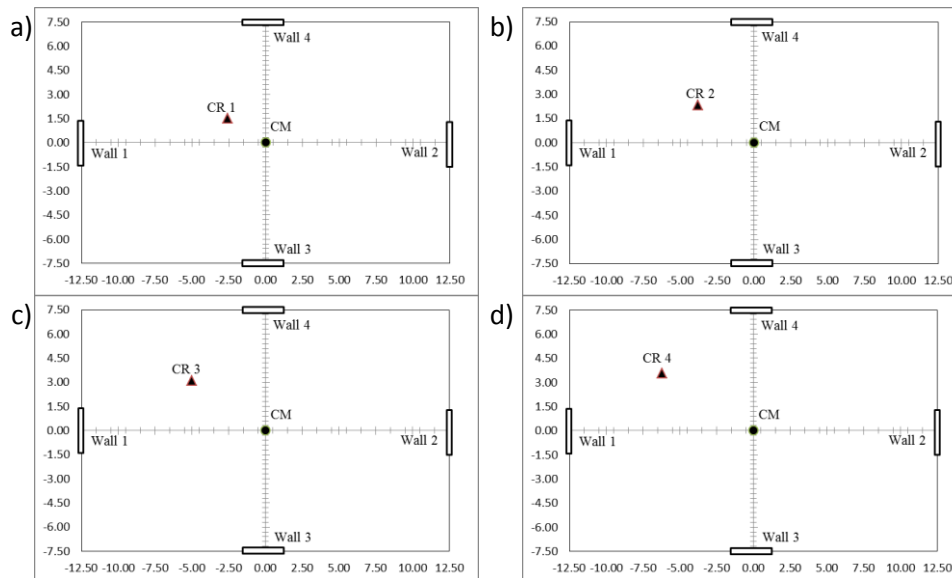
2. Metodologi

2.1 Pemodelan Struktur

Struktur menggunakan model Beyer (2007) berupa struktur beton bertulang 4 lantai (Gambar 3a), dengan 4 *shear wall* di setiap sisi (Gambar 3b) dan perilaku *shear wall* dimodelkan sebagai pegas (Gambar 3c). Struktur lantai direncanakan sebagai diafragma kaku. Modifikasi kekakuan *shear wall* dilakukan untuk menciptakan eksentrisitas dalam 2 arah, dimana variasi CR seperti pada Gambar 4.



Gambar 3: Model struktur: a) struktur beton bertulang 4 lantai, elevasi b) bidang lantai c) perilaku dinding sebagai pegas (Beyer 2007).



Gambar 4: Eksentrisitas kekakuan (CR) a) e1 (10%), b) e2 (15%), c) e3 (20%), d) e4 (25%).

2.1 Kapasitas Rotasi Plastis (θ_{cap}^{pl})

Untuk melihat pengaruh kapasitas rotasi plastis (θ_{cap}^{pl}) yang digunakan berdasarkan rasio dari hasil penelitian Haselton, yaitu 1/3, 2/3 dan 3/3 dari nilai maksimum. Maka nilai kapasitas rotasi yang digunakan ialah 0.027; 0.054; dan 0.082.

2.2 Data Rekaman Gempa

Sumber rekaman gempa yang digunakan diambil dari *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Next Generation Attenuation (NGA)*. Rekaman gempa dengan karakteristik *pulse* terdiri dari 10 rekaman (Tabel 2) dan rekaman gempa tanpa-*pulse* juga terdiri dari 10 rekaman (Tabel 3).

Studi parametrik ini menggunakan koefisien modifikasi Respons (R) dengan nilai 6 dengan lokasi kegempaan di Aceh pada tanah sedang dengan eksitasi gempa dua arah. Getaran gempa di atas diskalakan menggunakan program Ruaumoko hingga didapat simpangan dengan kondisi elastis (80 model) dan kondisi tidak elastis (240 model) dengan metode riwayat waktu (*time history*).

3. Hasil dan Diskusi

Hasil studi ini berupa simpangan rata-rata dari hasil eksitasi gempa *pulse* dan tanpa-*pulse* yang terjadi pada 4 titik, yaitu simpangan *wall 1*, *wall 2*, *wall 3* dan *wall 4* pada arah-x (*transversal*) dan arah-y (*longitudinal*). Simpangan pada arah-x didominasi oleh *wall 3* sebagai sisi fleksibel (*flexible wall*) dan *wall 4* sebagai sisi kaku (*stiff wall*). Untuk arah-y, simpangan didominasi oleh *wall 2* sebagai sisi fleksibel (*flexible wall*) dan *wall 2* sebagai sisi kaku (*stiff wall*).

Tabel 2: Data rekaman gempa *pulse*.

No	Tp-Pulse	Earthquake Name	Year	Mag.	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)
	Period [sec]							
1	1.092	Kobe, Japan	1995	6.9	strike slip	0.94	0.96	269.14
2	1.372	Northridge-01	1994	6.69	Reverse	3.16	5.92	269.14
3	2.828	Kobe, Japan	1995	6.9	strike slip	3.31	3.31	370.52
4	3.528	Northridge-01	1994	6.69	Reverse	0	5.19	370.52
5	5.341	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Reverse Oblique	9.62	9.62	427.73
6	7.791	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	strike slip	10.56	13.49	353.63
7	6.265	Imperial Valley-06	1979	6.53	strike slip	5.09	5.09	202.26
8	6.265	Imperial Valley-	1985	5.12	strike slip	6.01	6.01	282.5
9	9.128	Landers	1992	7.28	strike slip	34.86	34.86	370.08
10	6.188	Tabas, Iran	1978	7.35	Reverse	1.79	2.05	766.77

Tabel 3: Data rekaman gempa tanpa-*pulse*.

No	Tp-Pulse	Earthquake Name	Year	Mag.	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)
	Period [sec]							
1	-	"Kobe Japan"	1995	6.9	strike slip	11.34	11.34	256
2	-	"Northridge-02"	1994	6.05	Reverse	7.36	8.29	269.14
3	-	"Kobe Japan"	1995	6.9	strike slip	49.91	49.91	609
4	-	"Northridge-06"	1994	5.28	Reverse	6.79	14.87	370.52
5	-	"Chi-Chi Taiwan"	1999	7.62	Reverse Oblique	24.96	24.96	235.13
6	-	"Kocaeli Turkey"	1999	7.51	strike slip	207.81	207.81	225.6
7	-	"Imperial Valley-06"	1979	6.53	strike slip	19.76	21.68	237.33
8	-	Kern	1952	7.36	Reverse	114.62	117.80	316.46
9	-	Trinidad	1980	7.2	strike slip	76.06	76.26	311.75
10	-	Tabas, Iran	1978	7.35	Reverse	119.77	120.8	377.56

3.1 Periode Fundamental Bangunan

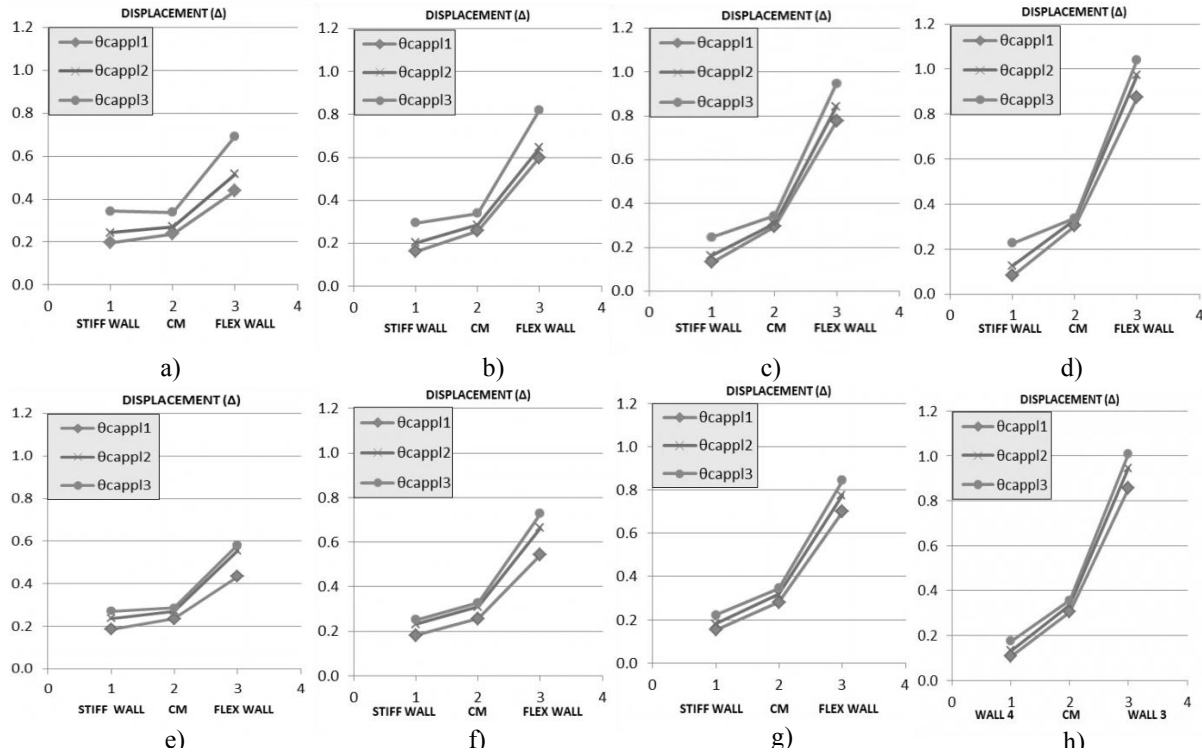
Empat model eksentrisitas yang dianalisis memiliki perioda fundamental yang beragam seperti yang terlihat pada Tabel 4. Mode pertama (T1) murni mengalami translasi pada arah sumbu-x dan mode kedua (T2) merupakan gabungan translasi pada sumbu-y dan rotasi. Pada mode ketiga (T3) struktur mengalami rotasi dengan sedikit translasi pada sumbu-y.

Tabel 4: Periode fundamental bangunan.

No	Model struktur	Eksentrisitas		Periode fundamental		
		ϵ_r (%)		T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
1	<i>Beyer</i>	24		0.97	0.88	0.48
2	eks-1	10		1.22	0.52	0.32
3	eks-2	15		0.84	0.59	0.31
4	eks-3	20		1.60	0.57	0.30
5	eks-4	25		1.98	0.61	0.28

3.2 Deformasi Struktur Akibat Gempa Pulse

Kapasitas rotasi plastis menyebabkan peningkatan simpangan pada sisi fleksibel, namun penurunan simpangan pada sisi kaku disetiap eksentrisitas. Perbedaan besar simpangan antara kedua sisi menyebabkan torsi pada lantai semakin besar. Jika dibandingkan dengan arah-x (Gambar 5a, b, c, d) simpangan yang terjadi pada arah-y (Gambar 5e, f, g, h) lebih besar.



Gambar 5: Simpangan pada sisi kaku dan sisi fleksibel akibat gempa pulse dan pengaruh variasi kapasitas rotasi plastis a) e1 arah-y, b) e2 arah-y, c) e3 arah-y, d) e4 arah-y, e) e1 arah-x, f) e2 arah-x, g) e3 arah-x, h) e4 arah-y.

3.3 Deformasi Struktur Akibat Gempa Tanpa-Pulse

Pengaruh kapasitas rotasi plastis akibat eksitasi gempa tanpa-pulse secara umum sama, dimana semakin besar nilai kapasitas rotasi plastis menyebabkan semakin besarnya simpangan pada sisi fleksibel dan semakin kecilnya simpangan pada sisi kaku. Secara umum, simpangan yang dihasilkan oleh gempa tanpa-pulse lebih kecil dibandingkan gempa pulse. Meski begitu, pengaruh kapasitas rotasi tetap mempengaruhi torsi pada lantai. Simpangan yang terjadi pada arah y (Gambar 6a, b, c, d) lebih besar dibandingkan simpangan pada arah x (Gambar 6e, f, g, h).

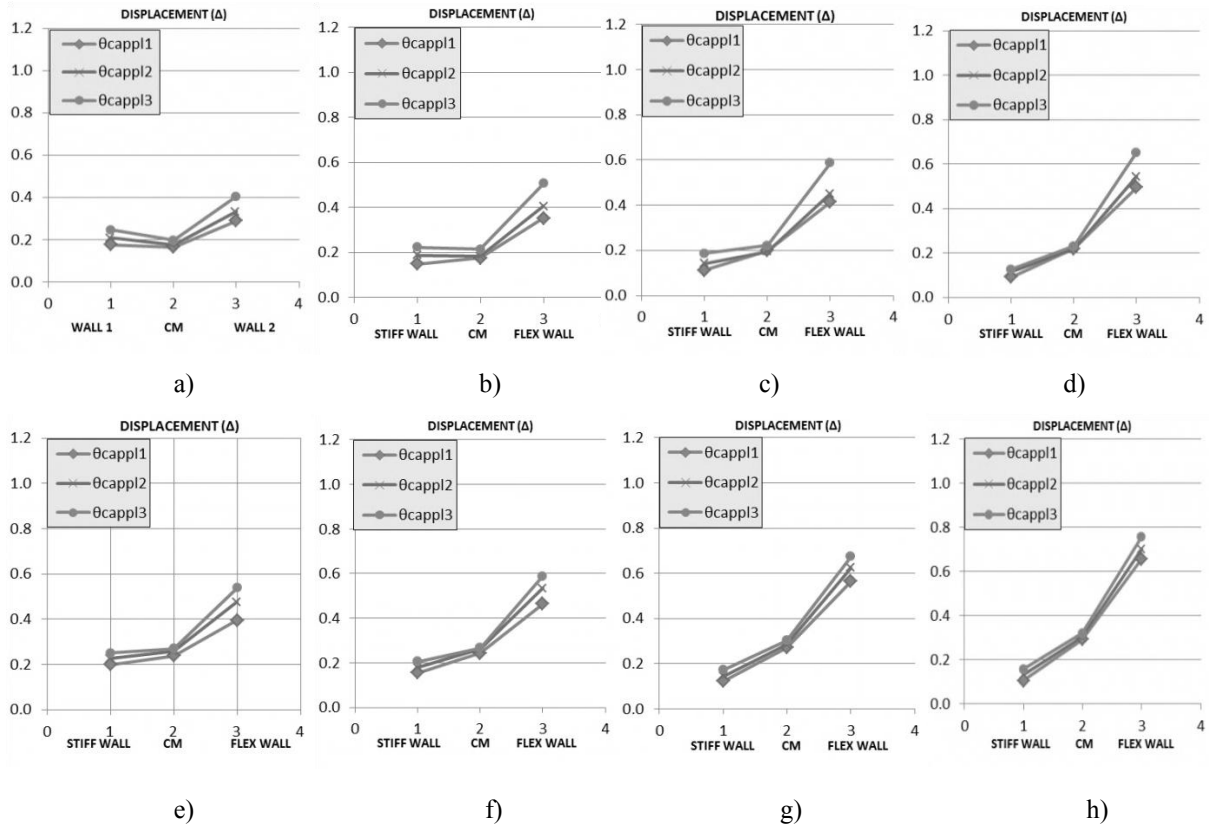
3.4 Simpangan Kondisi Elastis dan Inelastis Akibat Kapasitas Rotasi Plastis (θ_{cap}^{pl})

Pengaruh simpangan pada kondisi inelastis berbeda dengan kondisi elastis. Hal ini disebabkan, pada saat pembebanan terjadi, kondisi elastis masih mampu kembali ke bentuk semula. Simpangan inelastis dapat mengalami kenaikan dari 10%-50% dari simpangan kondisi elastis untuk getaran gempa yang sama.

Pada simpangan kondisi inelastis besar simpangan pada sisi kaku berbeda dengan sisi fleksibel. Simpangan pada sisi fleksibel bertambah seiring dengan bertambahnya nilai eksentrisitas. Namun, pada sisi kaku, simpangan terus berkurang pada eksentrisitas yang semakin besar. Perbedaan simpangan di kedua sisi ini menyebabkan terjadinya rotasi pada lantai. Hal ini terkait dengan daktilitas yang menjadi penentu nilai kapasitas rotasi plastis itu sendiri. Oleh sebab itu, struktur dengan kapasitas rotasi plastis yang besar harus mampu menahan efek rotasi selama terjadinya gempa. Besarnya simpangan pada kondisi inelastis membuktikan perlunya penelitian lebih lanjut, mengingat tidak adanya peraturan spesifik mengenai desain struktur dalam kondisi inelastis.

3.5 Pengaruh Getaran Gempa Pulse dan Tanpa-Pulse

Getaran gempa *pulse* memberikan efek berupa simpangan yang lebih besar secara umum dibandingkan dengan getaran gempa tanpa *pulse*. Untuk kapasitas rotasi plastis yang sama dan pada eksentrisitas yang sama, simpangan pada sisi kaku dari pusat massa bisa mencapai 33% dan 209% pada sisi fleksibel dari pusat massa. Dengan kondisi yang sama, struktur yang diberikan eksitasi gempa tanpa *pulse*, simpangan pada sisi kaku mencapai 45% dari pusat massa, dan pada sisi fleksibel hanya mencapai 182% dari pusat massa.



Gambar 6: Simpangan pada sisi kaku dan sisi fleksibel akibat gempa tanpa-pulse dan pengaruh variasi kapasitas rotasi plastis: a) e1 arah-y, b) e2 arah-y, c) e3 arah-y, d) e4 arah-y, e) e1 arah-x, f) e2 arah-x, g) e3 arah-x, h) e4 arah-y.

Kesimpulan

Dari hasil studi parametrik terhadap struktur tidak simetris sebidang dengan variasi eksentrisitas pusat kekakuan-pusat massa (CR-CM) dan variasi kapasitas rotasi plastis akibat dua karakteristik gempa (*pulse* dan tanpa *pulse*) dalam dua arah, maka didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas rotasi plastis mempengaruhi besarnya simpangan. Adanya efek terbalik antara perubahan simpangan pada sisi kaku dengan sisi fleksibel. Semakin besar eksentrisitas, maka simpangan pada sisi kaku semakin kecil. Sebaliknya, simpangan pada sisi fleksibel semakin meningkat.
2. Simpangan di sisi fleksibel selalu lebih besar dibandingkan simpangan pada sisi kaku.
3. Perbedaan rasio simpangan kapasitas rotasi plastis maksimum terhadap simpangan akibat kapasitas rotasi plastis minimum mencapai 64% di sisi kaku dan 19% pada sisi fleksibel.
4. Simpangan normalisasi yang dihasilkan gempa pulse lebih besar dibandingkan simpangan normalisasi akibat gempa tanpa *pulse*. Sehingga, eksitasi gempa akibat gempa *pulse* lebih cepat membuat struktur menjadi kondisi plastis.

4. Kepustakaan

- Anagnostopoulos, S. A. dkk. (2010). An Answer to an Important Controversy and The Need for Caution When Using Simple Models to Predict Inelastic Earthquake Response of Buildings With Torsion. *Earthquake Engineering Structure Dyn* 39: 521-540.
- Anonim. (2005). *International Code Council, Inc.* Illinois: Building Officials and Code Administrators International, Inc.
- Anonim. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Beyer, K., & Bommer, J. J. (2007). Selection and Scaling of Real Accelerograms for Bi-Directional Loading: A Review of Current Practice and Code Provisions. *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 13-45.
- Carr, A.J. (2008). RUAUMOKO-Inelastic Dynamic Analysis Program. Departement of Civil Engineering, University of Canterbury, Chirstchurc, New Zealand.
- Chopra, A.K. (2002). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 844pp.
- De Stefano, M., & Pintucchi, B. (2008). A Review Of Research On Seismic Behaviour Of Irregular Building Structures Since 2002. *Bull Earthquake Eng* 6, 285-308.
- FEMA 451B. (2007). NEHRP Recomenen Provision for New Building and Other Structure: Training and Instructional Materials.
- Gavin, H. P., (2014). *Vibration of Single Degree of Freedom Systems*. CEE Structural Dynamics. Department of Civil Engineering. Duke University.
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Lange, S. T., & Deierlein, G. G. (2008). *Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings*. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Katsanos, E. I., Sextos, A. G., & Manolis, G. D. (2010). Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, 157-169.
- Kunnath SK, Erduran E, Chai YH, Yashinsky M. Effect of near fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings. *J Bridge Engineering ASCE* 2008; 13(3):282-90.
- Lucchini, A. dkk. (2009). Seismic Behavior of Single-Story Asymmetric-Plan Buildings Under Uniaxial Excitation. *Earthquake Engineering Structure Dyn* 38, 1053-1070.
- Marusic, D., Fajfar, P. (2005). On The Inelastic Seismic Response of Asymmetric Buildings Under Bi-axial Excitation. *Earthquake Engineering Structure Dyn* 34, 943-963.
- Paulay, T. (1998). Torsional Mechanisms in Ductile Building Systems. *Earthquake Engineering Structue Dyn* 27, 1101-1121.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Pacific Earthquake Engineering Research (2008). PEER NGA Database, available at <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
- Roy, R., Chackroborty, S. (2013). Seismic Demand of Plan-Asymmetric Structures: A Revisit. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 12, 99-117.
- Sommer, A., Bachmann, H. (2005). Seismic Behavior of Asymmetric RC Wall Buildings: Principles and New Deformation-Based Design Method. *Earthquake Engineering Structure Dyn* 34, 101-124.
- Somerville, P. (2003). Magnitude Scaling of The Forward Rupture Directivity Pulse in Near-Fault Ground Motions. URS Group Inc. Award Number: 01HQGR0048.
- Stathopoulos, K. G., Anagnostopoulos, S. A. (2004). Earthquake Induced Inekastic Torsion In Asymmetric Multistory Buildings. *World Conference on Earthquake Engineering* 13, 558.
- Stathopoulos, K. G., Anagnostopoulos, S. A. (2005). Inelastic Torsion of Multistorey Buildings Under Earthquake Excitations. *Earthquake Engineering Structure Dyn* 34: 1449-1465