

STUDI PARAMETRIK DEFORMASI TORSI LANTAI BANGUNAN ASIMETRIS SEBIDANG DIPENGARUHI OLEH GEMPA PULSE DAN TANPA PULSE

Ade Faisal¹ dan Gamal Halim²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Jl. Muctar Basri, Medan 20238, Indonesia
e-mail: adefaisal@yahoo.com

²Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara
Jl. Dr. T. Mansur No.9, Medan 20155, Indonesia

Abstrak—Salah satu hal yang harus dimengerti dalam perencanaan bangunan tahan gempa adalah konfigurasi bangunan dan pengaruhnya terhadap beban gempa. Walaupun denah bangunan yang reguler dan simetri telah diketahui mempunyai perilaku yang baik akibat beban gempa, tetapi pada kenyataannya masih banyak bangunan yang tidak reguler (irreguler) dan tidak simetri tetap dibangun dengan alasan arsitektural. Bangunan yang irreguler menyebabkan distribusi massa, kekakuan dan kekuatannya asimetris sehingga menimbulkan eksentrisitas terhadap pusat massa. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi terhadap bangunan asimetris yang diberikan beban gempa yang disertai pulse. Tujuan penelitian ini untuk melihat besarnya simpangan dan rotasi lantai yang terjadi pada bangunan yang asimetris terhadap kekakuan. Setelah dilakukan penelitian, didapatkan hasil adanya perbedaan hasil simpangan yang terjadi akibat gempa disertai pulse dan tanpa pulse. Perbedaannya mencapai 8% hingga 20%. Rotasi yang terjadi pada bagian bangunan yang memiliki inersia yang lebih besar (sisi kaku) lebih kecil dari pada bagian bangunan yang memiliki inersia yang lebih kecil (sisi fleksibel). Adanya perbedaan eksentrisitas kekakuan pada sistem bangunan juga mempengaruhi rotasi lantai inelastis.

Kata kunci : Eksentrisitas Kekakuan, Gempa Pulse, Rotasi Lantai

Abstract—Earthquake resistant building must be designed with a proper plan configuration. Although the regular and symmetrical building plans have been known to have a good behaviour under earthquake loads, but the facts have demonstrated that many asymmetrical plan buildings are built for the architectural reasons. Irregular plan buildings cause mass distribution, stiffness, and strength asymmetries which in turn produce the eccentricity to the centre of mass. In this research, the asymmetrical buildings are simulated under earthquake ground motion containing pulse. The study aims to evaluate the drift and floor rotations that occur in the asymmetrical buildings. The results indicate that the difference in drift of symmetrical and asymmetrical buildings reach 8% to 20%. The rotation occurred on the rigid side (high stiffness side) is smaller than the flexible side (low stiffness side). The difference in eccentricity affects clearly the inelastic floor rotation.

Keywords : Eccentricity Stiffness, Pulse Ground Motion, Floor Rotation

I. PENDAHULUAN

Indonesia berada dalam lingkaran cincin api dunia (Ring Of Fire) dimana sangat banyak terdapat patahan-patahan dan gunung vulkanik aktif yang dapat menyebabkan gempa bumi. Kerusakan yang ditimbulkan sangat beragam, mulai dari kerusakan ringan, sedang, berat hingga dapat menyebabkan keruntuhan bangunan tergantung pada struktur bangunan dan besarnya gaya gempa yang terjadi. Salah satu hal yang harus dimengerti dalam perencanaan bangunan tahan gempa adalah konfigurasi bangunan dan

pengaruhnya terhadap beban gempa. Walaupun denah bangunan yang reguler dan simetri telah diketahui mempunyai perilaku yang baik akibat beban gempa, tetapi pada kenyataannya masih banyak bangunan yang tidak reguler (irreguler) dan tidak simetri tetap dibangun dengan alasan arsitektural.

Bentuk bangunan yang irreguler, seperti kebanyakan bangunan pada umumnya, dapat menyebabkan kerusakan yang parah pada struktur apabila terkena gaya gempa. Bangunan yang irreguler menyebabkan distribusi massa,

kekakuan dan kekuatannya asimetris sehingga menimbulkan eksentrisitas terhadap pusat massa. Eksentrisitas pada bangunan dapat menyebabkan gerakan torsi selama terjadinya gempa. Torsi dapat menyebabkan masalah yang cukup serius pada bangunan seperti meningkatnya displacement pada titik ekstrim bangunan dan menimbulkan masalah pada elemen penahan lateral yang berlokasi pada tepi gedung. Torsi tidak dapat dihilangkan namun nilainya dapat diperkecil sehingga resiko yang diberikannya pun menjadi kecil.

Eksentrisitas pada bangunan dapat terjadi dalam satu arah dan dua arah, sangat bergantung pada konfigurasi dan struktur bangunan. Variasi arah eksentrisitas pada bangunan akan mempengaruhi perilaku torsi bangunan sehingga efek yang ditimbulkan juga dapat bervariasi. Oleh karena itu sangat penting untuk meninjau bagaimana arah eksentrisitas pada bangunan sehingga kita dapat mendesain bangunan lebih efektif.

Efek torsi pada bangunan juga terpengaruh oleh gaya gempa. Gaya gempa tersebut akan memberikan suatu gerakan pada tanah yang biasanya diistilahkan dengan ground motion. Hasil rekaman gempa terpengaruh oleh banyak hal, misalnya lokasi geografis dimana respon tanah direkam, jauh dekatnya sumber gempa dan adanya denyut (Pulse) atau tidak adanya denyut (No Pulse).

II. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam beberapa tahun terakhir ini, hasil penelitian dan pengamatan terhadap bangunan yang terkena gempa menunjukkan bahwa bangunan asimetris sebidang mengalami kerusakan yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan simetris. Hal ini disebabkan oleh efek torsi yang timbul akibat ketidaksimetrisan bangunan tersebut dan efek torsi ini menimbulkan deformasi yang besar. Deformasi yang besar ini dapat menyebabkan perilaku struktur bangunan menjadi inelastis sehingga menyebabkan kerusakan besar pada bangunan. Untuk itu perlu dilakukan studi terhadap bangunan asimetris sebidang dengan menggunakan analisa nonlinier/inelastis.

Pada bangunan yang terlalu panjang ada kemungkinan dalam satu tingkat selain terjadi perbedaan pola goyangan, atau perbedaan besar/arah goyangan, juga akan memungkinkan terjadinya perbedaan respon bangunan dalam

satu tingkat akibat getaran gempa. Hal ini disebabkan oleh distribusi massa dan kekakuan sulit untuk dapat merata sepanjang bangunan dan apabila terjadi goyangan maka pusat massa akan bergoyang/berotasi terhadap pusat kekakuan sehingga terjadilah puntir pada bangunan. Selain itu apabila ukuran bangunan arah horisontal terlalu panjang, maka ada kemungkinan respon tanah di bawah bangunan yang berbeda akibat getaran gempa. Akibatnya bangunan mengalami respon yang tidak seragam/sama, misalnya akan saling tarik ataupun saling desak.

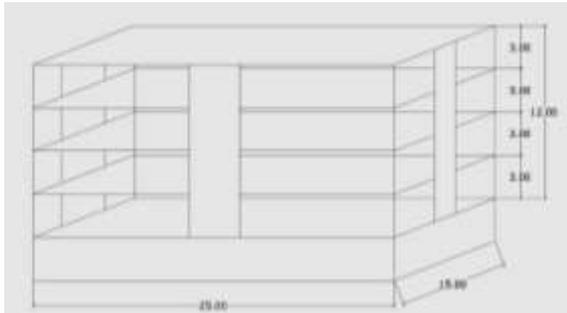
Tidak berhimpitnya pusat massa, kekakuan dan kekuatan pada gedung yang terkena beban gempa, menyebabkan terjadinya efek torsi pada bangunan. adanya ketidakteraturan bidang (plan irregular), nilai-nilai kinerja struktural selama pasca gempa akan menunjukkan perilaku ketidakberaturannya, seperti distribusi massa, kekakuan dan kekuatan yang asimetris. Sehingga hal ini merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan yang parah, karena selain mengakibatkan adanya translasi pada lantai, lantai bangunan tersebut juga akan mengalami rotasi (respon torsi).

Bangunan yang berada pada zona dengan resiko gempa yang tinggi harus direncanakan dengan menggunakan sistem struktur penahan beban lateral yang memenuhi persyaratan detailing yang khusus atau memiliki tingkat daktilitas penuh. Bangunan tinggi tahan gempa umumnya menggunakan elemen-elemen struktur kaku berupa dinding geser untuk menahan kombinasi gaya geser, momen dan gaya aksial yang timbul akibat gempa. Dengan adanya dinding geser yang kaku pada bangunan, sebagian besar beban gempa akan terserap oleh dinding geser tersebut.

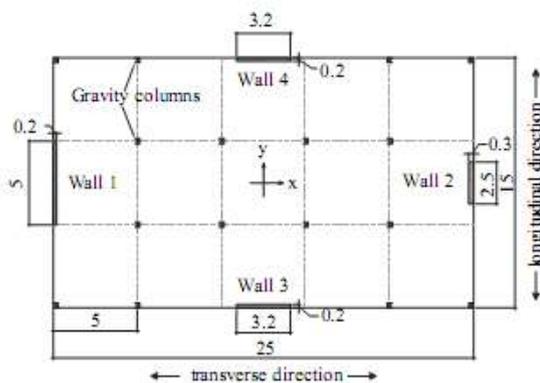
MODEL DAN SISTEM BANGUNAN

Pemilihan model Beyer ini didasarkan pada kemudahan untuk melakukan variasi eksentrisitas. Jika struktur tetap paralel pada dinding melintang, maka respon akan tetap mengalami translasi karena dinding 3 dan 4 memiliki ukuran dan kekuatan yang sama besar (dengan asumsi bahwa pusat massa berada di pusat lantai). Akan tetapi, dinding 1 dan 2 memiliki perbedaan ukuran dan kapasitas lentur. Suatu eksitasi yang paralel diberikan kepada dinding tersebut sehingga selain translasi, akan mengakibatkan terjadinya rotasi di dalam sistem. Struktur ini merupakan struktur beton bertulang dengan tingkat 4 lantai yang memiliki

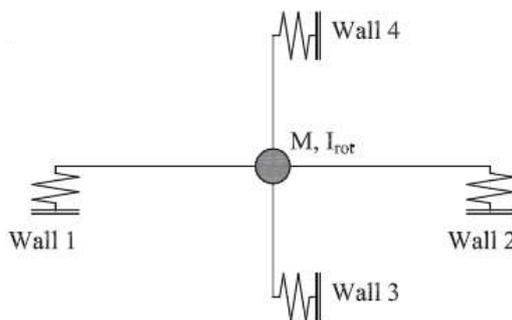
dinding penahan lateral (reinforced concrete wall) di setiap sisi bangunan (Gambar 1a) dengan ukuran bangunan 25 m x 15 m dan tinggi setiap lantai 3 m.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1: (a) Model bangunan Beyer. (b) Model stereotip 2D. (c) Pemodelan Stereotip 2D sebagai pegas nonlinier.

Model stereotip pada arah horizontal dapat diasumsikan dengan model 2D (Gambar 1b) dikarenakan struktur memiliki keteraturan dalam arah vertikal. Setiap dinding penahan lateral dimodelkan dengan pegas nonlinier (Gambar 1c) yang dimodifikasi dengan model histerisis Ibara mewakili karakteristik gaya-perpindahan untuk

setiap tinggi efektif dinding geser. Massa dari semua lantai disamakan menjadi sebuah massa efektif pada ketinggian efektif bangunan ($heff = 9,3$ m).

Persyaratan desain bangunan untuk beban-beban gravitasi akan selalu berbeda dengan beban yang bersifat lateral seperti beban angin dan gempa bumi. Beban lateral seperti angin dapat digolongkan kedalam pembebanan primer karena biasanya dirancang dengan kisaran 1% sampai 3% dari berat struktur sehingga bisa dilakukan dengan konsep desain elastisitas. Hal tersebut tidak berlaku terhadap beban gempa, beban lateral gempa biasanya dirancang dengan kisaran 30% sampai 40% dari berat struktur sehingga jika didesain dengan konsep elastisitas, struktur akan sangat berat dan tidak ekonomis. Oleh karena itu desain beban gempa lebih difokuskan kepada konsep pengendalian dan pencegahan keruntuhan.

Faktor Modifikasi Respon (R) merupakan parameter desain seismik yang penting dalam mendefinisikan tingkat kekakuan struktur selama terjadi gempa. Faktor modifikasi respon, R, dipertimbangkan untuk mengevaluasi kebutuhan gempa pada resiko gempa yang berbeda. R ditentukan sebagai faktor dimana kebutuhan gaya yang dihasilkan jika struktur masih elastis dikurangi untuk mendapatkan gaya lateral desain. Nilai R ini dapat digunakan sebagai ukuran kemungkinan bahaya seismik inelastis dari struktur yang diberikan. Dalam studi parametrik, untuk mencapai aksi inelastis khusus didefinisikan oleh R, ground motion seharusnya diskalakan tanpa mengubah kekuatan elemen. Dalam kejadian sebuah gempa, kebutuhan seismic bergantung pada tingkat akatifitas inelastis. Sehingga dalam pemilihan PGA tidak hanya bergantung pada hal-hal yang relative tetapi juga bergantung pada aktivitas seismic pada daerah khusus.

REKAMAN GEMPA

A. Ground Motion

Gaya gempa akan memberikan suatu gerakan pada tanah yang biasanya diistilahkan dengan ground motion. Ground motion ini lebih menunjukkan pengertian kepada percepatan tanah akibat gempa. Percepatan tanah akibat gempa direkam secara lengkap berdasarkan fungsi waktu, artinya percepatan tersebut direkam selama terjadinya gerakan tanah.

Dalam memilih rekaman gempa, ada hal-hal yang perlu diperhatikan. Menurut Douglas dan

Aochi (2008) dalam menggunakan metode accelerogram yang representative, rekaman dipilih dari sumber yang mengandung accelerogram dimana harus cocok dengan kondisi tempat yang akan diteliti. Pemilihannya kebanyakan harus berdasarkan magnitudo dan jarak (dan terkadang karakteristik lain seperti jenis patahan) dari tempat terjadinya gempa. Rekaman dengan respon spektra elastis yang cocok dengan spektra desain lebih disukai. Katsanos et. al (2010) menyatakan, karena magnitudo gempa dan jarak (dalam km) pada zona kehancuran dari tempat yang ditinjau adalah parameter paling umum berhubungan dengan lokasi gempa, ini jelas bahwa prosedur pemilihan yang sederhana melibatkan identifikasi pasangan karakteristik ini (M dan R).

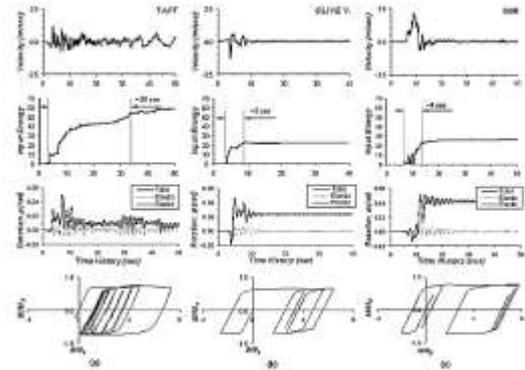
B. Gempa Mengandung Pulse Dan Tanpa Pulse

Dalam bukunya, Pawirodikromo (2012) menyebutkan bahwa gempa dekat mengakibatkan kerusakan yang sangat besar contohnya gempa Northridge (1994), gempa Kobe (1995) dan gempa Taiwan (1999). Gerakan tanah akibat gempa-gempa dekat utamanya akan dipengaruhi tiga hal pokok: 1) mekanisme gempa; 2) arah rambatan patahan relatif terhadap site; 3) kemungkinan terjadinya permanent displacement akibat patahan. Hal-hal tersebut diatas selanjutnya dikenal oleh pemerhati gempa sebagai “rupture directivity” dan “fling step”.

Menurut Kalkan dan Kunnath (2006), respon struktur terhadap gerakan tanah akibat gempa dekat dapat dikategorikan kedalam dua perbedaan pola riwayat perpindahan yang bergantung pada proses kehancuran dan efek directivity yang sesuai dengan proses kehancuran batuan. Efek directivity terbagi kedalam forward directivity dan backward directivity. Di sisi lain, fling step, menjadi hasil dari evolusi perpindahan sisa tanah akibat deformasi tektonik yang berkaitan dengan mekanisme kehancuran, umumnya ditandai dengan pulse kecepatan dengan amplitudo besar searah dan langkah monoton dalam perpindahan riwayat waktu.

Dalam penelitiannya, Kalkan dan Kunnath (2006) membuat pemodelan struktur yang terbuat dari kolom baja mendapatkan hasil model histerisis dan kurva rotasi kolom. Gambar 2 menunjukkan hasil perilaku siklik yang berbeda akibat jenis getaran gempa yang berbeda juga. Perilaku siklik yang ditunjukkan pada Gambar 2a merupakan akibat gempa jauh dengan pola perpindahan yang teratur, namun akibat gempa forward directivity dan gempa dekat (Gambar 2b & Gambar 2c) menunjukkan perilaku siklik yang

sangat signifikan lonjakan perpindahannya. Hal ini dapat berakibat fatal bagi struktur.

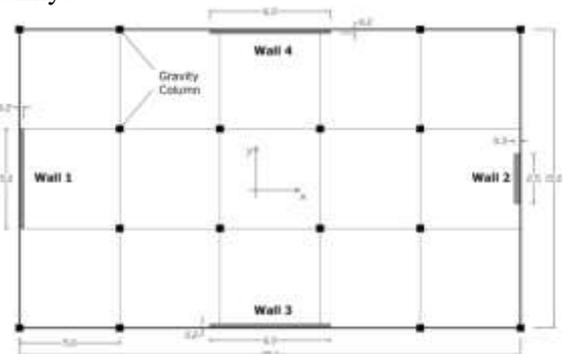


Gambar2: Kebutuhan siklik pada kolom akibat a) far-fault TAFT, b) near-fault (forward directivity) Olive V., dan c) near-fault (fling-step) SKR. (Kalkan dan Kunnath, 2006)

III. DETAIL STUDI PARAMETRIK

A. Model Bangunan

Pemodelan diambil sesuai dengan yang pernah dimodelkan oleh Beyer (2007). Namun dalam model rencana, ukuran dinding geser akan disesuaikan sehingga didapatkan eksentrisitas yang ingin diuji. Dengan mengubah ukuran dinding geser, maka nilai eksentrisitas bangunan akibat adanya perubahan masa dan kekakuan bangunan juga akan berubah dengan sendirinya. Keseluruhan berat perlantai dianggap sebagai Lumped Mass dengan total berat bangunan 9035 kN dan berpusat diketinggian efektif pada 9,3 m dengan perioda getar alami bangunan $T_1 = 0,97$, $T_2 = 0,88$ dan $T_3 = 0,48$. Nilai T tersebut diperlukan sebagai perbandingan nilai perioda getar alami bangunan. Jika nilai T sudah sama maka Model Beyer yang digunakan dalam penelitian ini sudah sesuai dengan Model Beyer aslinya.



Gambar 3: Model Rencana dalam Pengujian Parametric

Untuk faktor reduksi beban digunakan ketentuan yang ada dalam International Building Code (IBC) 2000 Tabel 1617.6, faktor reduksi beban disebut sebagai Response Modification Coefficient (R) yang nilainya 1 1/2, 2, 2 1/2, 3 1/2, 4, 4 1/2, 5, 5 1/2, dan 6. Namun tidak semua variasi R ini akan digunakan untuk penelitian, yang digunakan hanya R 3,4,5 dan 6. Hal ini dikarenakan nilai R 1 dan 2 hanya memberikan pengaruh yang kecil terhadap respon bangunan.

B. Eksentrisitas Bangunan

Dari model Beyer (2007) dilakukan penyesuaian ukuran dinding untuk mempengaruhi kekakuan sehingga eksentrisitas yang diinginkan dapat tercapai. Dalam penelitian ini akan dimodelkan tiga eksentrisitas. Perhitungan eksentrisitas dilakukan berdasarkan perhitungan eksentrisitas oleh Pawirodikromo (2012):

$$I_x = 1/12 \times b \times h^3 \quad (1)$$

$$I_y = 1/12 \times b^3 \times h \quad (2)$$

Dimana :

I_x = Inersia arah – x (sumbu kuat)

I_y = Inersia arah – y (sumbu lemah)

b = lebar dinding geser

h = tebal dinding geser

setelah dilakukan perhitungan menggunakan rumus (1) dan (2) didapat hasil I_x dan I_y sebagai berikut:

Table 3: Hasil perhitungan untuk Eksentrisitas 1 (CR1).

Nama Wall	Ukuran	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)
Wall 1	4,6 x 0,2	1,622	0,003
Wall 2	3,0 x 0,3	0,673	0,007
Wall 3	6,0 x 0,2	3,600	0,004
Wall 4	6,0 x 0,2	3,600	0,004

Dari Table 3 terlihat bahwa, terdapat dua dinding geser (Wall 1 dan Wall 2) yang ukurannya tidak sama besar dan dua dinding geser (Wall 3 dan Wall 4) yang ukurannya sama besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa terhadap sumbu-x, kekakuan struktur dalam keadaan simetri, dengan demikian tidak akan ada eksentrisitas terhadap sumbu-x. Terhadap sumbu-y, kekakuan struktur asimetris sehingga akan menimbulkan eksentrisitas yang besarnya :

$$e_y = \frac{(0,673 \times 12,5) - (1,622 \times 12,5)}{1,622 + 0,673 + 3,600 + 3,600}$$

$$e_y = -1,250 \text{ m}$$

Tanda negatif menunjukkan Eksentrisitas 1 sebesar 1,250 m berada di sebelah kiri sumbu-y dari pusat massa. Nilai eksentrisitas ini setara 0,10L (10% L).

Eksentrisitas 2 dan Eksentrisitas 3 dihitung dengan cara yang sama seperti Eksentrisitas 1. Setelah dilakukan perhitungan didapat I_x dan I_y untuk Eksentrisitas 2 dan Eksentrisitas 3 sebagai berikut :

Table 4: Hasil perhitungan untuk Eksentrisitas 2 (CR2).

Nama Wall	Ukuran	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)
Wall 1	5,0 x 0,2	2,083	0,003
Wall 2	2,5 x 0,3	0,391	0,006
Wall 3	6,0 x 0,2	3,600	0,004
Wall 4	6,0 x 0,2	3,600	0,004

Karena terhadap sumbu-x kekakuan struktur dalam keadaan simetri, dengan demikian tidak akan ada eksentrisitas terhadap sumbu-x. Terhadap sumbu-y, kekakuan struktur asimetris sehingga akan menimbulkan eksentrisitas yang besarnya :

$$e_y = \frac{(0,391 \times 12,5) - (2,083 \times 12,5)}{2,083 + 0,391 + 3,600 + 3,600}$$

$$e_y = -2,187 \text{ m}$$

Tanda negatif menunjukkan Eksentrisitas 2 sebesar 2,187 m berada di sebelah kiri sumbu-y dari pusat massa. Nilai eksentrisitas ini setara 0,17L (17% L).

Table 5: Hasil perhitungan untuk Eksentrisitas 3 (CR3).

Nama Wall	Ukuran	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)
Wall 1	5,26 x 0,24	2,895	0,006
Wall 2	2,0 x 0,2	0,133	0,001
Wall 3	6,0 x 0,2	3,600	0,004
Wall 4	6,0 x 0,2	3,600	0,004

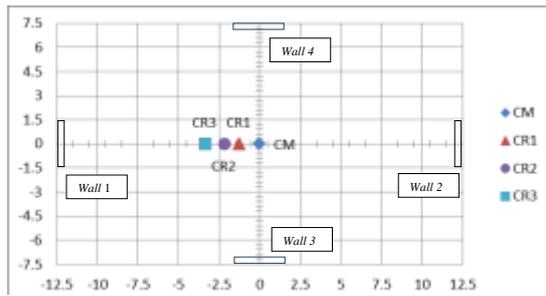
Karena terhadap sumbu-x kekakuan struktur dalam keadaan simetri, dengan demikian tidak akan ada eksentrisitas terhadap sumbu-x. Terhadap sumbu-y, kekakuan struktur asimetris sehingga akan menimbulkan eksentrisitas yang besarnya :

$$e_y = \frac{(0,133 \times 12,5) - (2,895 \times 12,5)}{2,895 + 0,133 + 3,600 + 3,600}$$

$$e_y = -3,375 \text{ m}$$

Tanda negatif menunjukkan Eksentrisitas 3 sebesar 3,375 m berada di sebelah kiri sumbu-y dari pusat massa. Nilai eksentrisitas ini setara 0,27L (27% L).

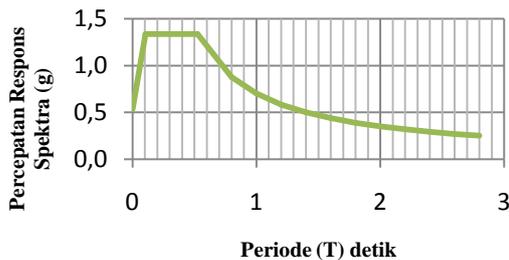
Keseluruhan nilai eksentrisitas yang telah ditentukan dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4: Pola eksentrisitas kekakuan

C. Respon Spektra

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, maka akan digunakan respon spektra berdasarkan lokasi dengan nilai percepatan tanah terbesar di Indonesia. Menurut SNI 1726-2012, kota Banda Aceh salah satu yang memiliki percepatan tanah tertinggi dengan nilai $S_s = 2,0 \text{ g}$ dan $S_1 = 0,59 \text{ g}$. Respon Spektra Aceh ini akan digunakan sebagai skala gempa pada saat melakukan simulasi bangunan. Skala gempa digunakan untuk menyesuaikan keadaan gempa sesuai dengan percepatan tanah di Aceh. Nilai skala gempa didapatkan dengan cara membandingkan nilai percepatan yang terjadi pada rekaman gempa yang disertai pulse dan tanpa pulse terhadap nilai percepatan tanah di Aceh berdasarkan SNI pada periode yang sama dengan periode natural bangunan.



Gambar5: Respon Spektrum Banda Aceh (Tanah Sedang)

D. Gaya Geser Desain (V)

Untuk mendapatkan nilai gaya geser desain bangunan (V), maka dilakukan perhitungan berdasarkan SNI 03-1726-2012 didapat hasil sebagai berikut :

Table 6 : Variasi nilai V.

Eksentrisitas	R	V (KN)
Eksentrisitas 1	3	2877
	4	2158
	5	1726
	6	1439
Eksentrisitas 2	3	2685

Eksentrisitas 3	4	2014
	5	1611
	6	1342
	3	2435
	4	1826
	5	1461
	6	1218

E. Analisis Bangunan

Dalam melakukan analisis bangunan pada Studi Parametrik ini digunakan Program Ruaumoko. Bangunan dianalisis dalam kondisi elastis dan inelastis. Program Ruaumoko dirancang oleh Prof. Athol J Carr, yang berasal dari University of Canterbury, New Zealand. Program ini dirancang untuk melakukan analisa struktur, seperti bangunan dan/atau jembatan, yang mengalami gempa dan eksitasi dinamis lainnya. Program ini digunakan untuk studi eksitasi gempa termasuk pemodelan sistem base-isolation. Program ini juga dapat digunakan untuk menganalisa push over, baik statis maupun dinamis. Pada awalnya program ini dirancang untuk analisa 2D (2 dimensi), namun sekarang analisa 3D sudah bisa dilakukan dengan kemampuan pemodelan penuh struktur tiga dimensi.

IV. HASIL DAN DISKUSI

Analisis eksperimental ini telah dilakukan terhadap 300 bangunan yang terdiri dari 15 model bangunan dan diberikan 20 variasi gempa. Keseluruhan model bangunan dipengaruhi oleh eksentrisitas bangunan dan Faktor Modifikasi Respon (R). Analisis menunjukkan adanya perbedaan deformasi torsi lantai pada tiap-tiap bangunan. Hasil yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini merupakan hasil simpangan rata-rata dari 10 (sepuluh) gempa dengan Pulse dan 10 (sepuluh) gempa tanpa Pulse.

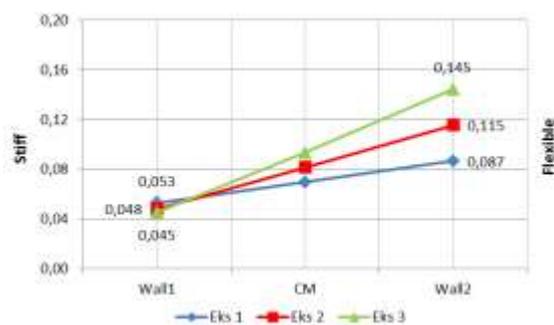
Model bangunan mempunyai 3 variasi eksentrisitas. Ketiga model eksentrisitas bangunan ini mempunyai periode natural bangunan yang berbeda. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan kekakuan pada bangunan. Periode natural (T) bangunan sangat mempengaruhi respon bangunan terhadap gaya gempa.

A. Hasil Analisis Bangunan Elastis

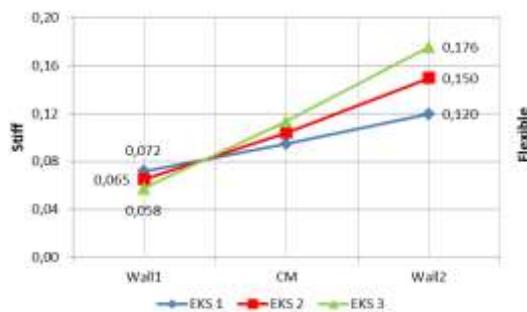
a) Akibat Gempa Tanpa Pulse

Pada bangunan sistem elastis yang diberikan gaya gempa tanpa Pulse (Gambar 6), variasi eksentrisitas 1 menghasilkan deformasi pada sisi

bangunan yang kaku (stiff) sebesar 0,053 m atau setara dengan 5,3 cm. Pada sisi bangunan yang fleksibel (flexible) terjadi deformasi sebesar 0,087 m atau setara dengan 8,7 cm. Untuk variasi eksentrisitas 2, deformasi elastis yang terjadi pada sisi kaku bangunan adalah 0,048 m atau setara dengan 4,8 cm. Pada sisi bangunan fleksibelnya, deformasi yang terjadi pada eksentrisitas 2 sebesar 0,115 m atau setara dengan 11,5 cm. Deformasi elastis lantai yang terjadi pada sisi kaku bangunan variasi eksentrisitas 3 adalah sebesar 0,053 m atau setara dengan 5,3 cm. Pada bangunan variasi eksentrisitas 3, deformasi yang terjadi pada lantai adalah sebesar 0,145 m atau setara dengan 14,5 cm.



Gambar 6: Deformasi lantai bangunan sistem elastis diberikan gaya gempa tanpa Pulse



Gambar7: Deformasi lantai bangunan sistem elastis diberikan gaya gempa Pulse

b) Akibat Gempa Pulse

Pada bangunan yang diberikan gaya gempa dengan Pulse (Gambar 7) deformasi lantai pada sisi kaku bangunan variasi eksentrisitas 1 adalah sebesar 0,058 m atau setara dengan 5,8 cm. Pada sisi bangunan yang fleksibel terjadi deformasi sebesar 0,120 m atau setara dengan 12,0 cm. Untuk variasi eksentrisitas 2, deformasi elastis yang terjadi pada sisi kaku bangunan adalah

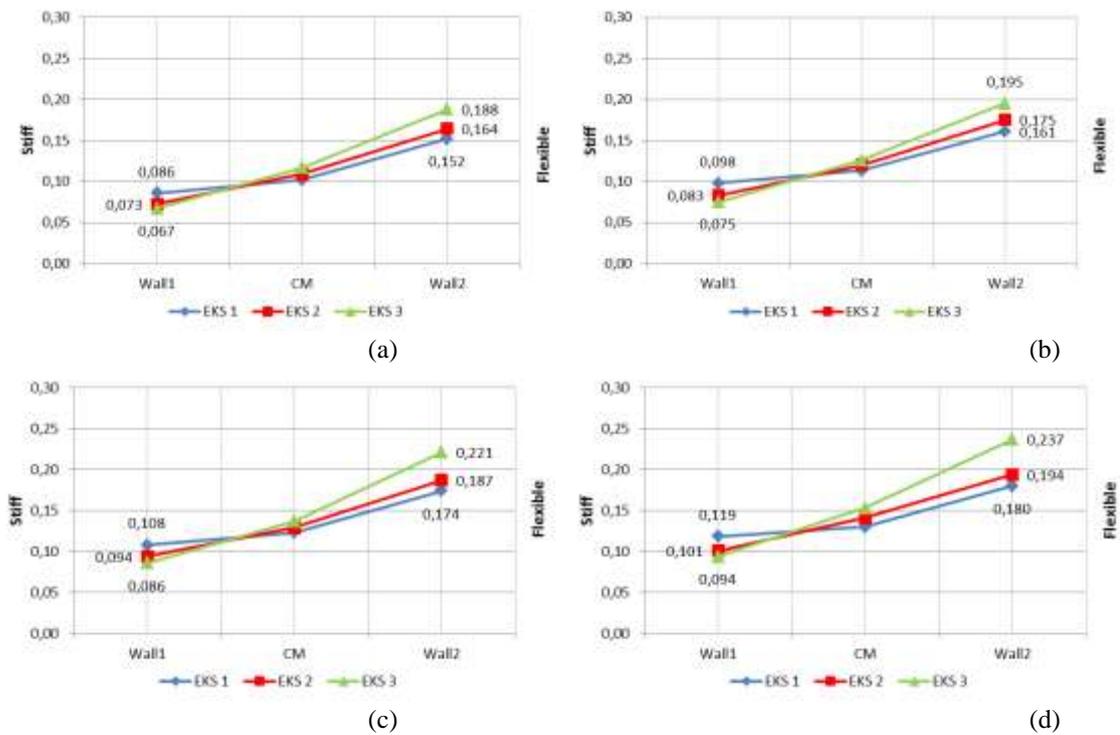
0,065 m atau setara dengan 6,5 cm. Pada sisi bangunan fleksibelnya, deformasi yang terjadi pada eksentrisitas 2 sebesar 0,150 m atau setara dengan 15 cm. Deformasi elastis lantai yang terjadi pada sisi kaku bangunan variasi eksentrisitas 3 adalah sebesar 0,072 m atau setara dengan 7,2 cm. Pada bangunan variasi eksentrisitas 3, deformasi yang terjadi pada lantai adalah sebesar 0,176 m atau setara dengan 17,6 cm.

B. Hasil Analisis Bangunan Inelastis

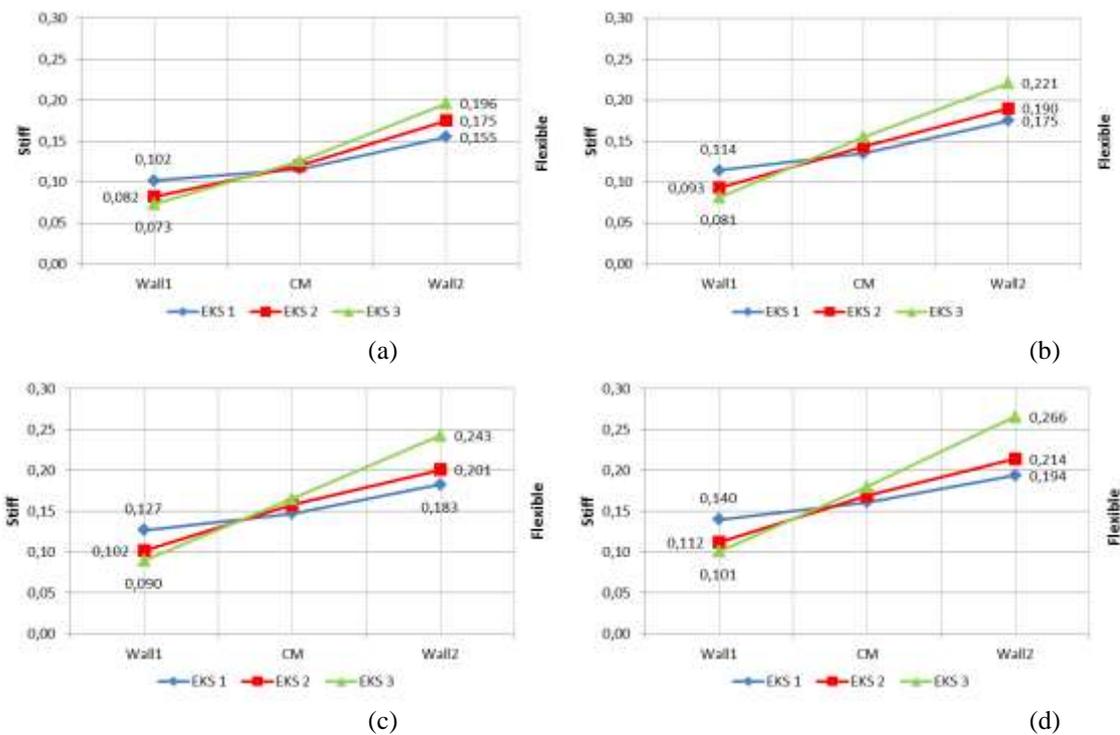
a) Akibat Gempa Tanpa Pulse

Secara keseluruhan, pola deformasi lantai yang terjadi akibat gempa tanpa pulse ditunjukkan pada Gambar 8. Eksentrisitas 3 mengalami deformasi yang paling tinggi diantara Eksentrisitas lainnya. Begitu juga pengaruh Response Modification Coefficient (R), semakin besar nilai R semakin besar pula deformasi yang terjadi. Faktor modifikasi respon mempengaruhi tingkat daktilitas suatu bangunan. Semakin besar daktilitas yang dimiliki bangunan maka akan semakin besar kemampuan bangunan berdeformasi, hal ini dapat menjadi salah satu solusi untuk mengantisipasi gempa yang tak terduga besarnya karena perilaku daktil dapat mereduksi kekakuan bangunan sekaligus dapat mendisipasi energi gaya gempa. Perlu diingat bahwa semakin besar daktilitas suatu bangunan maka akan menciptakan lendutan yang besar pula, sehingga dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk bangunan. Namun semakin kecil nilai R yang digunakan maka bangunan akan lebih cenderung merespon gaya gempa dalam rentang elastis.

Besarnya deformasi lantai yang terjadi pada analisa inelastis akibat R4 yang diberikan gaya gempa tanpa pulse (Figure 8d), variasi eksentrisitas 1 menghasilkan deformasi pada sisi bangunan yang kaku (stiff) sebesar 0,119 m atau setara dengan 11,9 cm. Pada sisi bangunan yang fleksibel (flexible) terjadi deformasi sebesar 0,180 m atau setara dengan 18,0 cm. Untuk variasi eksentrisitas 2, deformasi inelastis yang terjadi disisi kaku bangunan adalah 0,101 m atau setara dengan 10,1 cm. Pada sisi bangunan fleksibelnya, deformasi yang terjadi pada eksentrisitas 2 sebesar 0,194 m atau setaradengan 19,4 cm.



Gambar 8: Deformasi lantai bangunan sistem inelastis diberikan gaya gempa Tanpa Pulse (a) Deformasi dengan Nilai R=3 (b) Deformasi dengan Nilai R=4 (c) Deformasi dengan Nilai R=5 (d) Deformasi dengan Nilai R=6.



Gambar 9: Deformasi lantai bangunan sistem inelastis diberikan gaya gempa Pulse (a) Deformasi dengan Nilai R=3 (b) Deformasi dengan Nilai R=4 (c) Deformasi dengan Nilai R=5 (d) Deformasi dengan Nilai R=6.

Deformasi inelastis lantai yang terjadi pada sisi kaku bangunan variasi eksentrisitas 3 adalah sebesar 0,094 m atau setara dengan 9,4 cm. Pada sisi bangunan fleksibel variasi eksentrisitas 3, deformasi yang terjadi pada lantai adalah sebesar 0,237 m atau setara dengan 23,7 cm.

b) Akibat Gempa Pulse

Secara keseluruhan, pola deformasi lantai yang terjadi akibat gempa tanpa pulse ditunjukkan pada Gambar 9. Besarnya deformasi lantai yang terjadi pada analisa inelastis akibat R4 yang diberikan gaya gempa disertai pulse (Gambar 9d), variasi eksentrisitas 1 menghasilkan deformasi pada sisi bangunan yang kaku (stiff) sebesar 0,140 m atau setara dengan 14,0 cm. Pada sisi bangunan yang fleksibel (flexible) terjadi deformasi sebesar 0,194 m atau setara dengan 19,4 cm. Untuk variasi eksentrisitas 2, deformasi inelastis yang terjadi pada sisi kaku bangunan adalah 0,112 m atau setara dengan 11,2 cm. Pada sisi bangunan fleksibelnya, deformasi yang terjadi pada eksentrisitas 2 sebesar 0,214 m atau setara dengan 21,4 cm. Deformasi inelastis lantai yang terjadi pada sisi kaku bangunan variasi eksentrisitas 3 adalah sebesar 0,101 m atau setara dengan 10,1 cm. Pada sisi bangunan fleksibel variasi eksentrisitas 3, deformasi yang terjadi pada lantai adalah sebesar 0,266 m atau setara dengan 26,6 cm.

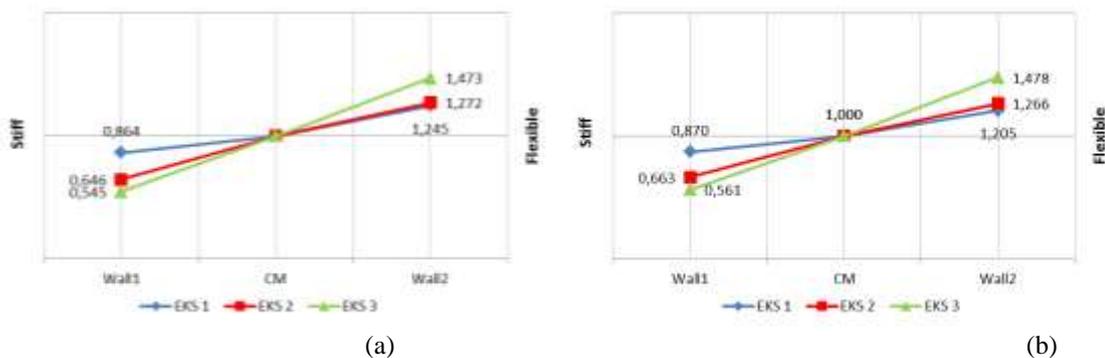
Adanya perbedaan dari gempa yang memiliki pulse dan gempa yang tidak memiliki pulse ternyata memiliki pengaruh terhadap simpangan yang dihasilkan. Dari hasil penelitian terlihat nilai deformasi yang diakibatkan gempa tanpa pulse lebih kecil dari pada yang disebabkan oleh gempa dengan pulse (Table 7). Adanya perbedaan nilai deformasi yang terjadi akibat adanya pulse pada gempa patut untuk dicermati.

Karena semakin besar pulse yang terkandung dalam suatu gempa akan memberikan pengaruh yang semakin besar pula terhadap deformasi bangunan.

Table 7 : Perbedaan deformasi akibat gempa pulse dan tanpa pulse pada R=6.

Jenis Gempa	Wall 1	CM	Wall 2
Eksentrisitas 1			
Pulse	0,140	0,161	0,194
No Pulse	0,119	0,130	0,180
Eksentrisitas 2			
Pulse	0,112	0,169	0,214
No Pulse	0,101	0,141	0,194
Eksentrisitas 3			
Pulse	0,101	0,180	0,266
No Pulse	0,094	0,153	0,237

Meskipun terdapat perbedaan deformasi antara gempa mengandung pulse dan tanpa pulse namun nilainya tidak begitu signifikan. Hal ini dapat terjadi karena Eksentrisitas yang terjadi hanya searah. Untuk melihat perbedaan deformasi yang terjadi antara bangunan yang terkena gempa pulse dan tanpa pulse dilakukan normalisasi terhadap nilai deformasi yang didapat. Gambar 10 merupakan grafik yang nilai simpangan pada setiap sisi telah dinormalisasi terhadap simpangan yang terjadi dipusat massanya. Dari hasil normalisasi terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada kedua bangunan hampir sama hanya saja deformasi yang terjadi pada bangunan yang terkena gempa pulse lebih besar. Hasil ini akan lebih signifikan terlihat jika bangunan mengalami eksentrisitas dalam dua arah. Dalam eksentrisitas dua arah tentu kekakuan dan massa dari tiap-tiap elemen lateralnya akan berbeda dan hal ini akan memberikan respon yang lebih besar dari pada eksentrisitas dalam satu arah.



Gambar10: Deformasi Normalisasi terhadap pusat massa lantai bangunan sistem inelastis (a) Deformasi dengan Nilai R=6 akibat gempa tanpa pulse (b) Deformasi dengan Nilai R=6 akibat gempa pulse.

V. KESIMPULAN

Dari hasil studi parametrik terhadap bangunan elastis dan inelastis akibat eksentrisitas kekakuan bangunan yang telah disimulasikan dengan program Ruaumoko dengan memvariasikan eksentrisitas, faktor modifikasi respon (R) dan jenis gempa dapat disimpulkan bahwa adanya perbedaan dari gempa yang memiliki pulse dan gempa yang tidak memiliki pulse ternyata memiliki pengaruh terhadap simpangan yang dihasilkan, perbedaan tersebut berkisar antara 8% hingga 20%.

Pada umumnya perhitungan struktur selalu dibatasi hingga mencapai batas elastis, hal ini disebabkan karena perencanaan struktur elastis lebih mudah, cukup memenuhi syarat-syarat keseimbangan gaya. Dengan perencanaan yang lebih sederhana maka aplikasi detailing juga akan lebih mudah diterapkan. Padahal, jika kita teliti lebih jauh, ternyata beton masih mempunyai suatu kekuatan tertentu untuk merespon gaya-gaya yang bekerja dalam kondisi inelastis.

Bangunan inelastis dapat berdeformasi lebih besar dari pada bangunan elastis. Pada bangunan dengan sistem elastis simpangan maksimum yang tercapai dari semua model sebesar 0,176 mm sedangkan pada bangunan sistem inelastis menghasilkan simpangan terbesar 0,226 mm. Adanya perbedaan nilai simpangan inelastis terhadap elastis hingga 51% menunjukkan bahwa bangunan masih mampu bertahan lebih jauh dari pada batas elastis sebelum bangunan hancur. Adanya bagian bangunan yang lebih kaku dari bagian yang lainnya akan mempengaruhi letak pusat kekakuan sehingga menciptakan eksentrisitas kekakuan. Pada eksentrisitas 1 untuk bangunan yang diberikan gempa disertai pulse dalam kondisi R4 terjadi selisih simpangan 38%, pada eksentrisitas 2 terjadi selisih 91% dan pada eksentrisitas 3 terjadi selisih 163% untuk kondisi yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- Anagnostopoulos, S. A., Alexopoulou, C., dan Stathopoulos, K. G. (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 and Structural Dynamics , 521–540.
- Anonim. (2005). *International Code Council*, Inc. Illinois: Building Officials and Code Administrators International, Inc.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung (SNI-1726-2002)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 03-1726-2012)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI-2847-2002)*. Jakarta: BSN.
- Beyer, K., dan 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.
- Budiono, B., dan Supriatna, L. (2011). *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa: dengan Menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-201x*. Bandung: Penerbit ITB.
- De Stefano, M., dan Pintucchi, B. (2008). *A Review Of Research On Seismic Behaviour Of Irregular Building Structures Since 2002*. Bull Earthquake Eng 6 , 285-308.
- De Stefano, M., Marino, E. M., dan Rossi, P. P. (2006). *Effect of Overstrength on the Seismic Behaviour of Multi-storey*. Bull Earthquake Eng 4 , 23–42.
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Lange, S. T., dan 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.
- Imran, I., dan Hendrik, F. (2010). *Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*. Bandung: Penerbit ITB.
- Kalkan, E., dan Kunnath, K. (2006). *Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings*. Earthquake Spectra, Volume 22, No. 2 , 367–390.
- Katsanos, E. I., Sextos, A. G., dan Manolis, G. D. (2010). *Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 , 157–169.
- Marusic, D., dan Fajfar, P. (2005). *On the Inelastic Seismic Response of Asymmetric Buildings Under Bi-axial Excitation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamic , 943–963.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Roy, R., dan Chakroborty, S. (2013). *Seismic Demand of Plan-asymmetric Structures: A Revisit*. Earthquake Engineering & Engineering Vibration 12 , 99-117.
- Sommer, A., dan Bachmann, H. (2005). *Seismic Behavior of Asymmetric RC Wall Buildings: Principles and New Deformation-based design method*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 101–124.
- Stathopoulos, K. G., dan Anagnostopoulos, S. A. (2005). *Inelastic Torsion Of Multistorey Buildings Under Earthquake Excitations*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 1449–1465.