



Evaluasi Perilaku Seismik Akibat Ketidakberaturan Vertikal pada Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Tinggi

*Hakas Prayuda¹, Ogata Wilasamba¹, Fadillawaty Saleh¹,
Taufiq Ilham Maulana¹, Fadhila Firdausa²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Swiwijaya, Kota Palembang, Sumatera Selatan.

*) hakasprayuda@umy.ac.id

Received: 30 September 2021 Revised: 20 Desember 2022 Accepted: 22 Desember 2022

Abstract

This study investigated the behavior of high-rise reinforced concrete structures with vertical irregularities caused by seismic loading. The ability of the building to endure all of the load during operation should be considered in design process. The irregularities in the building cause to impair stiffness and performance of the structure, particularly during the earthquake. Therefore, it is necessary to evaluate the effects of vertical irregularities on building, especially high-rise buildings. This study employs an S-Shaped structure with five vertical irregularities. Numerical analysis was used by using STERA 3D software. The dynamic load used is based on time history data from the previous earthquakes, including the El-Centro, Kobe, and Parkfield. The seismic behavior evaluated in this study consist of shear force, lateral deformation, structural stiffness, the relationship between base shear and top displacement, drift ratio, maximum acceleration response, capacity curve, and top orbit of the building. Based on the numerical analysis results, it can be concluded that each model has a different seismic performance even though it is given the same earthquake load and material properties. The vertical irregularity of the building greatly affects the behavior of the structure due to seismic analysis.

Keywords: Vertical irregularity, high-rise building, time history, STERA 3D, reinforced concrete

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi perilaku bangunan bertingkat tinggi pada beton bertulang yang memiliki ketidakberaturan vertikal akibat beban seismik. Kekuatan bangunan dalam menahan beban yang bekerja adalah hal yang sangat penting untuk diperhitungkan. Ketidakberaturan bentuk bangunan yang mempengaruhi dari massa bangunan sangat mempengaruhi kekakuan dan kinerja bangunan khususnya ketika terjadi gempa bumi. Oleh sebab itu, perlu dilakukan evaluasi mengenai efek dari ketidakberaturan vertikal pada bangunan khususnya bangunan bertingkat tinggi. Pada penelitian ini menggunakan bangunan berbentuk S-Shape dengan variasi 5 ketidakberaturan vertikal. Evaluasi yang dilakukan menggunakan analisis numerik melalui aplikasi STERA 3D. Beban gempa yang digunakan berupa data riwayat waktu dari sejarah gempa yang pernah terjadi yaitu beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Perilaku yang ditinjau pada penelitian ini terdiri dari gaya geser, deformasi lateral, kekakuan struktur, perpindahan, hubungan gaya geser dasar dengan displacement, drift ratio, respon percepatan maksimum, kurva kapasitas dan top orbit bangunan. Dari hasil simulasi numerik dapat disimpulkan bahwa dengan setiap model memiliki performance yang berbeda-beda meskipun diberikan beban gempa dan material properties yang sama. Dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan arah vertikal sangat mempengaruhi performance seismic bangunan beton bertulang bertingkat tinggi.

Kata kunci: Ketidakberaturan vertikal, bangunan bertingkat tinggi, sejarah waktu, STERA 3D, beton bertulang

Pendahuluan

Gempa bumi merupakan salah satu bencana yang paling berbahaya di dunia, banyak wilayah dengan tingkat polulasi yang tinggi hidup di wilayah rawan terjadi gempa. Secara geografis, Indonesia berada di wilayah yang tidak stabil yaitu sering dikenal dengan istilah *ring of fire* dimana zona ini dikelilingi oleh tiga lempeng yang sangat aktif yaitu lempeng Eurasia, Australia dan lempeng Pasifik sehingga probabilitas terjadi gempa cukuplah tinggi (Prayuda *et al.*, 2017). Efek dari letak geografis tersebut menyebabkan bangunan-bangunan yang berada dipermukaan disekitar lokasi gempa seringkali mengalami kerusakan, mulai dari rusak ringan hingga ke rusak berat.

Menurut FEMA 154 (2000), terdapat beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya kerusakan pada bangunan akibat gempa bumi, diantaranya seismisitas lokasi bangunan, jumlah populasi pengguna gedung, tipe atau jenis tanah, elemen-elemen *non-structural*, jenis dan tipe bangunan, jumlah lantai, ketidakberaturan bangunan arah vertikal (*vertical irregularity*), ketidakberaturan bangunan arah horizontal (*plan irregularity*), serta umur bangunan. Keterbatasan lahan untuk wilayah tertentu menyebabkan pembangunan arah vertikal merupakan salah satu solusi yang tepat. Namun demikian, ketidakberaturan bentuk bangunan arah vertikal mempengaruhi stabilitas dari bangunan itu sendiri, khususnya apabila terjadi gempa bumi. Standar mengenai ketidakberaturan bangunan baik pada arah vertikal maupun horizontal telah diklasifikasikan pada SNI 1729:2019 (BSN, 2019a). SNI 1729 telah menjelaskan bahwa terdapat masing-masing lima tipe ketidakberaturan baik pada arah horizontal maupun vertikal yang harus dipertimbangkan pada saat proses perencanaan.

Beberapa penelitian mengenai ketidakberaturan bangunan telah dilakukan, diantaranya pengaruh dari *plan irregularity* pada bangunan bertingkat tinggi (Monika *et al.*, 2020). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakberaturan arah horizontal cukup mempengaruhi kekakuan bangunan ketika diberikan beban gempa. Evaluasi pengaruh dari *plan irregularity* juga dilakukan oleh Alecci *et al* (2019) dengan menganalisis efek torsi pada bangunan sekolah menggunakan metode yang di desain oleh *American Standard for Civil Engineer* (ASCE).

Evaluasi akibat ketidakberaturan horizontal pada bangunan beton bertulang juga ditemukan oleh beberapa peneliti lainnya yang menyimpulkan bahwa *plan irregularity* sangat mempengaruhi kekakuan struktur (Stefano *et al.*, 2014; Raheem *et al.*, 2018; Haque *et al.*, 2016). Simulasi numerik

mengenai ketidakberaturan bentuk bangunan arah vertikal juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Azghandi *et al.* (2020) melakukan analisis numerik mengenai mekanisme keruntuhan seismik pada bangunan konstruksi baja yang tidak teratur arah vertikal. Sedangkan Wang *et al.* (2018) menganalisis perilaku seismik dan tingkat kerentanan pada bangunan untuk pembangkit listrik dengan mempertimbangkan pengaruh dari ketidakberaturan massa bangunan arah vertikal. Sementara itu Bhosale *et al.* (2017) menemukan metode untuk menghitung hubungan antara bahaya akibat beban seismik terhadap pengaruh tingkat ketidakberaturan bangunan arah vertikal. Masing-masing penelitian tersebut menunjukkan bahwa baik pada bangunan menggunakan konstruksi baja maupun beton bertulang memiliki tingkat kerentanan yang lebih besar apabila massa bangunan arah vertikal tidak teratur.

Pada penelitian ini akan menganalisis pengaruh ketidakberaturan vertikal pada bangunan gedung bertingkat tinggi yang terbuat dari beton bertulang. Terdapat lima variasi dengan ketidakberaturan vertikal bentuk bangunan. Selain itu, bentuk horizontal bangunan pada penelitian ini adalah S-Shape dimana belum terdapat penelitian terdahulu yang menganalisis pengaruh dari ketidakberaturan horizontal dengan bentuk bangunan S ini. Pada penelitian ini menggunakan program STERA 3D untuk simulasi sismik menggunakan riwayat gempa *time history*. Penggunaan aplikasi STERA 3D sudah cukup banyak dilakukan oleh peneliti terdahulu karena sangat cocok untuk menganalisis *performance* bangunan terhadap beban gempa *time history*.

Saito (2016) melakukan penelitian mengenai respon bangunan bertingkat tinggi dengan periode gempa yang panjang menggunakan aplikasi STERA 3D menggunakan analisis *time history*. Selain itu beberapa penelitian ditemukan juga dengan menganalisis respon bangunan beton bertulang dengan aplikasi ini (Tanjung *et al.*, 2019; Maulana *et al.*, 2019; Zega *et al.*, 2020). Dari seluruh penelitian tersebut menunjukkan bahwa aplikasi STERA 3D yang berasal dari Jepang ini cukup mampu untuk mengevaluasi penampilan bangunan beton bertulang dalam menahan beban gempa menggunakan metode analisis *time history*.

Penelitian ini menginvestigasi lima model bangunan dengan variasi bentuk vertikal. Pada masing-masing bangunan akan di analisis kapasitasnya terhadap gaya gempa *time history*. Data *time history* gempa yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari tiga jenis yaitu data El-Centro, Kobe dan Parkfield. Melalui penelitian ini diharapkan dapat mengevaluasi *performance*

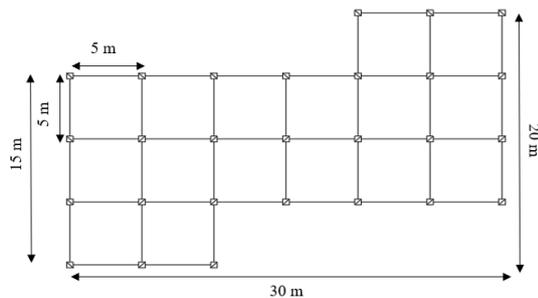
bangunan yang memiliki ketidakberaturan arah vertikal sehingga dapat dijadikan salah satu acuan oleh pada designed bangunan kedepannya.

Metode

Informasi bentuk bangunan

Terdapat lima model bangunan yang dianalisis menggunakan aplikasi STERA 3D dengan masing-masing model memiliki tingkat ketidakberaturan yang berbeda-beda. Gambar 1 memperlihatkan bentuk perencanaan luas bangunan yang berbentuk S. Sedangkan pada Gambar 2 merupakan bentuk ketidakberaturan pada masing-masing model bangunan. Perencanaan masing-masing struktur mengikuti peraturan SNI 1729:2019 (BSN, 2019a) dan SNI 2874:2019 (BSN, 2019b).

Tabel 1 merupakan dimensi dan kebutuhan tulangan pada kolom, sedangkan pada Tabel 2 merupakan data dari dimensi dan kebutuhan tulangan untuk balok serta pada Tabel 3 merupakan detail untuk penulangan pelat lantai. Mutu beton yang digunakan pada seluruh model adalah sama, serta mutu baja yang digunakan pada penelitian ini mengacu dari SNI yang menyesuaikan dengan diameter tulangan baja yang digunakan untuk masing-masing komponen (BSN, 2017).



Gambar 1. Bentuk tampak atas bangunan

Pada memodelan ini hanya memperhitungkan bentuk dari ketidakberaturan vertikal. Sehingga, posisi tangga dan void tidak diperhitungkan. Selain itu, pada pemodelan ini hanya memodelkan kolom, balok dan pelat, sedangkan komponen non struktur seperti dinding dianggap sebagai beban mati. Metode analisis untuk mendapatkan parameter *performance* bangunan menggunakan *software* STERA 3D menggunakan data gempa *time history* dari El-Centro, Kobe dan Parkfield. Data gempa yang diinput pada simulasi ini berupa data gempa arah X, Y dan Z. Melalui analisis ini menghasilkan gaya geser dasar, *drift ratio*, kurva kapasitas, lendutan arah lateral, perpindahan bangunan bagian atas, percepatan perpindahan, kekakuan struktur, serta hubungan antara gaya geses dasar bangunan dengan deformasi pada bagian atas bangunan.

Tabel 1. Dimensi dan kebutuhan tulangan kolom

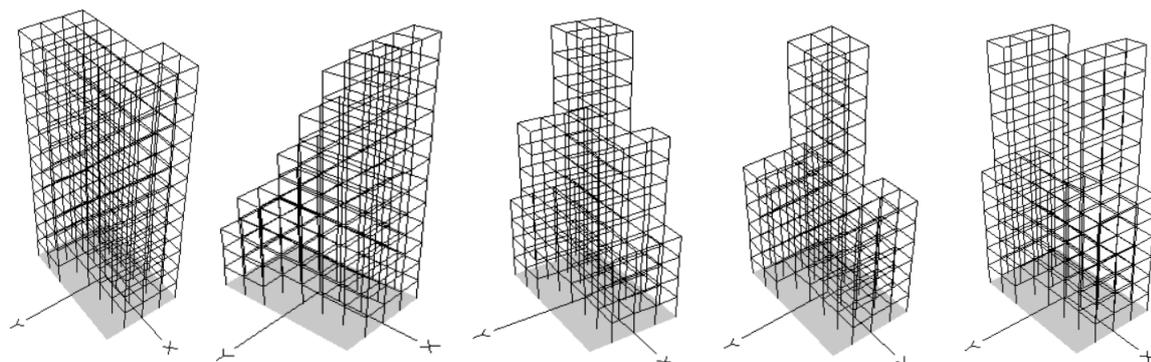
Lantai	Dimensi (mm)	Tulangan pokok	Tulangan sengkang	
			Tumpuan (mm)	Lapangan (mm)
1-5	850 × 850	28 D25	4 D10-100	4 D10-150
6-12	750 × 750	24 D25	4 D10-100	4 D10-150

Tabel 2. Dimensi dan kebutuhan tulangan balok

Lantai	Dimensi (mm)	Tulangan pokok		Tulangan Sengkang
		Atas	Bawah	
1	800 × 400	7 D25	7 D25	4 D13-100
2-5	800 × 400	7 D25	7 D25	4 D13-100
6-12	600 × 300	5 D25	5 D25	4 D13-100

Tabel 3. Detail plat lantai

Lantai	Tebal (mm)	Tulangan pokok (mm)
1	200	D13-150
Lantai 2-12	150	D13-150



(a) Model 1

(b) Model 2

(c) Model 3

(d) Model 4

(e) Model 5

Gambar 2. Variasi ketidakberaturan vertikal bangunan gedung bertingkat tinggi

Pembebanan

Pada pemodelan ini terdapat dua beban yang ditambahkan pada struktur ini yaitu beban berat sendiri dari struktur tersebut dan beban hidup sesuai klasifikasi dari bangunan tersebut. Pada pembebanan juga ditambahkan beban hidup (*live load*) sesuai dengan kegunaan gedung ini yaitu gedung perkantoran. Tabel 4 merupakan hasil perhitungan pembebanan pada masing-masing lantai. Perhitungan pembebanan pada penelitian ini mengacu pada SNI 1727: 2012 (BSN, 2013).

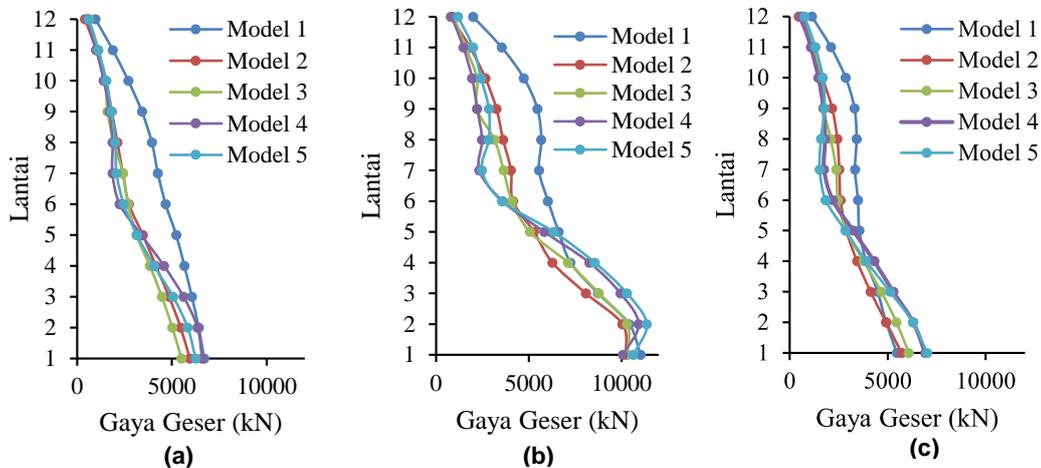
Tabel 4. Pembebanan pada struktur

Lantai	Model 1 (kN)	Model 2 (kN)	Model 3 (kN)	Model 4 (kN)	Model 5 (kN)
1	6736	6736	6736	6736	6736
2	6266	6266	6266	6266	6266
3	6266	6266	6266	6266	6266
4	6266	5214	4163	6266	6266
5	6266	5214	3344	6266	6266
10	5066	2050	1447	1447	2378
11	5066	2050	1447	1447	2378
12	5066	1189	1447	1447	2378

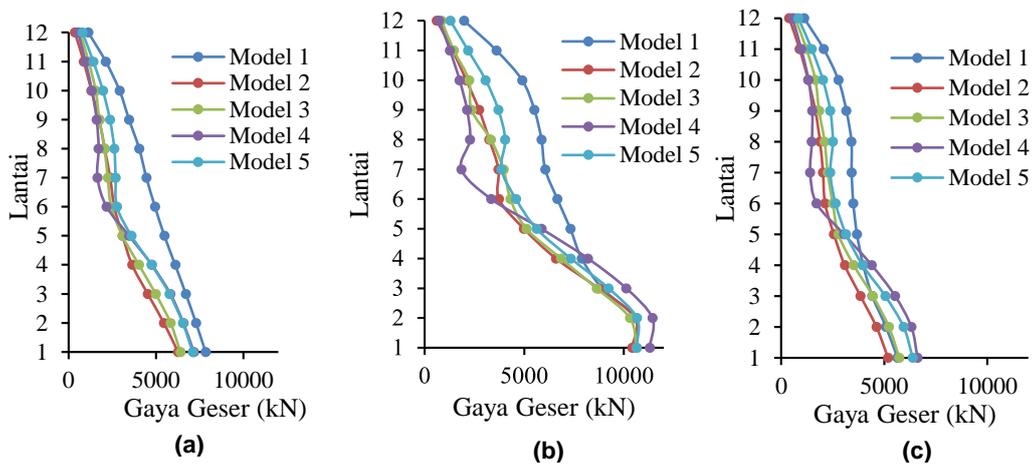
Hasil dan Pembahasan

Gaya geser

Setiap bangunan yang menerima beban gempa akan terjadi gaya geser pada setiap lantainya yang disebabkan oleh gaya gempa tersebut. Pada bangunan yang memiliki ketidakberaturan vertikal, gaya geser harus diperhitungkan agar tidak melampaui dari batas ketentuan yang ada. Nilai gaya geser yang ada pada lantai dasar akan lebih besar daripada lantai yang berada di atasnya, nilai gaya geser akan semakin menurun setiap kenaikan lantainya. Pada hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 3 untuk gaya geser arah X dan Gambar 4 untuk arah Y. Hasil menunjukkan bahwa nilai gaya geser paling besar terjadi pada lantai dasar dan nilai paling kecil berada pada lantai 12. Pada analisis model yang dilakukan menggunakan *software* STERA 3D didapatkan nilai gaya geser X dan Y pada setiap pemodelan dengan 3 jenis beban gempa. Hasil penunjukkan bahwa dengan data gempa *time history* Kobe menghasilkan gaya geser terbesar dibandingkan dengan gaya gempa lainnya.



Gambar 3. Gaya geser masing-masing lantai arah X (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



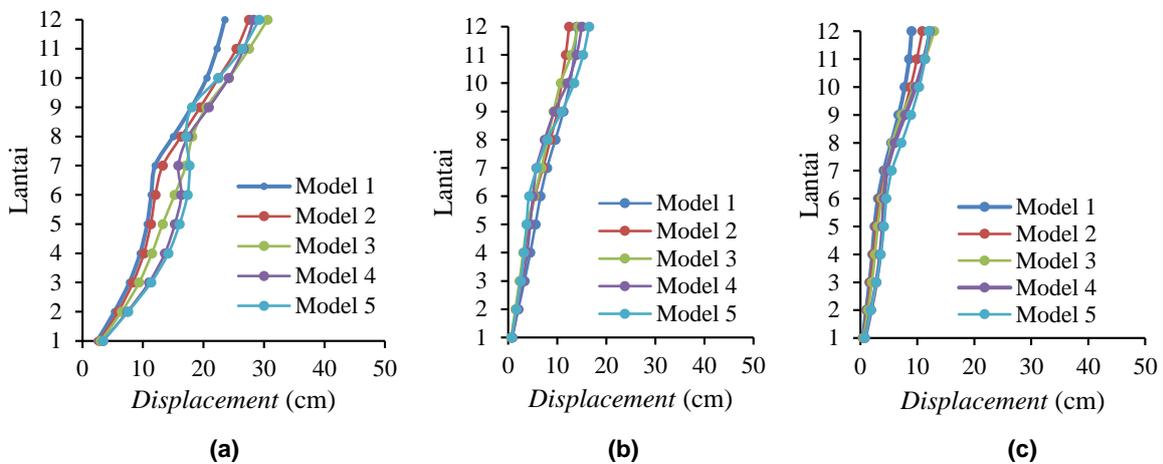
Gambar 4. Gaya geser masing-masing lantai arah Y (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield

Deformasi lateral

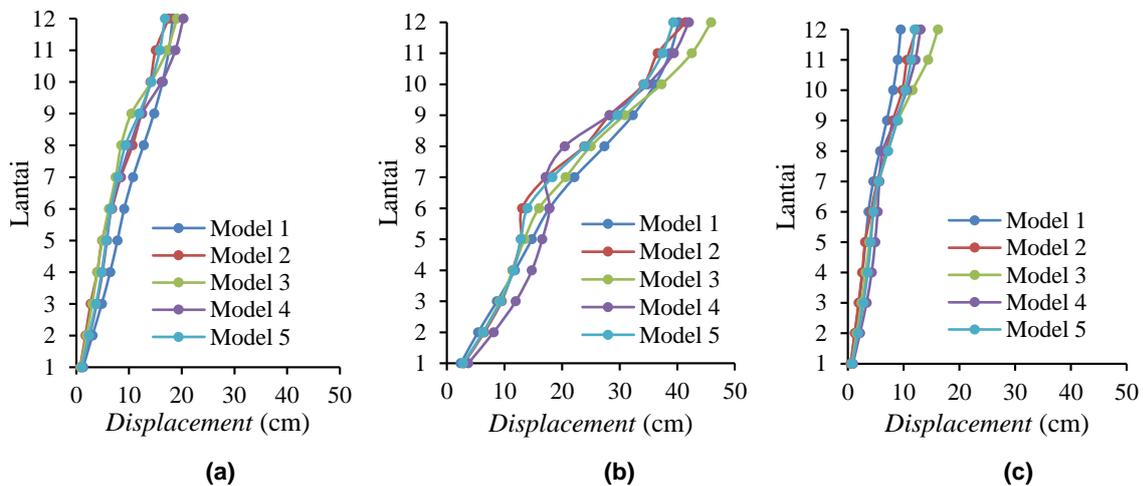
Struktur bangunan menghasilkan deformasi apabila struktur bangunan tersebut menerima beban gempa yang disebabkan oleh getaran. Deformasi memiliki gaya arah X dan Y akan tetapi deformasi lateral berbeda dengan *shear force*, jika memiliki gaya yang terbesar berada pada lantai dasar. Deformasi lateral memiliki hasil paling besar pada lantai paling atas yang dimana gaya nya akan semakin besar apabila bangunan tersebut semakin tinggi. Semakin tinggi bangunan tersebut maka akan semakin besar pula deformasi lateral yang terjadi pada struktur bangunan tersebut.

Hasil analisis deformasi lateral dapat dilihat pada Gambar 5 untuk arah X dan Gambar 6 untuk arah Y. Pada struktur bangunan yang dibebani oleh beban gempa El-Centro terjadi deformasi lateral terbesar arah X yaitu sebesar 16,50 cm yaitu pada lantai 12 model 5 dan deformasi terkecil arah X

yaitu sebesar 0,63 cm pada lantai 1 model 3. Deformasi lateral arah Y terbesar terdapat pada lantai 12 model 4 yaitu sebesar 20,31 cm dan yang terkecil yaitu sebesar 0,74 cm terdapat pada lantai 1 model 2. Struktur bangunan yang dibebani oleh beban gempa Kobe terjadi deformasi terbesar arah X yaitu sebesar 30,57 cm yaitu pada lantai 12 model 3 dan deformasi terkecil arah X sebesar 2,42 cm terdapat pada lantai 1 model 1. Deformasi terbesar yang terjadi pada arah Y yaitu sebesar 45,90 cm yang terjadi pada lantai 12 model 3 dan deformasi terkecil yaitu sebesar 2,41 cm yang terjadi pada lantai 1 model 1. Pada model yang dibebani dengan gempa Parkfield pada arah X dengan nilai terbesar yaitu sebesar 12,96 cm yang terletak pada lantai 12 model 3, dan deformasi arah X terkecil yaitu sebesar 0,42 cm yang terletak pada lantai 1 model 1. Pada arah Y nilai deformasi terbesar yaitu sebesar 16,19 cm yang terletak pada lantai 12 model 3 dan pada arah Y terkecil yaitu sebesar 0,52 cm yang terletak pada lantai 1 model 1.



Gambar 5. Deformasi lateral masing-masing lantai arah X (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



Gambar 6. Deformasi lateral masing-masing lantai arah Y (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield

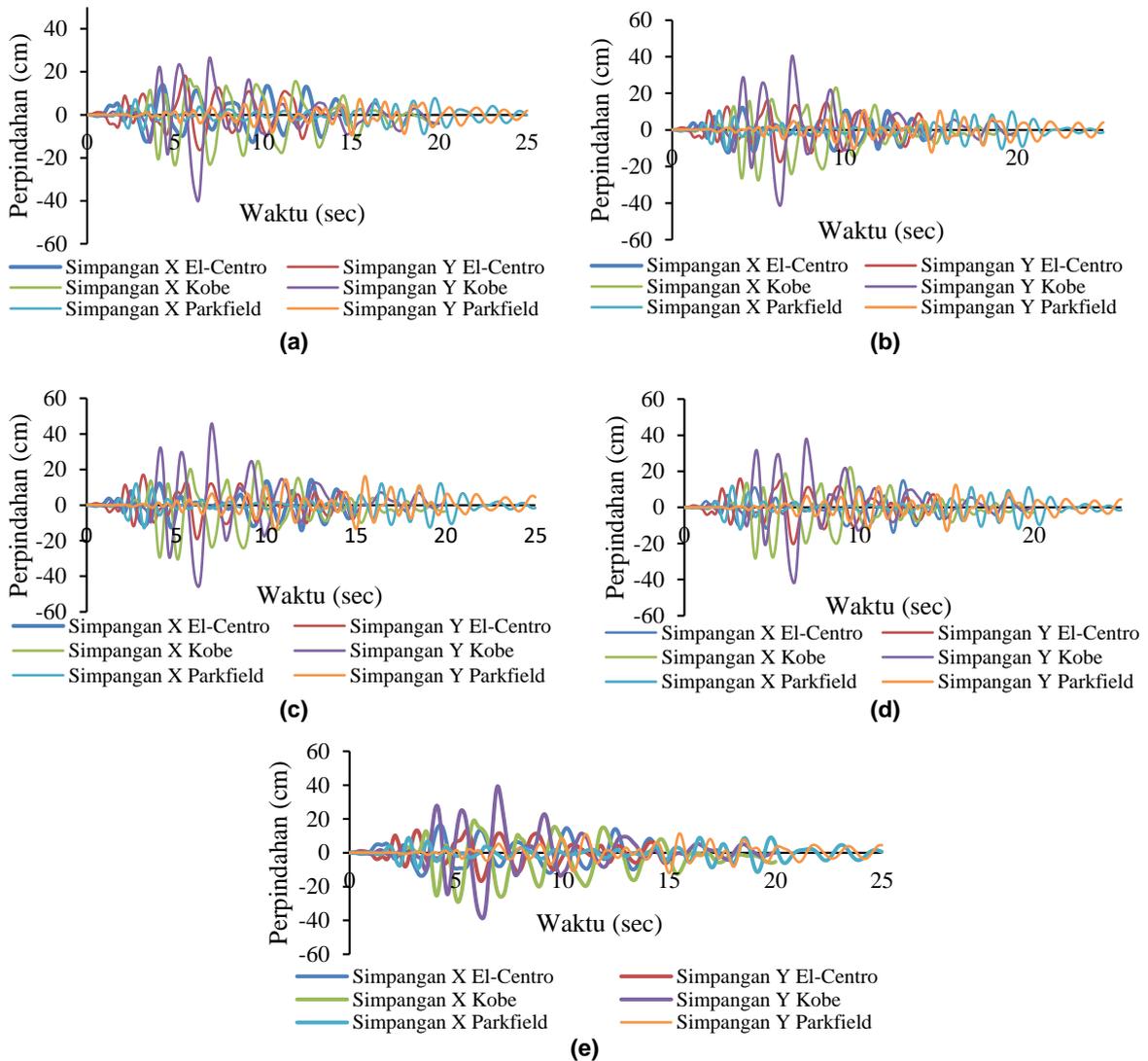
Perpindahan

Perpindahan pada bangunan mengacu pada nilai perpindahan pada struktur bangunan tersebut akibat adanya gaya gempa, dengan diketahui nilai perpindahan maka kita dapat mengetahui jarak maksimal perpindahan dalam sebuah struktur bangunan sehingga dapat melihat nilai perpindahan paling kecil yang terjadi sehingga dapat dilihat desain terbaik dalam memilih bentuk dari struktur bangunan yang akan digunakan. Berdasarkan SNI 1726:2013 (BSN, 2013) perpindahan maksimum total harus menyertakan model yang digetarkan bersamaan oleh 100 persen gerakan tanah di arah kritis dan 30 persen di arah tegak lurus nya, di arah horizontal.

Gambar 7 menampilkan hasil masing-masing model. Perpindahan pada model 1 yang diakibatkan oleh beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield.

Pada arah X gempa El-Centro didapatkan nilai maksimum sebesar 13,93 cm dan pada arah Y nilai maksimum sebesar 18,29 cm.

Pada gempa Kobe arah X nilai maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 16,61 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 26,23 cm. Pada gempa Parkfield arah X didapatkan nilai maksimum sebesar 7,80 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 7,97 cm. Perpindahan pada model 2 yang diakibatkan oleh beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Pada arah X gempa El-Centro didapatkan nilai maksimum sebesar 12,19 cm dan pada arah Y nilai maksimum sebesar 17,10 cm. Pada gempa Kobe arah X nilai maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 24,85 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 40,49 cm. Pada gempa Parkfield arah X didapatkan nilai maksimum sebesar 10,79 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 10,84 cm.



Gambar 7. Hubungan perpindahan dan waktu gempa pada (a) model 1; (b) model 2; (c) model 3; (d) model 4; (e) model 5

Perpindahan pada model 3 yang diakibatkan oleh beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Pada arah X gempa El-Centro didapatkan nilai maksimum sebesar 14,28 cm dan pada arah Y nilai maksimum sebesar 16,03 cm. Pada gempa Kobe arah X nilai maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 23,19 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 45,85 cm. Pada gempa Parkfield arah X didapatkan nilai maksimum sebesar 12,30 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 16,19 cm.

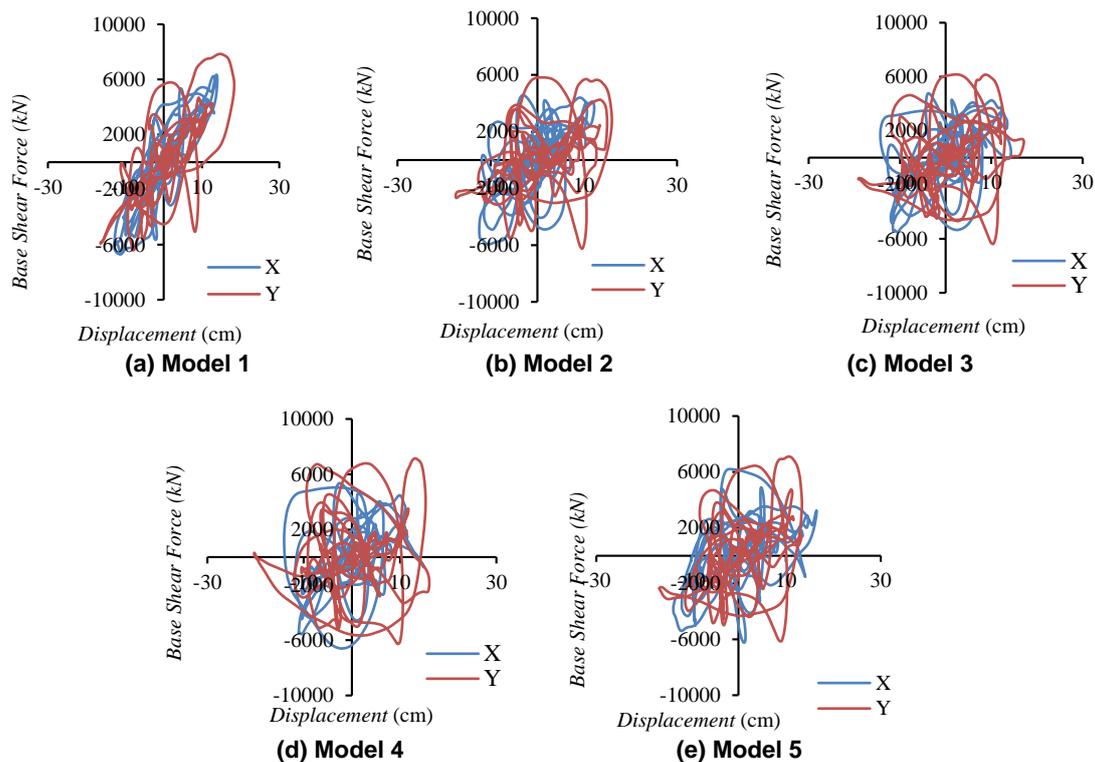
Perpindahan perpindahan pada model 4 yang diakibatkan oleh beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Pada arah X gempa El-Centro didapatkan nilai maksimum sebesar 15,02 cm dan pada arah Y nilai maksimum sebesar 16,04 cm. Pada gempa Kobe arah X nilai maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 22,23 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 38,04 cm. Pada gempa Parkfield arah X didapatkan nilai maksimum sebesar 11,96 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 12,53 cm. Sedangkan perpindahan pada model 5 yang diakibatkan oleh beban gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Pada arah X gempa El-Centro didapatkan nilai maksimum sebesar 16,50 cm dan pada arah Y nilai maksimum sebesar 13,36 cm. Pada gempa Kobe arah X nilai maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 19,22 cm dan pada arah Y didapatkan nilai

maksimum sebesar 39,32 cm. Pada gempa Parkfield arah X didapatkan nilai maksimum sebesar 9,10 cm dan pada arah Y didapatkan nilai maksimum sebesar 11,53 cm.

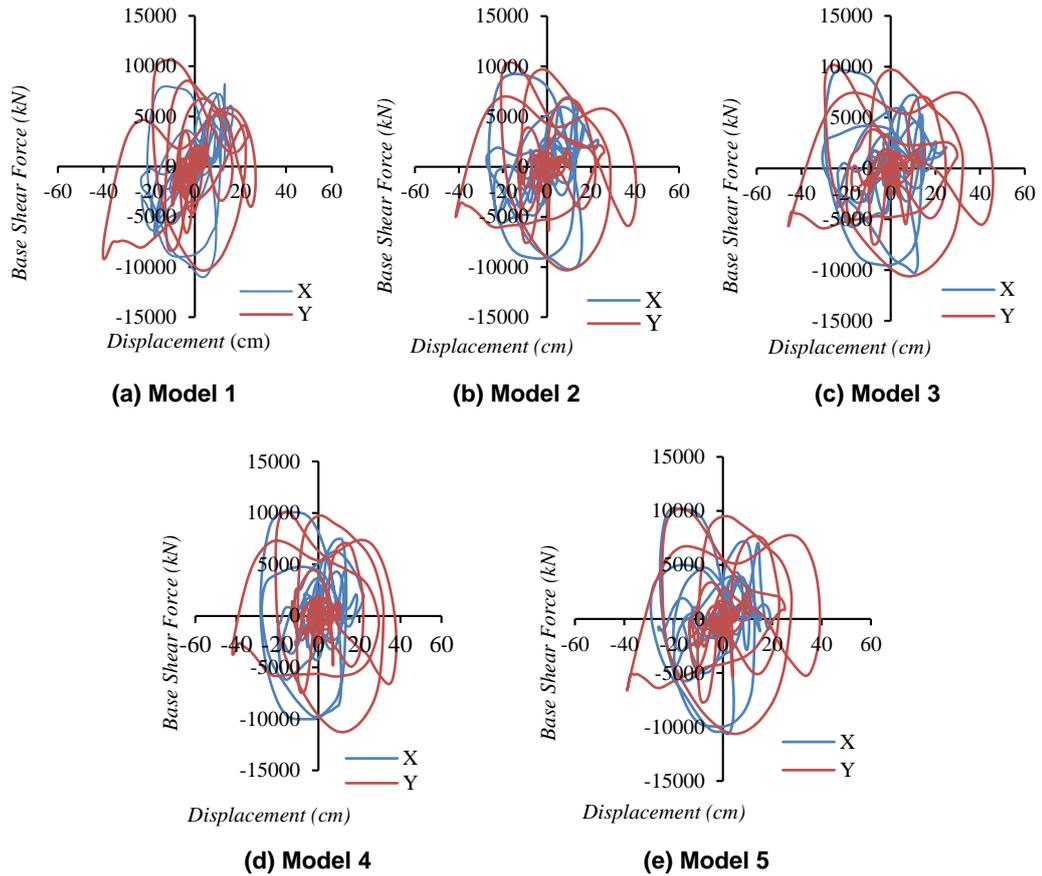
Hubungan gaya geser dengan deformasi

Setiap struktur bangunan akan mengalami perpindahan yang disebabkan oleh beban gempa yang bekerja selama periode waktu gempa tersebut dan pada perpindahan juga terdapat gaya geser dasar yang terjadi ketika struktur tersebut dibebani beban gempa. Bangunan yang memiliki ketidakberaturan vertikal memiliki base shear dan displacement yang berbeda pada setiap model yang dimodelkan, pada Gambar 8 sampai 10 dibawah terlihat bahwa semakin besar base shear yang dihasilkan, maka perpindahan yang dialami suatu bangunan juga semakin besar.

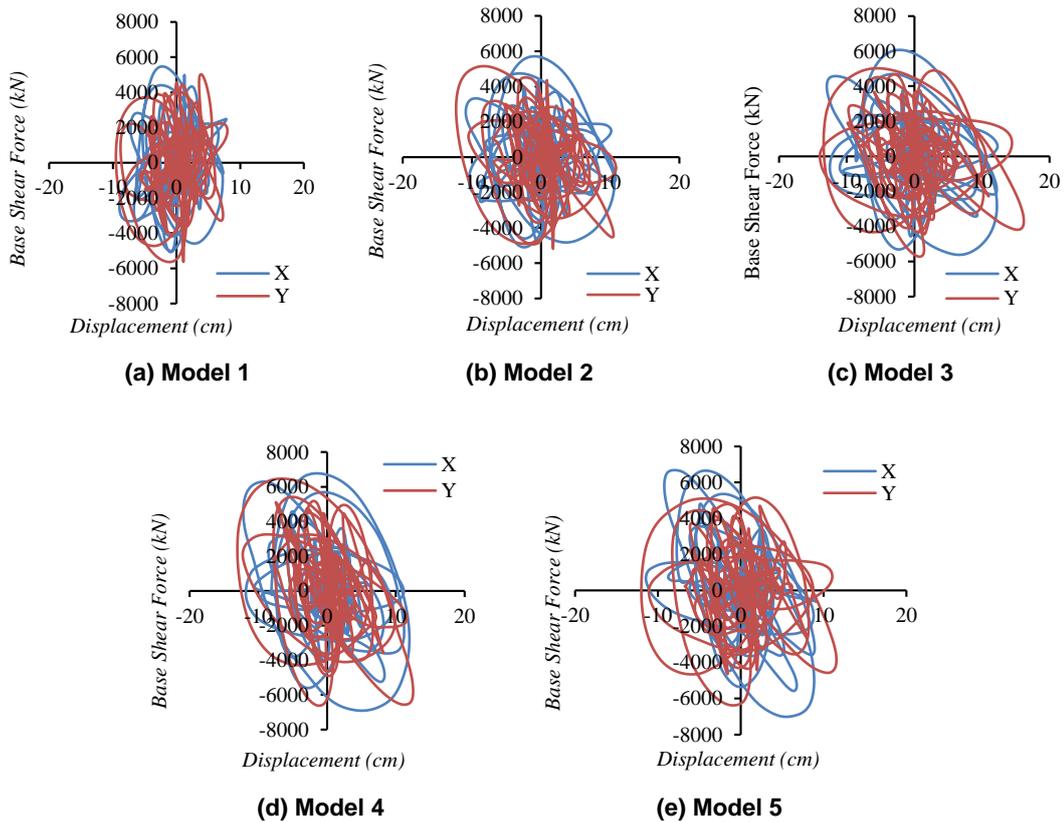
Gambar 8 menunjukkan hasil menggunakan *time history* El-Centro baik arah X maupun arah Y. Model 1 (a) menjelaskan bahwa pada arah X gaya geser lantai sebesar 6660 kN dan perpindahannya sebesar 11,85 cm, sedangkan arah Y gaya geser lantai sebesar 5925 kN dan perpindahannya sebesar 16,37 cm. Pada arah X gaya geser lantai sebesar 5734 kN dan perpindahannya sebesar 13,9 cm, sedangkan arah Y nilai gaya geser lantai sebesar 7149 kN dan perpindahannya sebesar 17,26 cm.



Gambar 8. Hubungan *base shear* dan *displacement* dengan gempa El-Centro



Gambar 9. Hubungan *base shear* dan *displacement* dengan gempa Kobe



Gambar 10. Hubungan *base shear* dan *displacement* dengan gempa Parkfield

Pada Gambar 9 menunjukkan hasil melalui analisis *time history* gempa Kobe. Model 1 (a) menjelaskan bahwa pada arah X gaya geser lantai sebesar 3792 kN dan perpindahannya sebesar 21,18 cm, sedangkan arah Y gaya geser lantai sebesar 9062 kN dan perpindahannya sebesar 39,07 cm. Pada arah X gaya geser lantai sebesar 7922 kN dan perpindahannya sebesar 13,01 cm, sedangkan arah Y nilai gaya geser lantai sebesar 3539 kN dan perpindahannya sebesar 22,93 cm. Pada Gambar 10 menunjukkan hasil yang menggunakan analisis *time history* Parkfield. model 1 (a) menjelaskan bahwa pada arah X gaya geser lantai sebesar 2855 kN dan perpindahannya sebesar 8,85 cm, sedangkan arah Y gaya geser lantai sebesar 3296 kN dan perpindahannya sebesar 7,80 cm. Pada arah X gaya geser lantai sebesar 2485 kN dan perpindahannya sebesar 7,75 cm, sedangkan arah Y nilai gaya geser lantai sebesar 1807 kN dan perpindahannya sebesar 7,97 cm.

Kurva Kapasitas

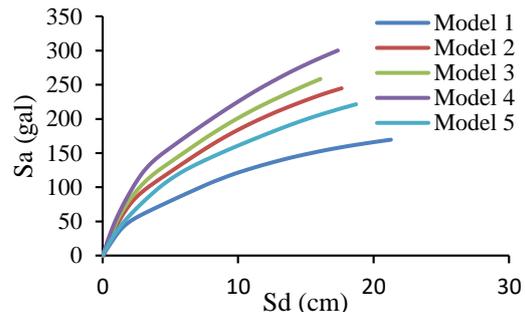
Capacity curve atau kurva kapasitas yang memuat data yang diperoleh dari beban lateral statik yang bekerja pada struktur bangunan dan terus meningkat membentuk kurva sampai batas yang telah ditentukan sebelumnya. Pada nilai kurva kapasitas memiliki nilai deformasi untuk tiap-tiap unsur yang ada pada struktur tersebut. Pada kurva kapasitas memuat angka perpindahan di lantai paling atas dan gaya geser yang terjadi pada lantai paling bawah. Gambar 11 menjelaskan bahwa hasil analisis *capacity curve* terbesar ditunjukkan oleh bangunan model 4 dan *capacity curve* terkecil terdapat pada bangunan model 1.

Drift Ratio

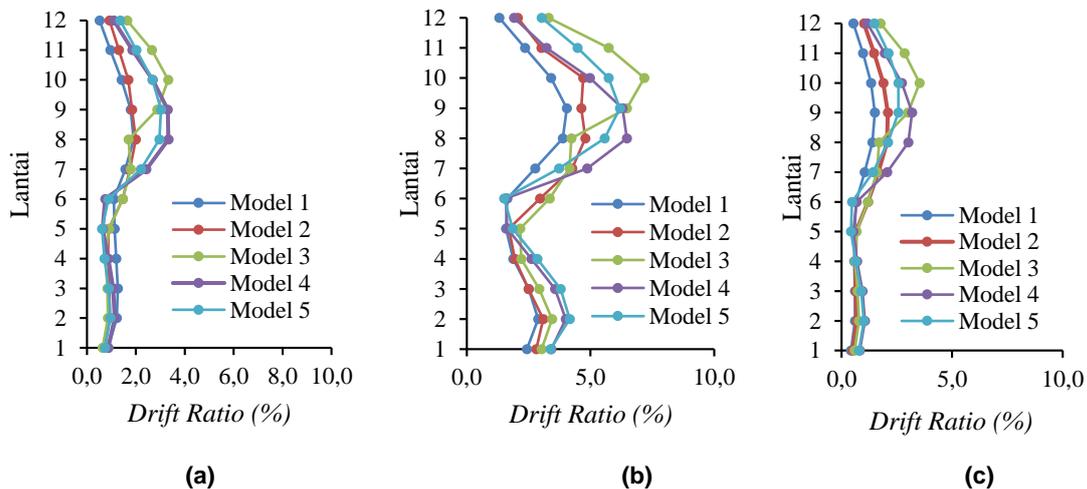
Drift ratio atau simpangan yang terjadi antar lantai pada struktur bangunan merupakan salah satu

parameter yang penting untuk dianalisis, *drift ratio* adalah rasio simpangan yang terjadi pada struktur bangunan ketika struktur bangunan tersebut dibebani oleh beban gempa sehingga rasio simpangan adalah parameter kerusakan yang terjadi pada bangunan tersebut. Pada model yang dianalisis tersebut nilai *drift ratio* tersebut berbeda-beda setiap modelnya. *Drift ratio* yang didapatkan dari STERA 3D ditampilkan pada Gambar 12 untuk arah X dan Gambar 13 untuk arah Y dengan beban gempa El-Centro, Kobe, dan Parkfield.

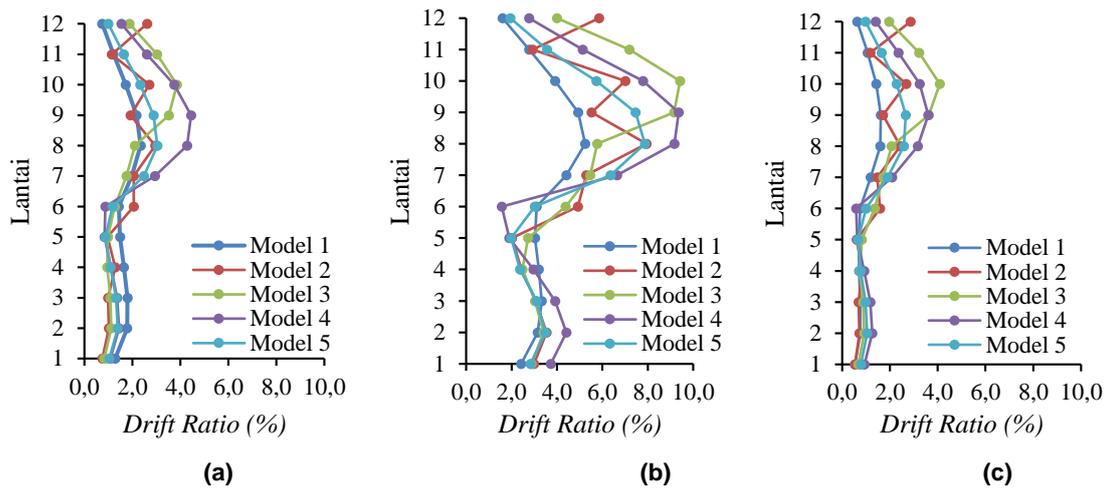
Pada hasil yang ditampilkan dari STERA 3D dapat diketahui nilai maksimal pada gempa El-Centro terdapat pada model 3 di arah X yaitu sebesar 3,32 % dan pada arah Y model 4 dengan besaran *drift ratio* sebesar 4,44 %. Pada gempa Kobe arah X dan Y model 3 memiliki *drift ratio* terbesar yaitu pada arah X sebesar 7,18 % dan pada arah Y sebesar 9,42 %. Pada model yang dibebani oleh gempa Parkfield *drift ratio* pada arah X dan Y model 3 memiliki *drift ratio* terbesar dibanding dari model lainnya yaitu pada arah X sebesar 3,52 % dan pada arah Y sebesar 4,09 %. Hasil analisis *drift ratio* El Centro terbesar arah X terjadi pada model 4 dengan nilai sebesar 3,33% dan terkecil terjadi pada model 1 sebesar 0,52%. *Drift ratio* terbesar pada arah Y dengan nilai sebesar 4,44 % pada model 5 dan terkecil terjadi pada model 5 sebesar 0,98 %.



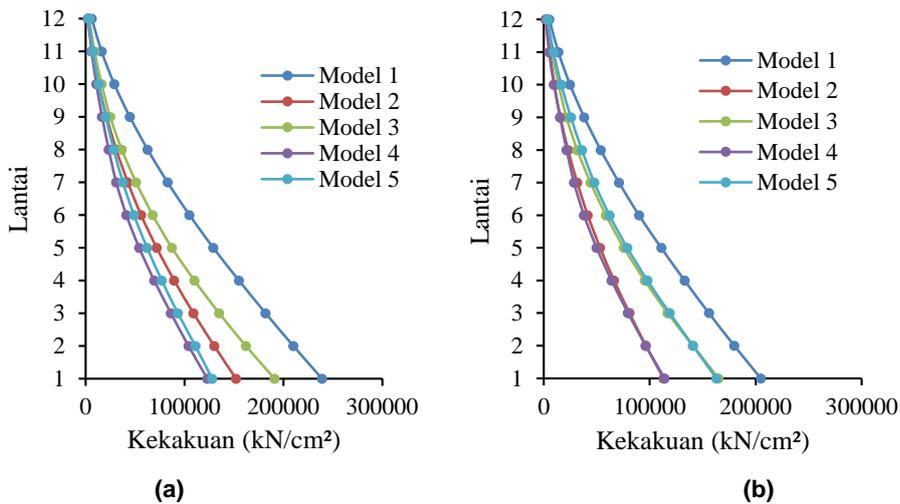
Gambar 11. *Capacity curve* pada masing model



Gambar 12. *Drift ratio* masing-masing lantai arah X (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



Gambar 13. *Drift ratio* masing-masing lantai arah Y (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



Gambar 14. Kekakuan maksimum masing masing model (a) arah X; (b) arah Y

Hasil analisis *drift ratio* Kobe terbesar arah X terjadi pada model 3 dengan nilai sebesar 7,18 % dan terkecil terjadi pada model 1 sebesar 1,35 %. *Drift ratio* terbesar pada arah Y dengan nilai sebesar 9,42% pada model 3 dan terkecil terjadi pada model 4 sebesar 1,57 %. Sedangkan hasil analisis *drift ratio* Parkfield terbesar arah X terjadi pada model 3 dengan nilai sebesar 3,5 % dan terkecil terjadi pada model 1 sebesar 0,53 %. *Drift ratio* terbesar pada arah Y dengan nilai sebesar 4,09% pada model 3 dan terkecil terjadi pada model 5 sebesar 0,97 %.

Kekakuan Struktur

Setiap sturuktur bangunan memiliki nilai kekakuan bangunan yang berbeda-beda, kekakuan adalah sebuah respon dari bangunan yang berdeformasi lebih kecil ketika struktur tersebut diberikan beban gempa, pada pemodelan ini didapatkan nilai kekakuan semakin meningkat seiring bertambahnya lantai pada struktur bangunan. Pada Gambar 14 menjelaskan bahwa kekakuan tetinggi pada lantai

paling bawah dan kekakuan paling rendah terdapat pada lantai paling atas. Kekakuan terbesar terdapat pada model 1 lantai 1 yaitu sebesar 205.000 kN/cm² pada arah Y dan pada arah X sebesar 239.000 kN/cm² yang terdapat pada model 1.

Response Percepatan Maksimum

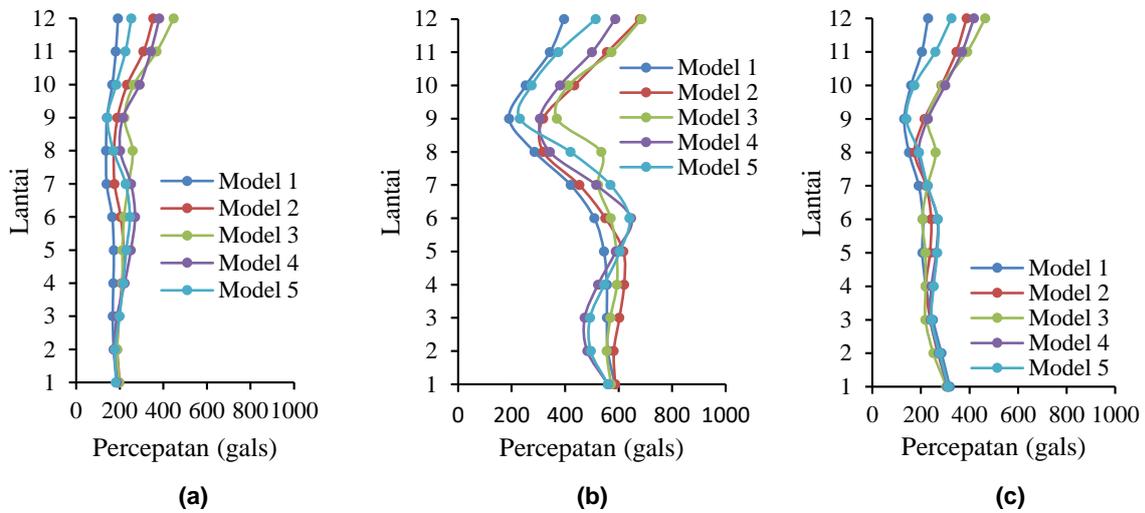
Respon percepatan maksimum adalah respon percepatan dari struktur ketika struktur tersebut dibebani oleh beban gempa, sehingga hasil analisis yang ditampilkan adalah perbandingan antara jumlah lantai dan percepatan setiap lantai yang ada pada struktur tersebut dalam satuan cm/s². Pada Gambar 15 merupakan hasil respon percepatan maksimum arah X dan Gambar 16 adalah hasil percepatan maksimum arah Y. Hasil dari respon percepatan maksimum setiap model dengan beban gempa El-Centro pada arah X dan Y menghasilkan nilai maksimal pada model model 3 yaitu pada arah X sebesar 447,20 cm/s² dan pada arah Y yaitu sebesar 476,30 cm/s². Pada model yang dibebani

oleh gempa Kobe pada arah X dan Y menghasilkan nilai maksimal pada arah X yaitu pada model 3 sebesar 685,70 cm/s² dan pada arah Y hasil maksimal dihasilkan oleh model 1 yaitu sebesar 773,40 cm/s². Pada model yang dibebani oleh beban gempa Parkfield didapatkan nilai maksimal X dan Y yaitu nilai maksimal didapatkan pada model 3 yaitu sebesar 464 cm/s² dan pada arah Y sebesar 478,60 cm/s².

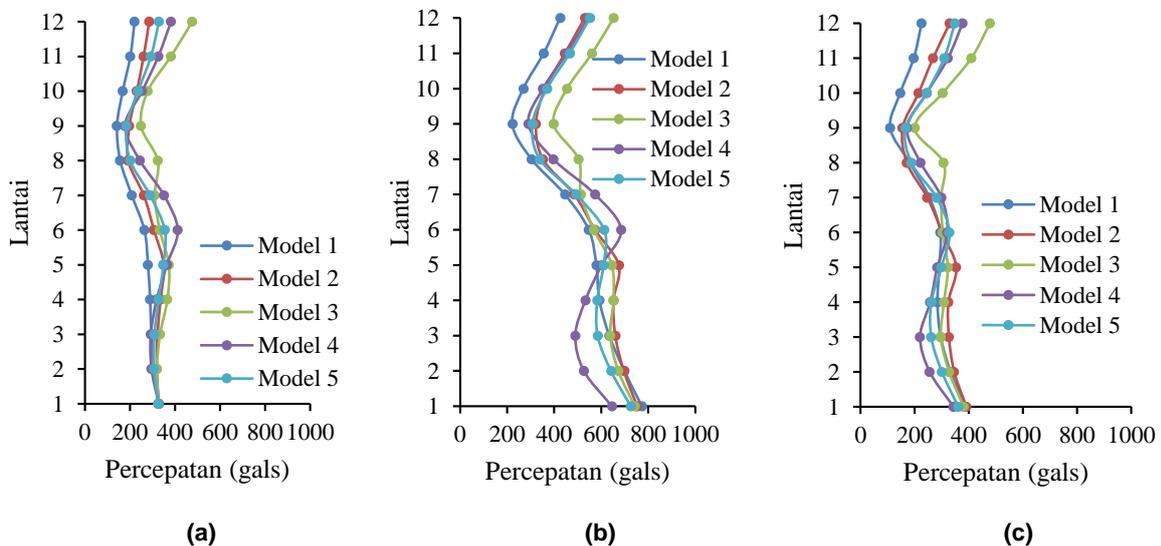
Top Orbit

Top orbit adalah hubungan dari nilai perpindahan arah X dan arah Y pada lantai paling atas sebuah struktur bangunan sehingga dapat diketahui perpindahan maksimal pada lantai paling atas sebuah struktur bangunan. Pada sebuah struktur bangunan jika struktur tersebut mengalami

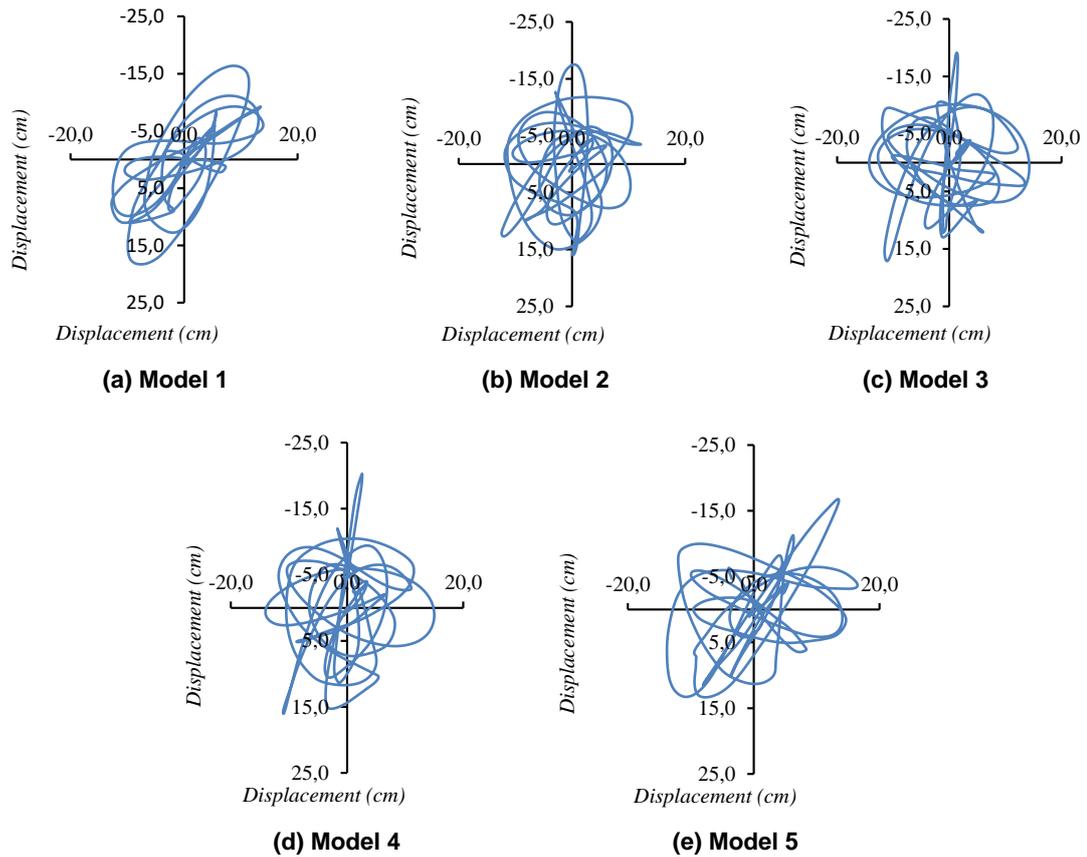
perpindahan yang melampaui batas maka bangunan tersebut berpotensi untuk mengalami keruntuhan ketika dibebani oleh beban gempa, sehingga perpindahan pada lantai paling atas sangat penting untuk diperhitungkan. Gambar 17 pada model (a) menjelaskan bahwa didapatkan hasil pergeseran arah X sebesar 17,64 cm, arah X sebesar 9,31 cm, sedangkan arah Y sebesar 14,77 cm dan arah - Y sebesar 11,23 cm pada gempa El Centro. Gambar 18 pada model (a) menjelaskan bahwa didapatkan hasil pergeseran arah X sebesar 26,55 cm, arah X sebesar 23,15 cm, sedangkan arah Y sebesar 40,22 cm dan arah Y sebesar 12,61 cm pada gempa Kobe. Pada Gambar 19 pada model (a) menjelaskan bahwa didapatkan hasil pergeseran arah X sebesar 8,97 cm, arah X sebesar 5,07cm, sedangkan arah Y sebesar 7,69 cm dan arah Y sebesar 5,21 cm pada gempa Parkfield.



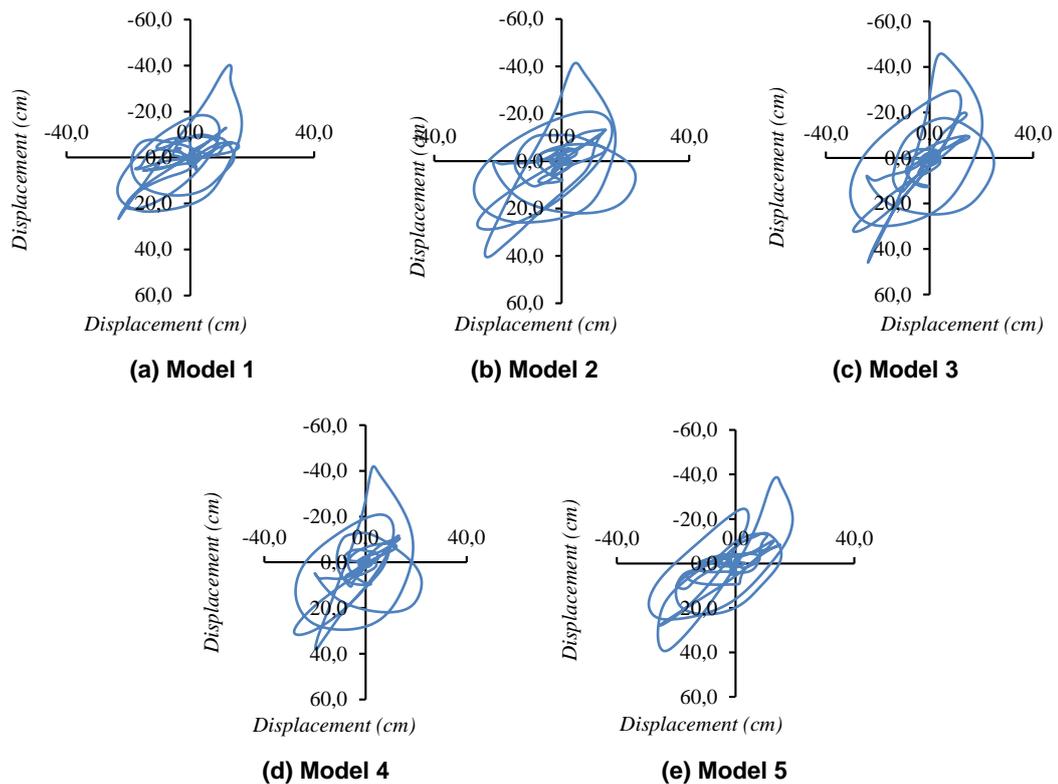
Gambar 15. Response percepatan maksimum masing-masing lantai arah X (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



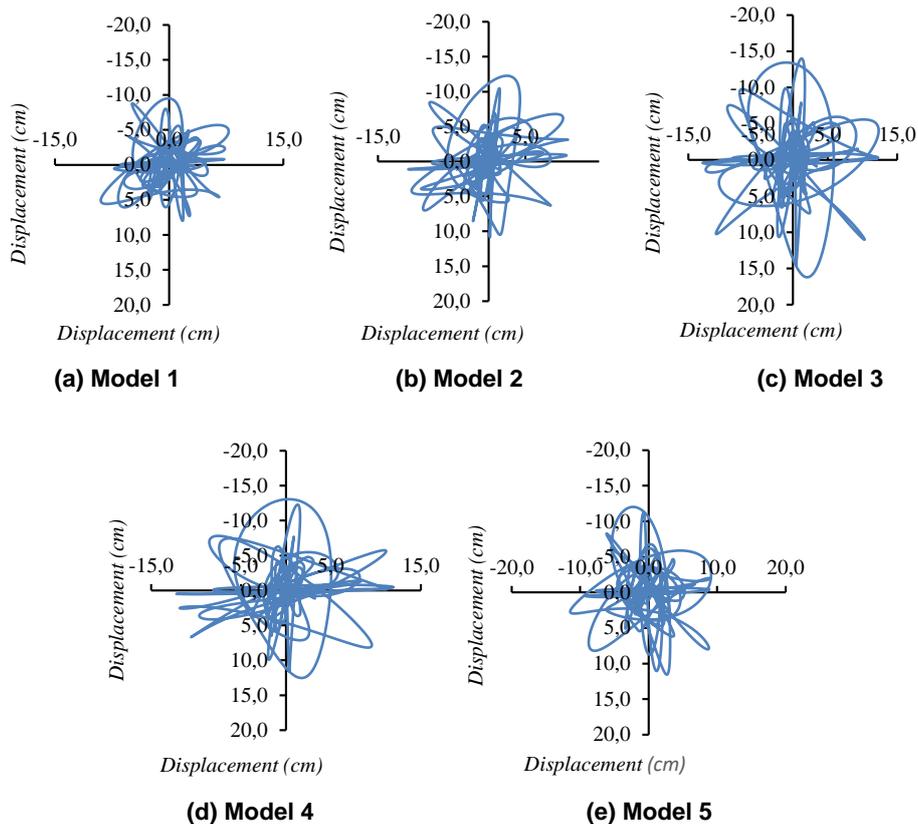
Gambar 16. Response percepatan maksimum lantai arah Y (a) El-Centro; (b) Kobe; (c) Parkfield



Gambar 17. Top orbit dengan gempa El-Centro pada masing-masing model



Gambar 18. Top orbit dengan gempa Kobe pada masing-masing model



Gambar 19. Top orbit dengan gempa Parkfield pada masing-masing model

Kesimpulan

Hasil analisis yang didapatkan dari Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 dan Model 5 dengan menggunakan ketidakberaturan vertikal serta diberikan beban gempa dari Parkfield, Kobe dan El Centro yang dibantu aplikasi STERA 3D diperoleh kesimpulan bahwa deformasi lateral terbesar dengan beban gempa El centro terdapat pada model 4 lantai 12 sebesar 20,31 cm. Kemudian untuk deformasi lateral terbesar dengan beban gempa Kobe ditemukan pada model 3 lantai 12 sebesar 45,90 cm. Deformasi lateral dengan beban gempa Parkfield memiliki nilai terbesar pada model 3 lantai 12 sebesar 16,19 cm. Hasil dari respon percepatan maksimum setiap model dengan beban gempa El-Centro pada arah X dan Y menghasilkan nilai maksimal pada model model 3 yaitu pada arah X sebesar 447,20 cm/s^2 dan pada arah Y yaitu sebesar 476,30 cm/s^2 . Pada model yang dibebani oleh gempa Kobe pada arah X dan Y menghasilkan nilai maksimal pada arah X yaitu pada model 3 sebesar 685,70 cm/s^2 dan pada arah Y hasil maksimal dihasilkan oleh model 1 yaitu sebesar 773,40 cm/s^2 . Pada model yang dibebani oleh beban gempa Parkfield didapatkan nilai maksimal X dan Y yaitu nilai maksimal didapatkan pada model 3 yaitu sebesar 464 cm/s^2 dan pada arah Y sebesar 478,60 cm/s^2 .

Pada model yang dibebani dengan beban gempa El-Centro didapatkan nilai gaya geser terbesar arah X terjadi pada lantai 1 model 1 dengan nilai 6.711 kN dan pada arah Y terjadi pada lantai 1 model 1 sebesar 7.842 kN. Pada model yang dibebani oleh gempa Kobe didapatkan nilai gaya geser terbesar X yang berada pada lantai 2 model 5 yaitu sebesar 11.360 kN dan pada arah Y terjadi pada lantai 2 model 4 yaitu sebesar 11.430 kN. Pada model yang dibebani oleh beban gempa Parkfield didapatkan nilai terbesar pada arah X yang berada pada lantai 1 model 5 sebesar 7.015 kN dan pada arah Y berada pada lantai 1 Model 4 yaitu sebesar 6.619 kN. Pada *capacity curve* diketahui bahwa Model 1 memiliki kapasitas lebih kecil dan model 4 memiliki kapasitas yang paling besar.

Model yang menggunakan gempa El-Centro sebagai beban gempanya dapat dilihat bahwa pada arah X model 5 memiliki perpindahan yang paling besar yaitu sebesar 16,50 cm dan pada arah Y model 1 memiliki perpindahan paling besar yaitu sebesar 18,29 cm. Pada model yang menggunakan Kobe sebagai beban gempanya dapat dilihat bahwa pada arah X model 3 memiliki perpindahan paling besar yaitu sebesar 24,85 cm dan pada arah Y model 3 memiliki perpindahan terbesar yaitu 45,85 cm. Pada model yang menggunakan gempa Parkfield sebagai

beban gempanya dapat dilihat bahwa pada arah X model 3 memiliki perpindahan paling besar yaitu sebesar 12,30 cm dan pada arah Y model 3 memiliki perpindahan paling besar yaitu sebesar 16,19 cm. Struktur bangunan yang lebih efektif ditinjau berdasar dengan nilai yang diperoleh dari analisis berupa, deformasi lateral, *shear force*, respon percepatan maksimum, kekakuan bangunan, *capacity curve* dan *top orbit* terdapat pada model 1.

Daftar Pustaka

- Alecci, V., De Stefano, M., Galassi, S., Lapi, M., & Orlando, M. (2019). Evaluation of the American approach for detecting plan irregularity. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- Azghandi, R. R., Shakin, H., & Zakersalehi, M. (2020). Numerical Simulation of Seismic Collapse Mechanisms of Vertically Irregular Steel High-Rise Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 166, 1-16.
- Badan Standar Nasional (BSN). (2013). *SNI 1727: 2013: Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standar Nasional (BSN). (2017). *SNI 2052: 2017 Baja Tulangan Beton*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standar Nasional (BSN). (2019a). *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standar Nasional (BSN). (2019b). *SNI 2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta, Indonesia.
- Bhosale, A. S., Davis, R., & Sarkar, P. (2017). Vertikal Irregularity of Buildings: Regularity Index Versus Seismic Risk. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A: Civil Engineering*, 3(3), 1-10.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *FEMA 154: Rapid Visual Screening Building for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Applied Technology Council, Washington D.C, United States.
- Haque, M., Ray, S., Chakraborty, A., Elias, M. & Alam, I. (2016). Seismic Performance Analysis of RCC Multi-Storeyed Buildings with Plan Irregularity. *American Journal of Civil Engineering*, 4(2), 52-57.
- Maulana, T. I., Faturrochman, J. N., & Saito, T. (2019). Preliminary Seismic Performance-based Evaluation of Academic Reinforced Concrete Building in Yogyakarta based on Displacement Parameter. In *Third International Conference on Sustainable Innovation 2019–Technology and Engineering (IcoSITE 2019)* (pp. 72-77). Atlantis Press.
- Monika, F., Zega, B. C., Prayuda, H., Cahyati, M. D., & Putra, Y. A. (2020). The Effect of Horizontal Vulnerability on the Stiffness Level of Reinforced Concrete Structure on High Buildings. *Journal of Civil Engineering Forum*, 6(1), 49-60.
- Prayuda, H., Zega, B. C., & Priyosulistyo, H. (2017). Prediction of Allowable Lateral Ground Acceleration (In-Plane Direction) of Confined Masonry Walls Using Ambient Vibration (Microtremor) Analysis. *Procedia Engineering*, 171(2017), 1194-1203.
- Raheem, S. E. A., Ahmed, M. M. M., Ahmed, M. M., & Abdel-shafy, A. G. A. (2018). Evaluation of Plan Configuration Irregularity Effects on Seismic Response Demands of L-Shapes MRF Buildings. *Bulletin Earthquake Engineering*, 16, 3845-3869.
- Saito, T. (2016). Response of High-Rise Buildings under Long Period Earthquake Ground Motions. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 5(4), 308-314.
- Stefano, M. D., Tanganelli, M., & Viti, S. (2014). Variability in Concrete Mechanical Properties as a Source of In-Plan Irregularity for Existing RC Framed Structures. *Engineering Structures*, 59, 161-172.
- Tanjung, J., Maidiawaiti., & Nugroho, F. (2019). Seismic Performance Evaluation of a Multistory RC Building in Padang City. *MATEC Web of Conference*, 258(03018), 1-7.
- Wang, J., Dai, K., Yin, Y., & Tesfamariam, S. (2018). Seismic Performance Based Design and Risk Analysis of Thermal Power Plant Building with Consideration of Vertikal and Mass Irregularities. *Engineering Structures*, 164, 141-154.
- Zega, B. C., Sofianto, M. F., Prayuda, H., & Monika, F. (2020). Study on Non-Engineered Building Vulnerability with Red Brick Masonry Wall Through Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(142026), 1-9.