

Pengaruh Ketidakberaturan Bentuk Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Tinggi Terhadap Perilaku Seismik

Hakas Prayuda *

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Bwawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183 Indonesia, E-mail: hakasprayuda@umy.ac.id

Taufiq Ilham Maulana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Bwawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183 Indonesia, E-mail: taufiq.im@ft.umy.ac.id

Firhan Mahreza Yunanto Putra

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Bwawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183 Indonesia, E-mail: firhan.mahreza.ft17@mail.umy.ac.id

Bella Salsabila

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Bwawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183 Indonesia, E-mail: bella.salsabila.ft17@mail.umy.ac.id

Fadillawaty Saleh

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Bwawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183 Indonesia, E-mail: fadillawaty@umy.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi perilaku bangunan beton bertulang bertingkat tinggi yang memiliki ketidakberaturan bentuk arah vertikal dan horizontal terhadap beban seismik. Ketidakberaturan bentuk bangunan gedung bertingkat tinggi memiliki pengaruh dalam menahan beban gempa. Keterbatasan lahan serta pertimbangan efek estetika menyebabkan seringkali bangunan bertingkat tinggi didesain tanpa mempertimbangkan ketidakberaturan bentuk. Penelitian ini menggunakan bangunan gedung 12 lantai yang didesain dengan dua tipe ketidakberaturan horizontal yaitu berbentuk T dan U. Masing-masing ketidakberaturan horizontal memiliki 5 variasi ketidakberaturan vertikal, sehingga total variasi pada penelitian ini terdiri dari 10 model. Struktur frame di analisis menggunakan software STERA 3D untuk analisis non-linier dinamik riwayat waktu. Tiga data gempa digunakan sebagai variasi beban seismik untuk masing-masing model yaitu data riwayat waktu gempa El-Centro, Kobe dan Parkfield. Perilaku seismik bangunan gedung yang diinvestigasi pada penelitian ini terdiri dari gaya geser, deformasi lateral, kekakuan bangunan, hubungan gaya geser dasar dengan deformasi, drift ratio dan percepatan maksimum. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa setiap model memiliki perilaku yang berbeda-beda ketika diberikan beban seismik dan input kualitas material yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan arah horizontal dan vertikal sangat mempengaruhi perilaku seismik pada bangunan gedung beton bertulang bertingkat tinggi.

Kata-kata Kunci: Ketidakberaturan bangunan, beton bertulang, STERA 3D, perilaku seismik, riwayat waktu.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of high-rise reinforced concrete buildings with irregular shapes in the vertical and horizontal directions. The irregular shape of high-rise buildings has an effect on their ability to withstand earthquake loads. Due to limited area and aesthetic concerns, high-rise buildings are frequently designed without regard for irregular shapes. This study employs a 12-story structure with two different types of horizontal irregularities, namely T and U-shaped. Each horizontal irregularity has five vertical irregularity variations, for a total of ten models in this study. The frame structure was analyzed using the non-linear dynamics time history analysis software STERA 3D. Three earthquake data sets were used to generate seismic load variations for each model: the El-Centro, Kobe, and Parkfield earthquakes. The seismic behavior of the building investigated in this study included shear force, lateral deformation, stiffness of the structure, the relationship between base shear force and deformation, drift ratio, and maximum acceleration. The numerical analysis results indicate that each model behaves differently when subjected to the same seismic load and input material quality. Thus, the irregularity of the horizontal and vertical directions has a significant effect on the seismic behavior of high-rise reinforced concrete buildings.

Keywords: Building irregularities, reinforced concrete, STERA 3D, seismic performance, time history.

* Penulis Korespondensi: hakasprayuda@umy.ac.id

1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang paling berbahaya di dunia. Banyak negara dengan jumlah populasi yang sangat tinggi hidup di wilayah yang memiliki tingkat gempa yang cukup tinggi. Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang disebabkan oleh aktivitas tektonik yang menyebabkan pergerakan lempeng pada lapisan *lithosphere*. Gempa bumi masih belum dapat diprediksi, sehingga seringkali menyebabkan kerusakan bangunan bangunan Gedung maupun infrastruktur umum. Kerusakan yang fatal pada infrastruktur dan bangunan Gedung dapat menyebabkan kematian pada penggunanya. Secara geografi, Indonesia berlokasi di atas zona *ring of fire*, yaitu zona yang dikelilingi tiga lempeng aktif dunia yaitu lempeng Eurasia, lempeng Australi dan lempeng Pasifik. Akibat dari lokasi ini, Indonesia sangat rentan terhadap gempa, bahkan diikuti dengan berbagai bencana lainnya seperti tsunami yang dapat menyebabkan banyak kematian pada manusia (Prayuda, dkk., 2017). Beberapa hasil penelitian lapangan menunjukkan bahwa bangunan Gedung dan rumah sederhana bertingkat rendah memiliki tingkat kerawanan dan kerusakan yang tinggi setelah terjadi gempa di Indonesia (Maidiawati & Sanada, 2008; Idris, dkk., 2022; Pujiyanto, dkk., 2019; Saputra, dkk., 2017). Dari hasil investigasi ini, dapat disimpulkan bahwa banyak faktor yang mempengaruhi terjadinya keruntuhan bangunan Ketika terjadinya gempa, salah satunya akibat dari ketidakberaturan bangunan baik arah horizontal maupun arah vertikal.

Secara umum, metode desain untuk bangunan gedung dengan ketidakberaturan struktur telah di dokumentasikan pada banyak standar di berbagai negara, seperti ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010), Eurocode 8 (CEN, 2004), Canadian National Building Code (NBCC, 2010), serta Standar Nasional Indonesia (BSN, 2019). Beberapa factor yang berkontribusi terhadap kerusakan bangunan juga telah dijelaskan seperti titik seismisitas pada lokasi bangunan, populasi pengguna bangunan, jenis tanah, pengaruh elemen non-struktural, jenis dan fungsi bangunan, jumlah lantai, ketidakberaturan bangunan dan masa layan bangunan (FEMA, 2015). Namun demikian, akibat dari keterbatasan lahan dan improvisasi terhadap tingkat keindahan bangunan, pembangunan arah vertikal merukan salah satu pilihan yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut. Ketidakberaturan bentuk pada arah vertikal seringkali mempengaruhi stabilitas, khususnya Ketika terjadi gempa bumi. Ketidakberaturan arah vertikal dapat menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap kekakuan, kekuatan, massa dan dimensi bangunan yang menyebabkan in-plane diskontinuitas pada struktur (Mwafy & Khalifa, 2017). Oleh sebab itu, perlu dilakukan investigasi mengenai pengaruh dari kombinasi ketidakberaturan dengan pola bangunan yang seringkali digunakan di lapangan, khususnya pada konstruksi bangunan bertingkat tinggi di Indonesia.

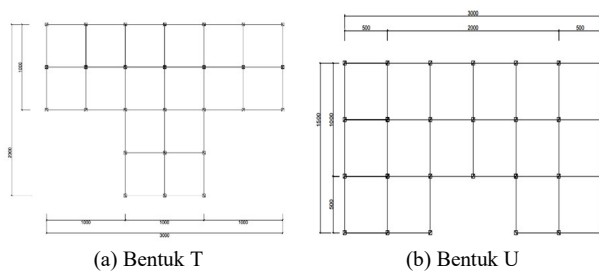
Persaingan pada level estetika bangunan terus mengalami perkembangan diberbagai negara. Terdapat

banyak bangunan dengan menggunakan berbagai jenis material dengan ketidakberaturan bentuk bangunan. Tentunya hal ini menjadi salah satu factor yang harus diperhatikan dalam mempertahankan tingkat resistensi bangunan terhadap gaya gempa. Beberapa penelitian telah ditemukan dengan menganalisis ketidakberaturan vertikal bangunan bertingkat tinggi dengan menggunakan struktur baja (Pirzadeh & Shakib, 2013; Tremblay & Poncet, 2005; Trung, dkk., 2012; Michalis, dkk., 2006; Wang, dkk., 2018). Sementara itu, pada struktur beton juga telah ditemukan beberapa hasil penelitian mengenai pengaruh dari ketidakberaturan vertikal baik untuk bangunan bertingkat tinggi (Rahman & Salik, 2018; Rahman & Shimpale, 2021; Sayyed, dkk., 2017; Shelke & Ansari, 2017; Varadharajan, dkk., 2014), dan juga bangunan bertingkat rendah dengan jumlah lantai dibawah lima lantai (Rana & Raheem, 2015; Akberuddin & Saleemuddin, 2013; Kashkooli & Banan, 2013). Secara umum, hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketidakberaturan bentuk bangunan arah vertikal secara signifikan mempengaruhi respon seismik. Namun demikian, masih terdapat jenis dan tipe ketidakberaturan vertikal yang belum di investigasi dan dipelajari secara lengkap dan sistematis. Selain ketidakberaturan vertikal, ketidakberaturan horizontal juga merupakan salah satu factor yang dapat menyebabkan kerusakan bangunan Ketika terjadi gempa bumi. Beberapa hasil penelitian mengenai ketidakberaturan horizontal pada bangunan beton bertulang juga telah ditemukan (Monika, dkk., 2020; Mathew, dkk., 2016; Alleci, dkk., 2019; Stefano, dkk., 2014; Raheem, dkk., 2018; Haque, dkk., 2016; Azghandi, dkk., 2020). Seluruh hasil penelitian terdahulu menggunakan metode numerik dengan berbagai variasi data gempa. Hasil studi ini menunjukkan Ketika beban seismik diaplikasikan pada bangunan gedung, ketidakberaturan horizontal mempengaruhi kekakuan bangunan. Pada penelitian ini mendiskusikan secara detail factor-faktor yang perlu dipertimbangkan Ketika mengevaluasi perilaku seismik pada bangunan bertingkat tinggi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh dari ketidakberaturan vertikal dan horizontal pada bangunan beton bertulang bertingkat tinggi. Pemeriksaan pada studi ini berupa perilaku seismik struktur menggunakan *software* numerik STERA 3D. *Software* ini dapat menginvestigasi analisis elastis, statik nonlinier lateral, dan siklik nonlinier lateral serta analisis nonlinier respon gempa (Tanjung, dkk., 2019). *Software* numerik ini diperkenalkan oleh profesor Taiki Saito dari Toyohashi University of Technology (Saito, 2017). *Software* ini merupakan *open source* yang dapat digunakan dengan mudah serta merupakan salah satu *software* yang dikhususkan untuk menganalisis perilaku bangunan beton bertulang terhadap beban seismik. Dibandingkan dengan *software* analisis struktur lainnya seperti ETABS dan SAP 2000 yang memerlukan lisensi resmi, tentunya pemilihan penggunaan *software* STERA 3D cukup memudahkan pengguna karena dapat diakses secara percuma. Penelitian mengenai perilaku bangunan bertingkat tinggi dengan durasi gempa yang lama menggunakan *software* STERA 3D ini juga pernah dilakukan

sebelumnya pada tahun 2016 (Saito, 2016). Beberapa studi juga telah melakukan evaluasi mengenai tingkat efektifitas *software* STERA 3D ini dengan berbagai beban seismik untuk bangunan gedung serta dengan berbagai metode analisis (Cao, dkk., 2013; Nabeel, dkk., 2016; Afifuddin, dkk., 2017; Naqi & Saito, 2017; Pavel, dkk., 2018; Maulana, dkk., 2019; Olteanu, dkk., 2016). Selain itu Maulana, dkk., (2021) juga telah melaporkan bahwa hasil analisis menggunakan *software* STERA 3D ini telah divalidasi dengan eksperimental di laboratorium, sehingga *software* ini dapat menghasilkan hasil yang cukup baik untuk perilaku seismik bangunan gedung.

Penelitian ini menginvestigasi ketidakberaturan horizontal bangunan gedung beton bertulang bertingkat tinggi dengan bentuk T dan U. Masing-masing ketidakberaturan horizontal tersebut memiliki lima variasi ketidakberaturan vertikal. Tiga jenis Riwayat gempa digunakan pada penelitian ini yaitu data gempa El-Centro, kobe dan Parkfield. Penelitian ini mengevaluasi perilaku bangunan akibat beban seismik yang terdiri dari gaya geser, deformasi lateral, kekakuan bangunan, hubungan gaya geser dasar dengan deformasi, drift ratio, dan percepatan maksimum. Diharapkan dengan penelitian ini mampu menghasilkan pola kinerja bangunan yang memiliki ketidakberaturan bentuk terhadap beban seismik.

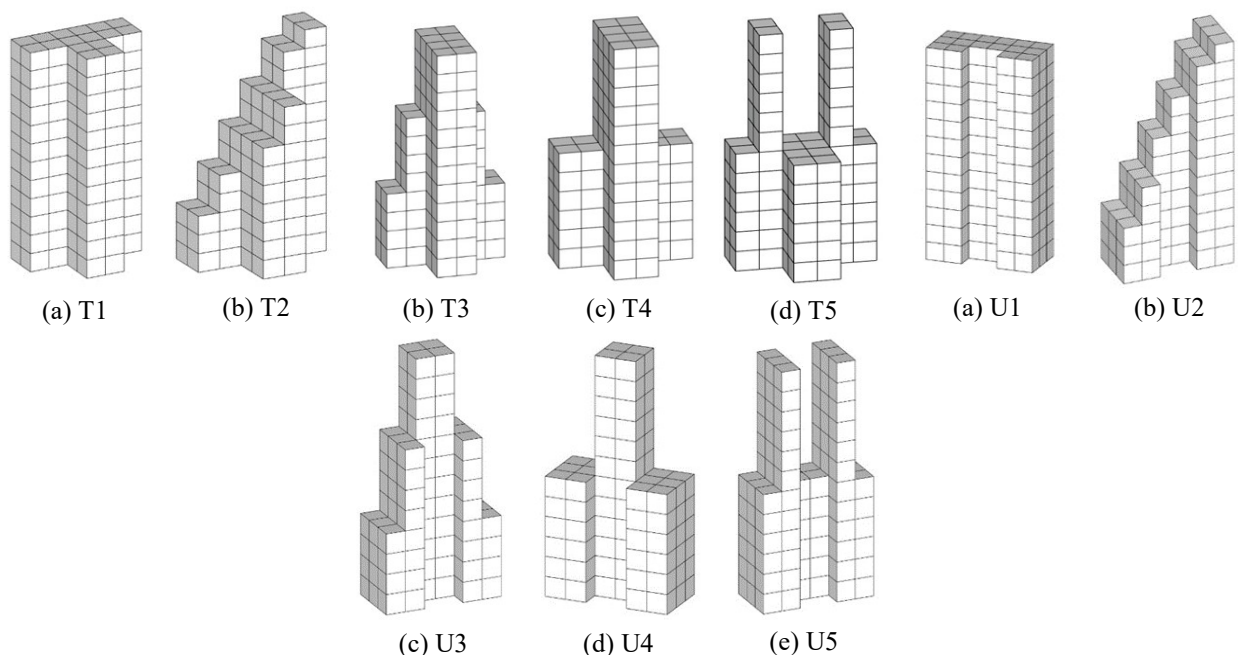


Gambar 1. Variasi ketidakberaturan horizontal

2. Desain dan Metode Analisis

2.1 Desain bangunan

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh dari ketidakberaturan bentuk bangunan beton bertulang pada arah vertikal dan horizontal. **Gambar 1** menampilkan variasi ketidakberaturan horizontal, yaitu berbentuk T dan U. Sedangkan **Gambar 2** menampilkan variasi ketidakberaturan vertikal dari masing-masing ketidakberaturan horizontal. Luas area lantai dasar baik bangunan berbentuk U dan T adalah sama, sedangkan luas area pada lantai lainnya menyesuaikan dengan bentuk ketidakberaturan vertikalnya. Pada penelitian ini berfokus pada struktur frame dimana struktur yang diperhitungkan hanya berupa struktur balok, kolom dan pelat lantai. Informasi mengenai ukuran dan ukuran tulangan baja dapat dilihat pada **Tabel 1** untuk struktur kolom, **Tabel 2** untuk struktur balok dan **Tabel 3** untuk struktur pelat lantai. Data ukuran struktur ini berlaku sama untuk seluruh variasi model. Metode desain pada struktur menggunakan standar yang berlaku di Indonesia, yaitu SNI 1729: 2019 (BSN, 2019a) dan SNI 2874: 2019 (BSN, 2019b). Masing-masing massa setiap lantainya secara otomatis di ukur oleh *software*, sehingga massa struktur untuk setiap lantai tidak perlu dihitung. Sedangkan informasi mengenai kualitas bahan yang digunakan sebagai input di *software* STERA 3D dapat dilihat pada **Tabel 4**. Untuk dimensi dari tulangan baja yang digunakan pada penelitian ini mengacu dari standar yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 2052: 2017 (BSN, 2017). Perlu dicatat bahwa penggunaan kuat tekan beton sebesar 20 MPa untuk balok dan pelat diambil dari mendekati batas minimum dari persyaratan yang telah ditentukan yaitu 21 MPa. Dengan menggunakan batas minimum ini, diharapkan mampu menginvestigasi perilaku bangunan dengan lebih baik. Ketidakberaturan arah vertikal ini diambil dari hasil investigasi dilapangan, yang mana tipe-tipe yang dipilih



Gambar 2. Variasi ketidakberaturan vertikal

merupakan beberapa tipe bangunan yang seringkali ditemukan. Oleh sebab itu, dilakukan peninjauan yang lebih mendetail mengenai beberapa jenis ketidakberaturan vertikal tersebut. Perlu dicatat bahwa tinggi antar lantai pada penelitian ini sebesar 4 m, dengan total tinggi bangunan yaitu 48 m. Adapun posisi kolom dan balok dapat dilihat pada **Gambar 1**, sedangkan pelat lantai menutupi seluruh bagian untuk setiap tingkat nya.

2.2 Data gempa riwayat waktu

Tiga jenis data gempa riwayat waktu digunakan pada penelitian ini terdiri dari El-Centro, Kobe dan Parkfield. Seluruh jenis gempa ini diaplikasikan pada masing-masing struktur, sehingga setiap variasi memiliki tiga hasil sesuai dengan jenis gempa yang digunakan. Setiap data yang digunakan sebagai riwayat waktu beban dinamik memiliki tiga arah yaitu arah X, Y dan Z. Namun demikian, beberapa hasil analisis pada penelitian ini hanya menampilkan hasil jangsan paling besar/maksimal dari ketiga arah gempa yang diaplikasikan. **Gambar 3** menampilkan data riwayat waktu gempa yang digunakan sebagai input di analisis STERA 3D. Ketiga jenis data ini dipilih karena memiliki karakteristik yang relatif sama dengan tipe gempa yang seringkali terjadi di Indonesia. Beberapa hasil penelitian terdahulu juga telah ditemukan menggunakan jenis gempa yang sama ketika mengevaluasi performance bangunan gedung di Indonesia (Masrilayanti, dkk., 2021; Wijaya, dkk., 2019; Setiawan & Nakazawa, 2017; Safarizki, dkk., 2013). Selain beban gempa, terdapat juga perhitungan beban lainnya seberti beban mati, beban hidup dan beban angin yang disesuaikan dengan kegunaan bangunan yaitu sebagai gedung perkantoran. Perhitungan pembebanan pada penelitian ini mengacu pada standar yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 1727:2013 (BSN, 2013). Melalui analisis ini akan mengevaluasi perilaku seismik bangunan gedung yang

Tabel 4. Kualitas material untuk input di STERA 3D

No	Bahan	Mutu
1	Beton untuk kolom	30 MPa
	Beton untuk pelat dan balok	20 MPa
2	Modulus elastisitas untuk kolom	25.743 MPa
	Modulus elastisitas untuk balok dan pelat	23.500 MPa
3	Tegangan tarik untuk tulangan baja	450 MPa

terdiri dari gaya geser, deformasi lateral, kekakuan bangunan, hubungan gaya geser dasar dengan deformasi, drift ratio, dan percepatan maksimum. Sebagai tambahan, Pada memodelan ini hanya memperhitungkan bentuk dari ketidakberaturan vertikal. Sehingga, posisi tangga dan void tidak diperhitungkan, sedangkan komponen non struktur seperti dinding dianggap sebagai beban mati.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Gaya geser

Bangunan dengan ketidakberaturan struktur menghasilkan gaya geser akibat pengaruh gempa yang terdapat arah X dan Y. Gaya geser terbesar selalu terjadi pada lantai dasar, hal tersebut karena lantai dasar merupakan bagian bangunan yang paling dekat dengan permukaan tanah, sehingga memiliki kekuatan gaya geser yang lebih besar. Semakin bertambah berat bangunan, maka gaya geser yang dihasilkan struktur bangunan cenderung akan semakin besar. Peningkatan gaya geser juga akan terjadi apabila frekuensi getaran gempa bumi menurun. Bangunan yang semakin tinggi akan memiliki frekuensi getaran yang rendah, sehingga apabila bangunan diberi beban gempa dengan frekuensi yang rendah menyebabkan struktur bangunan memiliki nilai gaya geser yang tinggi. Gaya geser sendiri dipengaruhi oleh ukuran kolom, ketinggian struktur, dan frekuensi gempa. Gaya geser disalurkan secara vertikal sampai ke tingkat bangunan tertinggi

Tabel 1. Dimensi dan detail tulangan untuk struktur kolom

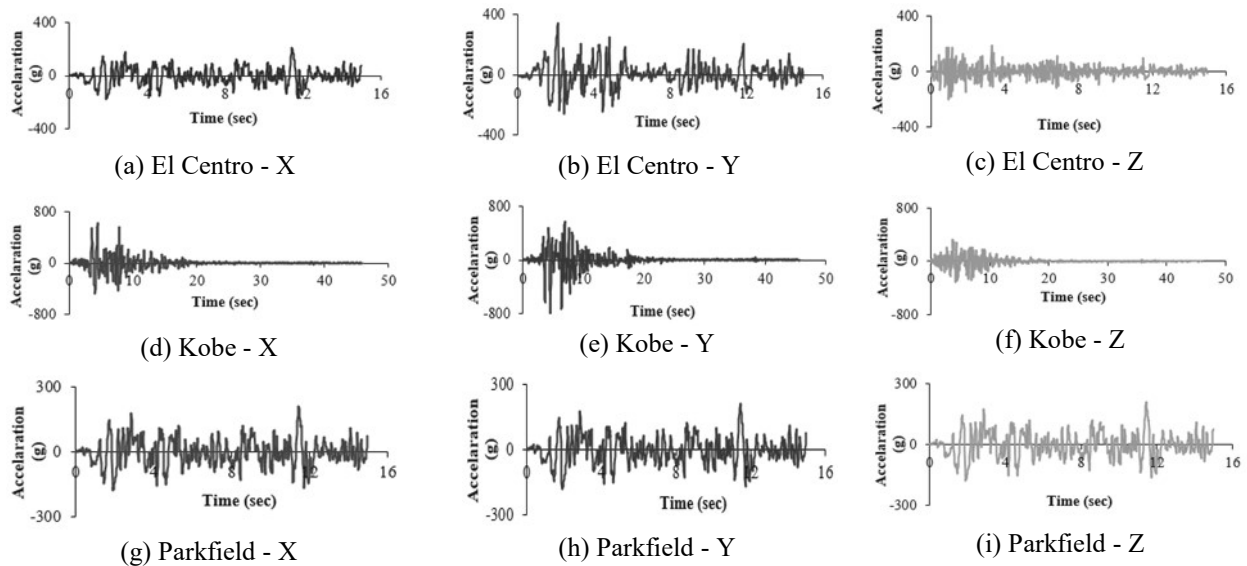
Kolom	Lantai	Dimensi (mm)	Tulangan utama	Tulangan geser	
				Tumpuan (mm)	Tengah bentang (mm)
K1	1-5	850 X 850	28 D25	4 D10-100	4 D10-150
K2	6-12	750 X 750	24 D25	4 D10-100	4D10-150

Tabel 2. Dimensi dan detail tulangan untuk struktur balok

Balok	Lantai	Dimensi (mm)	Tulangan lentur		Tulangan Geser	
			Tekan	Tarik	Tumpuan (mm)	Tengah bentang (mm)
B1	1-5	800 X 400	10 D25	5 D25	3 D13-100	3 D13-150
B3	6-12	600 X 300	7 D25	4 D25	3 D13-100	3 D13-150

Tabel 3. Dimensi dan detail tulangan untuk struktur pelat lantai

Type	Lantai	Ketebalan (mm)	Tulangan tekan dan tarik (mm)
2-way slab	1-5	150	D13-150
2-way slab	6-12	150	D13-100



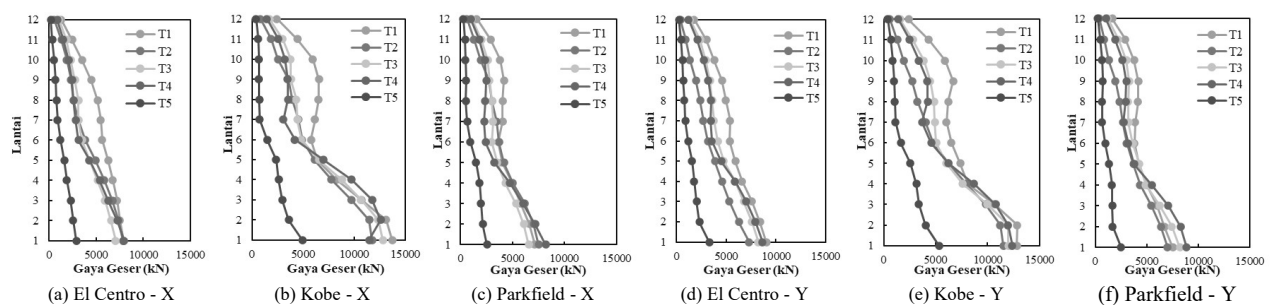
Gambar 3. Data gempa riwayat waktu El Centro, Kobe dan Parkfield

yang menjadi gaya horizontal tingkat yang bekerja pada tiap-tiap tingkatan struktur bangunan. Gaya geser yang ditimbulkan dari struktur bangunan menyebabkan adanya simpangan dan perpindahan pada tiap tingkat. Gaya geser yang dihasilkan oleh tiap-tiap bentuk bangunan tidak beraturan vertikal terdiri dari shear force arah X dan arah Y.

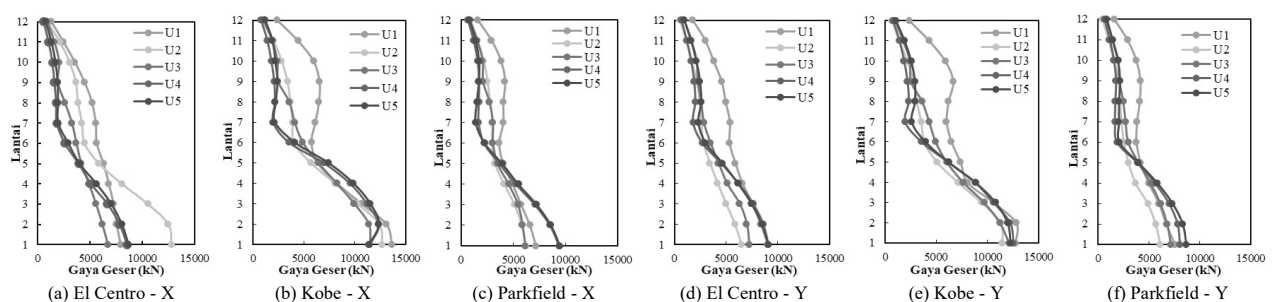
Gambar 4 merupakan hasil analisis gaya geser pada masing-masing bangunan dengan variasi ketidakberaturan vertikal berbentuk T. Sedangkan **Gambar 5** menampilkan hasil gaya geser untuk bangunan dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk U. gaya geser yang ditinjau pada penelitian ini berupa gaya pada arah X dan arah Y. secara umum, hasil analisis menunjukkan gaya geser terbesar selalu terjadi pada

lantai dasar, hal ini sangat sesuai dengan teori yang berlaku. Lantai dasar yang sangat dekat dengan beban gempa menyebabkan hasilnya lebih tinggi dibandingkan gaya geser pada lantai di atasnya. Pada pemampang berbentuk T menunjukkan bahwa gaya geser terkecil selalu dihasilkan pada bangunan T5 baik arah X maupun arah Y pada ketiga jenis data gempa riwayat waktu yang digunakan. Sedangkan pada bangunan lainnya menunjukkan pola gaya geser yang tidak terlalu berbeda pada kedua arah nya.

Hasil simulasi ini menunjukkan pola yang serupa dengan bangunan menggunakan ketidakberaturan berbentuk T, dimana pada lantai dasar menghasilkan gaya geser terbesar dan mengalami penurunan seجا



Gambar 4. Gaya geser maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan T



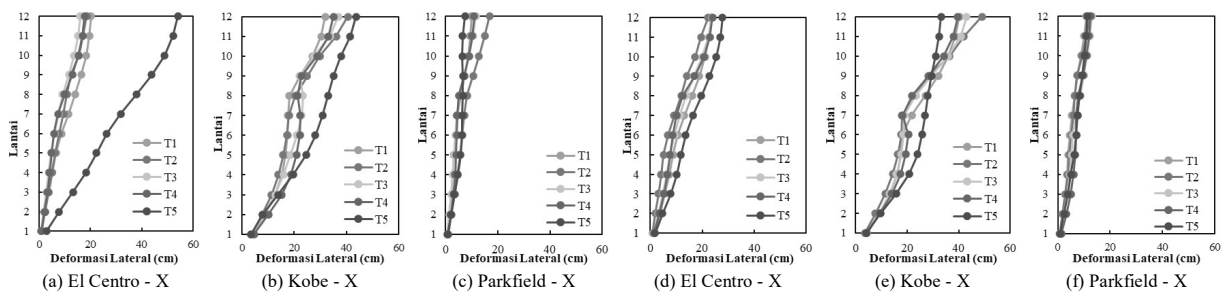
Gambar 5. Gaya geser maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan U

bertambah seiring bertambahnya jumlah lantai bangunan. Dengan menggunakan ketidakberaturan vertikal dan horizontal ini menunjukkan hasil gaya geser yang sangat bervariasi, sehingga dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan sangat mempengaruhi gaya geser yang dihasilkan. Pengaruh dari ketidakberaturan vertikal dapat dilihat juga bahwa selisih gaya geser yang cukup besar terjadi pada lantai 1 sampai dengan lantai 6, sedangkan dari lantai 6 hingga lantai 12 terlihat bahwa gaya geser yang terjadi tidak terlalu signifikan.

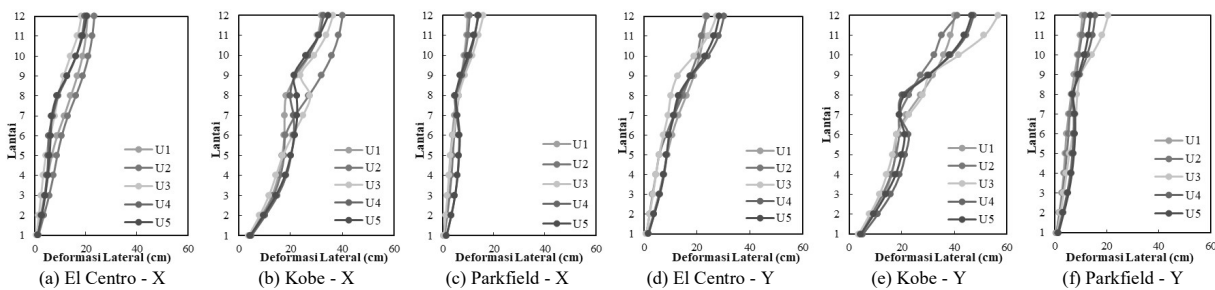
3.2 Deformasi lateral

Deformasi lateral atau *displacement* yang dihasilkan tiap-tiap model bangunan dengan penampang T and U dibagi menjadi dua arah, yaitu X dan Y. Deformasi di setiap lantai memiliki nilai yang berbeda-beda. Jika lantai yang semakin tinggi, maka deformasi lateral juga akan semakin besar. Hal tersebut karena semakin tinggi bangunan, kekakuan suatu struktur bangunan

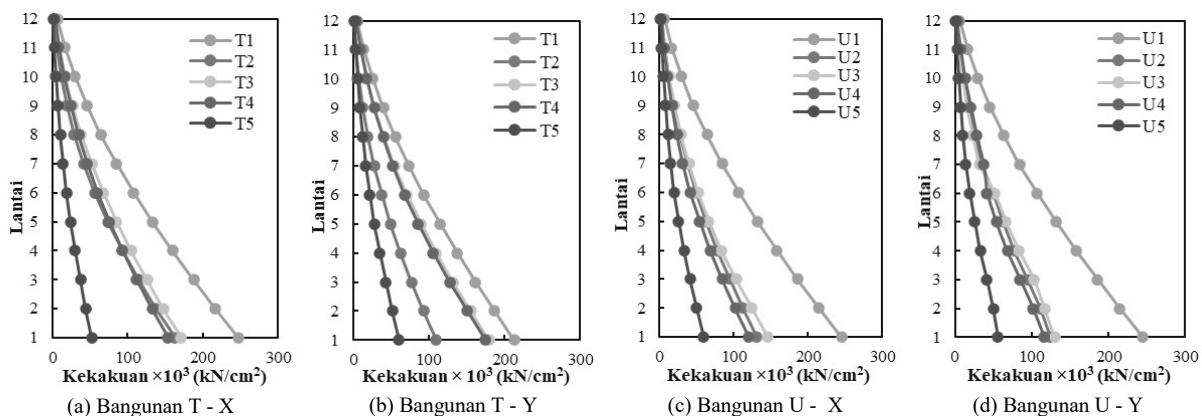
akan terus berkurang sehingga deformasi lateral yang dihasilkan semakin meningkat. **Gambar 6** merupakan hasil deformasi lateral masing-masing lantai untuk arah X dan Y pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk T. Hasil investigasi menunjukkan bahwa semakin bertambah tinggi bangunan, maka deformasi lateral yang terjadi juga mengalami peningkatan. Menariknya, dengan jenis data gempa riwayat waktu yang berbeda, deformasi lateral pada bangunan yang memiliki ketidakberaturan yang sama menghasilkan deformasi lateral yang berbeda. Hal ini dapat disimpulkan bahwa eksistensi gempa juga menjadi salah satu penentu utama terhadap deformasi yang dihasilkan. Pada Gempa El-Centro, deformasi lateral maksimum cenderung dihasilkan pada bangunan T5, sedangkan pada gempa Kobe dan Parkfield menunjukkan bahwa deformasi maksimal pada lantai 12 sangat bervariasi. Ketidakberaturan bangunan arah vertikal memegang peranan penting dalam analisis ini.



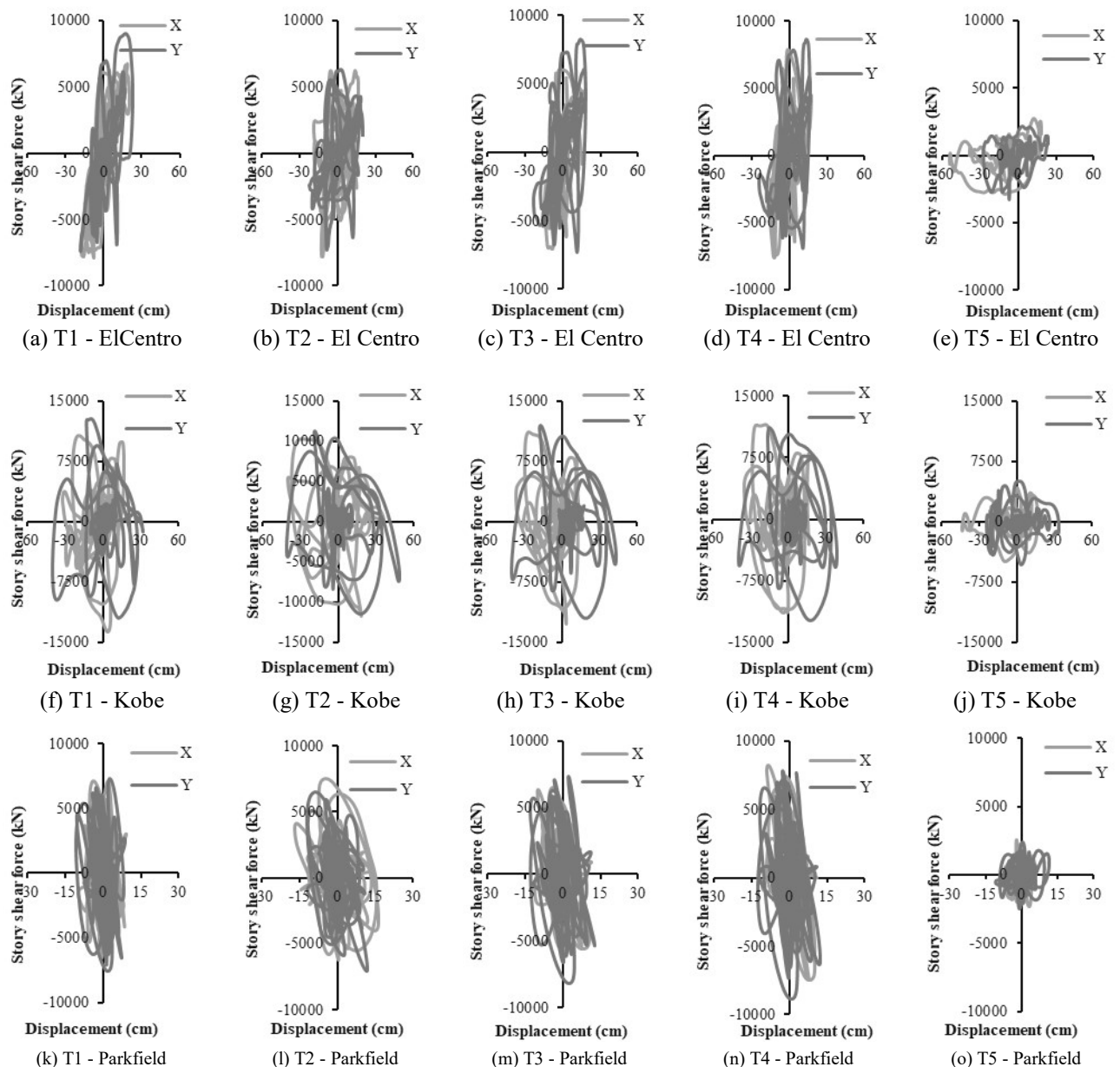
Gambar 6. Deformasi Lateral maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan T



Gambar 7. Deformasi Lateral maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan H



Gambar 8. Kekakuan maksimum tiap lantai pada bangunan T dan U



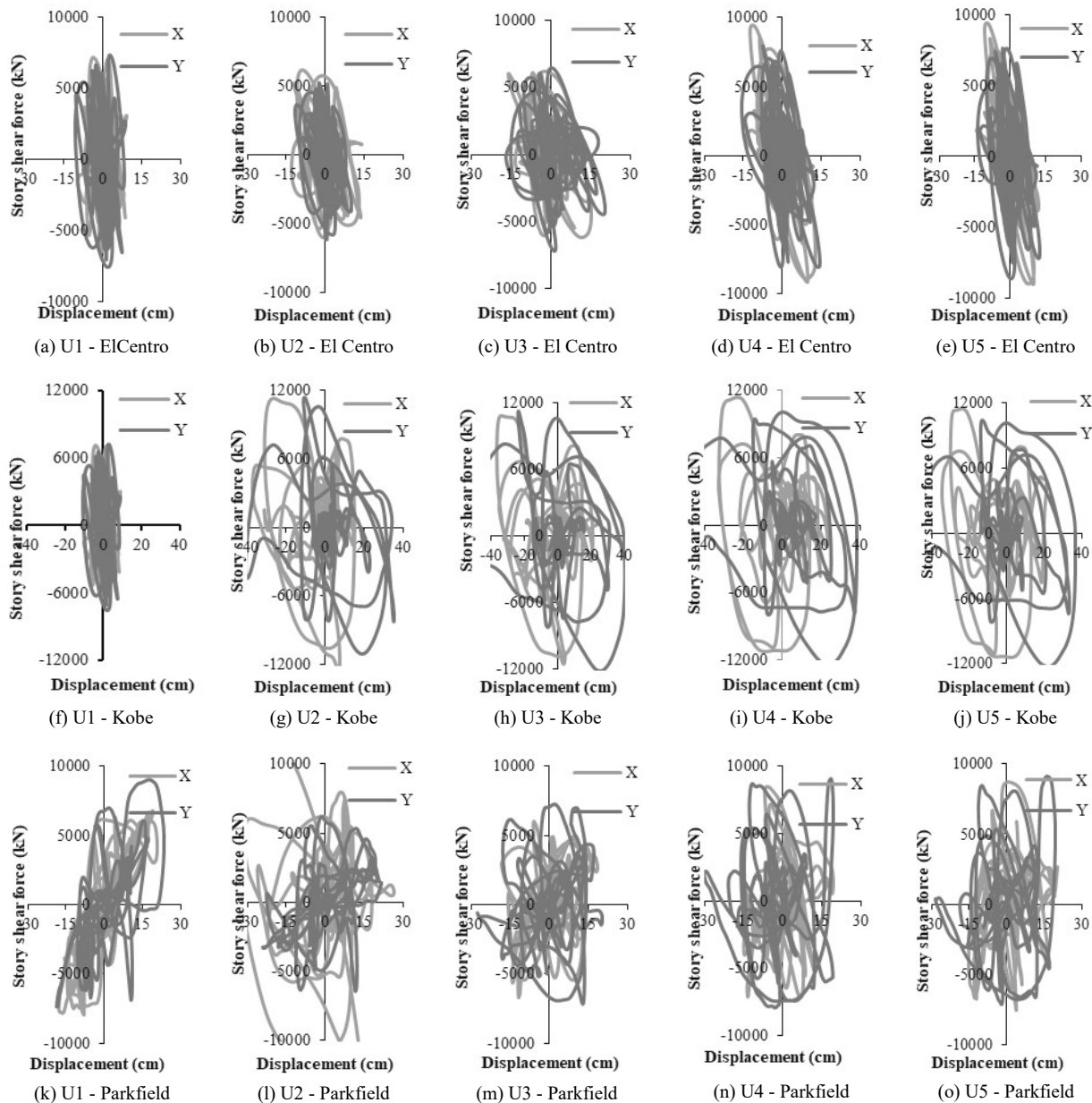
Gambar 9. Hubungan antara gaya gesed dasar dengan deformasi lateral bangunan T

Gambar 7 menampilkan hasil investigasi deformasi lateral pada bangunan beton bertulang dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk U. Hasil analisis ini menunjukkan dengan ketidakberaturan vertikal menghasilkan deformasi yang berbeda-beda meskipun data gempa riwayat waktu yang digunakan sama. Deformasi lateral maksimal pada analisis ini terjadi dengan bangunan yang diberikan beban gempa Kobe, sedangkan dengan gempa El-Centro dan Parkfield cenderung menghasilkan deformasi yang lebih rendah. Dengan data Kobe terlihat bahwa deformasi maksimum dihasilkan pada bangunan U2 pada arah X dan bangunan U3 pada arah Y. Perbedaan deformasi maksimum ini sangat dipengaruhi oleh bentuk bangunan. Hasil analisis deformasi lateral dengan ketidakberaturan horizontal T dan U juga terlihat berbeda, meskipun data gempa yang digunakan adalah sama. Dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan arah vertikal dan horizontal

sangat mempengaruhi deformasi lateral antar lantai bangunan beton bertulang.

3.3 Kekakuan antar lantai

Kekakuan merupakan kemampuan struktur bangunan dalam mempertahankan kedudukannya. Kekakuan masih dikatakan aman apabila simpangan atau perpindahan tidak melampaui batas izin deformasi struktur bangunan. Pada **Gambar 8** merupakan hasil kekakuan arah X dan Y pada masing-masing gedung berbentuk T dan U. dapat disimpulkan bahwa bangunan T5 dan U5 memiliki kekakuan paling rendah, sedangkan bangunan T1 dan U1 memiliki kekakuan paling tinggi. Hal tersebut dipengaruhi oleh ketidakberaturan vertikal. Semakin kompleks tingkat ketidakberaturan bangunan, maka kekakuan yang dihasilkan semakin berkurang juga. Sedangkan hasil



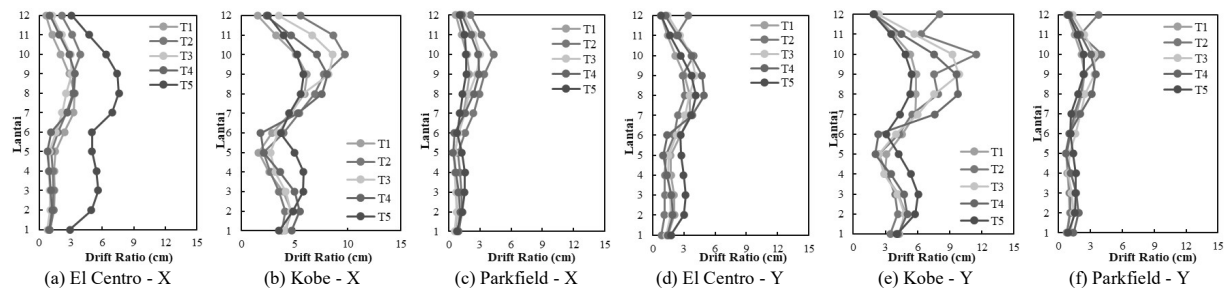
Gambar 10. Hubungan antara gaya gesed dasar dengan deformasi lateral bangunan U

perbandingan penampang U dan T menunjukkan kekakuan yang berbeda, namun tidak terlalu signifikan.

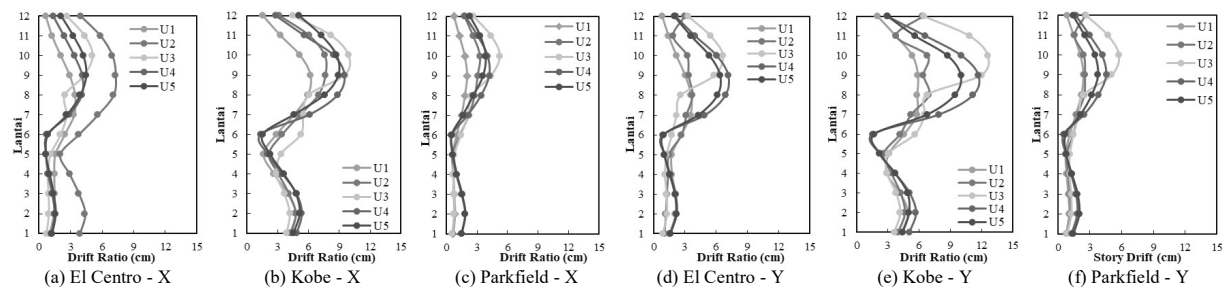
3.4 Hubungan antar gaya geser dasar dengan deformasi maksimum

Hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan pada suatu bangunan dapat terjadi setelah diberikannya beban gempa bumi. Setiap struktur bangunan akan memikul gaya geser dasar ketika menerima beban gempa bumi. *Base shear* yang terjadi pada tiap lantai menjadi fungsi dari kekakuan dan massa dari masing-masing lantai struktur bangunan. *Base shear* membuat lantai bergeser atau mengalami *displacement* sehingga mengalami berubah dari posisi semula. Saat gaya gempa bumi terdistribusikan pada bangunan, bangunan akan merespon dengan diberikannya gaya-gaya dalam.

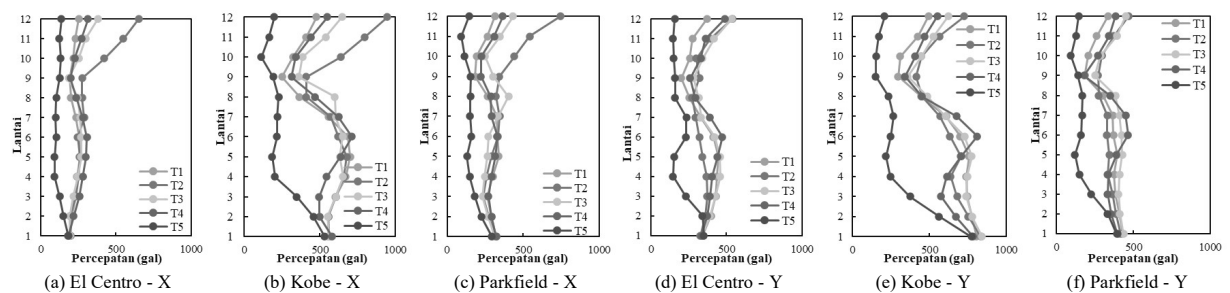
Gaya dalam yang melebihi kapasitas struktur bangunan akan menyebabkan keruntuhan jika bangunan tersebut kurang daktail. **Gambar 9** merupakan hasil hubungan antara gaya geser lantai dasar bangunan dengan displacement pada bagian paling tinggi bangunan untuk arah X dan Y pada masing-masing jenis gempa dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk T. Sedangkan hasil analisis hubungan antara gaya gesed dasar dengan deformasi maksimum pada bangunan berbentuk U dapat dilihat pada **Gambar 10**. Pola hubungan antara gaya geser dengan deformasi lateral maksimum yang dihasilkan pada masing-masing bangunan sangat berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk bangun sangat mempengaruhi pola gaya geser dengan deformasi lateral. Selain itu, jenis gempa juga menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap hubungan antara gaya geser dengan deformasi lateral. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa data



Gambar 11. Drift ratio maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan T



Gambar 12. Drift ratio maksimum tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan H



Gambar 13. Percepatan tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan T

gempa Kobe sangat intens menghasilkan deformasi dan gaya geser tertinggi pada setiap variasi bangunan.

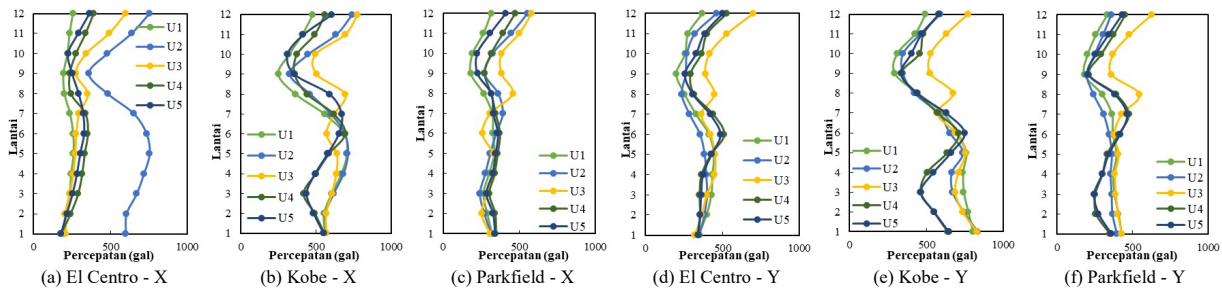
3.5 Drift rasio

Drift ratio merupakan simpangan rasio yang terjadi pada tiap-tiap tingkat bangunan. Beban gempa bumi akan mengakibatkan bangunan mengalami simpangan. Kehancuran struktur bangunan disebabkan oleh adanya simpangan yang tinggi, sehingga bangunan menjadi tidak stabil. Saat gempa bumi terjadi, bangunan akan bergoyang secara bolak-balik dan cepat dengan lantai yang lebih tinggi akan mengalami goyangan yang paling besar. Goyangan atau simpangan ini mengakibatkan kegagalan struktur bangunan karena bangunan menjadi tidak stabil saat gempa bumi. Hasil analisis drift ratio untuk masing-masing model bangunan disajikan dalam bentuk grafik yang berisikan nilai drift ratio arah X dan Y dengan data gempa Parkfield, Kobe, dan El-Centro seperti yang terlihat pada **Gambar 11** untuk bangunan penampang T dan **Gambar 12** untuk bangunan penampang U. Hasil investigasi terlihat bahwa drift ratio yang kecil terjadi pada bangunan dari lantai 1 sampai lantai 6, namun peningkatan drift ratio yang sangat signifikan terjadi pada bangunan dari lantai 6 hingga ke lantai 12. Pola peningkatan drift ratio ini terjadi baik

pada bangunan berbentuk T maupun U. hal ini menunjukkan pengaruh dari ketidakberaturan vertikal terhadap drift ratio yang dihasilkan. Semakin bertambah nilai drift ratio, maka kemungkinan kegagalan struktur terjadi juga semakin meningkat. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan sangat berpotensi sebagai salah satu factor yang menyebabkan kegagalan atau keruntuhan ketika terjadi gempa bumi. Perlu dicatat bahwa drift allowable pada seluruh bangunan pada penelitian ini yaitu sebesar 10 cm. melalui drift allowable ini terlihat bahwa pada bangunan berbentuk T dan U hanya dengan gempa Kobe arah Y menghasilkan drift melebihi batas yang diijinkan (T1, T4, T5, U2, U4, U5).

3.6 Percepatan maksimum

Respon percepatan maksimum terjadi karena adanya suatu percepatan yang dipengaruhi oleh respon setiap lantai struktur gedung tersebut. Bangunan gedung saat mengalami kerusakan struktur bangunan, akan memiliki nilai percepatan yang semakin tinggi yang disebabkan oleh kecilnya rasio antar lantai bangunan tersebut. Bangunan dengan massa yang semakin besar akan memiliki nilai percepatan yang semakin kecil. Percepatan yang dialami oleh struktur bangunan



Gambar 14. Percepatan tiap lantai arah X dan Y untuk bangunan U

bergantung pada besarnya kekuatan gempa bumi, dalamnya pusat gempa, jenis tanah pada suatu lokasi, sistem pondasi yang digunakan, massa bangunan dan geometri, dan lain sebagainya. Hasil analisis dijelaskan melalui grafik percepatan maksimum dengan sumbu X yang menunjukkan percepatan dan sumbu Y yang menunjukkan lantai bangunan. **Gambar 13** menampilkan hasil percepatan maksimum antar lantai pada bangunan berpenampang T sedangkan **Gambar 14** menampilkan hasil percepatan maksimum antar lantai pada bangunan dengan penampang U.

Hasil investigasi pada bangunan penampang T dan U menunjukkan bahwa respon percepatan maksimum yang dihasilkan berbeda-beda sesuai dengan bentuk bangunan dan data gempa riwayat waktu yang digunakan. Namun demikian, secara keseluruhan dapat dilihat bahwa data gempa Kobe cenderung menghasilkan nilai respon percepatan maksimum yang paling besar dibandingkan dengan data gempa El-Centro dan Parkfield. Pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk T sangat jelas terlihat bahwa respon percepatan maksimum terendah selalu dihasilkan bangunan T5 sedangkan percepatan maksimum yang tertinggi selalu dihasilkan bangunan T2 dan T3. Hal serupa juga terjadi pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal berbentuk U, dimana nilai respon percepatan maksimum tertinggi seringkali didominasi oleh bangunan U2 dan U3. Namun demikian, pola yang dihasilkan antara lantai pada penampang T dan U sangat berbeda, menunjukkan bahwa ketidakberaturan horizontal juga memegang peranan penting terhadap hasil dari respon percepatan maksimum. Dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan bangunan baik arah vertikal maupun arah horizontal membutuhkan perhatian yang lebih mendalam dalam proses desain bangunan, khususnya untuk bangunan bertingkat tinggi yang akan dibangun pada Kawasan dengan intensitas gempa yang tinggi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh dari ketidakberaturan bangunan arah vertikal dan horizontal terhadap perilaku seismik bangunan. Adapun beberapa kesimpulan yang dihasilkan pada penelitian ini meliputi sebagai berikut.

1. Ketidakberaturan bangunan baik arah horizontal maupun vertikal sangat mempengaruhi perilaku seismik bangunan gedung, hal ini dapat dilihat dari

hasil investigasi yang sangat bervariasi pada pemeriksaan gaya geser, deformasi lateral, kekakuan bangunan, drift ratio hingga percepatan maksimum.

2. Hasil investigasi gaya geser menunjukkan bahwa nilai tertinggi gaya geser selalu terjadi pada dasar bangunan sedangkan hasil investigasi deformasi lateral menunjukkan bahwa nilai tertinggi selalu terjadi pada bagian atas bangunan. Pada bangunan berbentuk T terlihat bahwa T5 menghasilkan gaya geser terendah, sedangkan pada bangunan berbentuk U terlihat menghasilkan gaya geser yang hampir sama untuk setiap ketidakberaturan vertikalnya.
3. Ketidakberaturan bentuk bangunan juga mempengaruhi kekakuan dari bangunan. Pada penelitian ini menghasilkan bangunan U1 dan T1 dengan kekakuan tertinggi, dimana bangunan ini tidak memiliki ketidakberaturan vertikal. Kekakuan bangunan berkurang seiring bertambahnya tingkat kompleksitas ketidakberaturan bangunan. Sedangkan pada bangunan U5 dan T5 menghasilkan kekakuan terendah.
4. Drift ratio tertinggi dihasilkan pada hasil analisis menggunakan data gempa Kobe. Hasil investigasi menunjukkan bahwa pada bangunan lantai 1 sampai lantai 6 cenderung memiliki nilai drift ratio yang rendah, sedangkan peningkatan drift ratio yang signifikan terjadi pada seluruh bangunan pada lantai 6 hingga lantai 12. Hal tersebut merupakan pengaruh dari ketidakberaturan vertikal bangunan. Limit draft yang dibolehkan yaitu 10 cm, dengan demikian dengan gempa Kobe, beberapa jenis bangunan dengan ketidakberaturan vertikal melebihi limit drift yang diperbolehkan, baik bangunan T maupun U.

Daftar Pustaka

- Afifuddin, M., Panjaitan, M. A. R., Ayuna, D., 2017, *The Behaviour of Reinforced Concrete Structure due to Earthquake Load using Time History Analysis Method*, IOP Conference Series: Earth Environmental Science, Vol. 56, No. 1, pp. 1-9.
- Akberuddin, M. A. M., Saleemuddin, M. Z. M., 2013, *Pushover Analysis of Medium Rise Multy-Story Frame with and Wihtout Vertical Irregularity*,

- International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 540-546.
- Alecci, V., Stefano, M. D., Galassi, S., Lapi, M., Orlando, M., 2019, *Evaluation of the American Approach for Detecting Plan Irregularity*, Advances in Civil Engineering, Vol. 2019, pp. 1-10.
- American Standard for Civil Engineers (ASCE), 2010, *ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Standard for Civil Engineers. The United States.
- Azghandi, R. R., Shakib, H., Zakersalehi, M., 2020, *Numerical Simulation of Seismic Collapse Mechanisms of Vertically Irregular Steel High-Rise Buildings*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 166, pp. 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.
- Cao, M., Motosaka, M., Tsamba, T., Yoshida, K., 2013, *Simulation Analysis of Damaged 9-Story SRC Building During the 2011 Great East Japan Earthquake*, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 45-64.
- Committee European de Normalisation (CEN), 2004, *EN 1998-1, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions, and Rules for Buildings*, European Committee of Standardization, Brussels.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015, *FEMA 154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards of a Handbook*. Applied Technology Council. The United States.
- Haque, M., Ray, M., Chakraborty, A., Elias, M., Alam, I., 2016, *Seismic Performance Analysis of RCC Multi-Storied Buildings with Plan Irregularity*, American Journal of Civil Engineering, Vol. 4, p. No. 2, pp. 52-57.
- Idris, Y., Cummins, P., Rusydy, I., Mukhsin, U., Syamsidik, Habibie, M. Y., Meilianda, E., 2022, *Post-Earthquake Damage Assessment After the 6.5 mw Earthquake on December 7th, 2016, in Pidie Jaya, Indonesia*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 409-426.
- Kashkooli, N. A., Banan, M. R., 2013, *Effect of Frame Irregularity on Accuracy of Modal Equivalent Nonlinear Static Seismic Analysis*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 1064-1072.
- Maidiawati, Sanada, Y., 2008, *Investigation and Analysis of Buildings Damaged During the September 2007 Sumatra, Indonesia Earthquakes*, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 371-378.
- Masrilayanti, Rahmadona, Kurniawan, R., 2021, *Seismic vulnerability assessment of three spans girder bridge in Kuranji - Padang by developing fragility curve*, IOP Conference Series: Earth Environemntal and Science, Vol. 708, No. 1, pp. 1-8.
- Mathew, M., George, S. C., Varghese, G. M., 2016, *Seismic Evaluation of Building with Plan Irregularity*, Applied Mechanic and Materials, Vol. 857, pp. 225-230.
- Michalis, F., Dimitrios, V., Manolis, P., 2006, *Evaluation of the Influence of Vertical Irregularities on the Seismic Performance of Nine-Storey Steel Frame*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 1489-1509.
- Maulana, T. I., Enkhtengis, B., Saito, T., 2021, *Proposal of damage index ratio for low-to mid-rise reinforced concrete moment-resisting frame with setback subjected to uniaxial seismic loading*, Applied Science, Vol. 11, No. 15, pp. 1-16.
- 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*, Advances in Engineering Research, Vol. 187, pp. 72-77.
- 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-Rise Buildings*, Journal of Civil Engineering Forum, Vol. 6, No. 1, pp. 49-60.
- Mwafy, A., & Khalifa, S., 2017, *Effect of Vertical Structural Irregularity on Seismic Design of Tall Buildings*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 26, No. 18, pp. 1-22.
- Nabeel, Y., 2016, *Seismic Analysis of RC Frame with and Without Shear Walls*, International Journal

- of Civil and Structural Engineering, Vol. 6. No. 3, pp. 168-176.
- Naqi, A., Saito, T., 2017, *A Proposal for Seismic Evaluation Index of Mid-rise Existing RC Buildings in Afghanistan*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1892, pp. 1-8.
- National Building Code of Canada (NBCC), 2010, *Institute for Research in Construction*, National Research Council of Canada, Canada.
- Olteanu, P., Coliba, V., Vacareanu, R., Pavel, F., Ciuiu, D., 2016, *Analytical Seismic Fragility Functions for dual RC Structures in Bucharest. The 1940 Vrancea Earthquake*, Issues, Insights and Lesson Learnt, pp. 463-479.
- Pavel, F., Calotescu, I., Stanescu, D., Badju, A., 2018, *Life-Cycle and Seismic Fragility Assessment of Code-Conforming Reinforced Concrete and Steel Structures in Bucharest, Romania*, International Journal of Disaster and Risk Science, Vol. 9, No. 2, pp. 263-274.
- Pirizadeh, M., Shakib, H., 2013, *Probabilistic Seismic Performance Evaluation of Non-Geometric Vertically Irregular Steel Buildings*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 82, pp. 88-98.
- 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, Vol. 171, pp. 1194-1203.
- Pujianto, A., Prayuda, H., Rosyidi, S. A. P., Monika, F., Faizah, R., 2019, *Rapid Visual Screening (RVS) for School Buildings after Earthquake in Lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia*, IOP Conference Series: Materials and Science Engineering, Vol. 650, No. 1, pp. 1-10.
- Raheem, S. E. A., Ahmed, M. M. M., Abdel-shafy, A. G. A., 2018, *Evaluation of Plan Configuration Irregularity Effects on Seismic Response Demand of L-Shaped MRF Buildings*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 16, pp. 3845-3869.
- Rahman, S. A. A., Salik, A. U., 2018, *Seismic Response of Vertically Irregular RC Frame with Mass Irregularity*, International Journal of Recent Scientific Research, Vol. 9, No. 2, pp. 24317-24321.
- Rahman, S. S., Shimpale, P. M., 2021, *Analysis of Effect of Structural Irregularity in Multistorey Building under Seismic Loading*, International Journal of Scientific Development and Research, Vol. 6, No. 2, pp. 275-282.
- Rana, D., Raheem, J., 2015, *Seismic Analysis of Regular and Vertical Geometric Irregular RCC Framed Building*, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 1396-1402.
- Safarizki, H. A., Kristiwan, S. A., Basuki, A., 2013, *Evaluation of the use of steel bracing to improve seismic performance of reinforced concrete building*, Procedia Engineering, Vol. 54, pp. 447-456.
- Saito, T., 2016, *Response of High-Rise Buildings under Long Period Earthquake Ground Motions*, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol. 5, No. 4, pp. 308-314.
- Saito, T., 2017, *Structural Earthquake Response Analysis 3D*, Technical Manual Version 5.8, Toyohashi University of Technology.
- Saputra, A., Rahardianto, T., Revindo, M. D., Delikostidis, I., Hadmoko, D. S., Sartohadi, J., Gomez, C., 2017, *Seismic Vulnerability Assessment of Residential Buildings using Logistic Regression and Geographic Information System (GIS) in Pleret Subdistrict (Yogyakarta, Indonesia)*, Geoenviromental Disasters, Vol. 4, No. 11, pp. 1-33.
- Sayed, O., Kushwah, S. S., Rawat, A., 2017, *Effect of Infill and Mass Irregularity on RC Building under Seismic Loading*, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 176-181.
- Setiawan, S., Nakazawa, S., 2017, *Study on comparison of special moment frame steel structure (SMF) and base isolation special moment frame steel structure (BI-SMF) in Indonesia*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1892, pp. 1-8.
- Shelke, R. N., Ansari, U. S., 2017, *Seismic Analysis of Vertical Irregular RC Building Frames*, International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 155-169.
- 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, Vol. 59, pp. 161-172.
- Tanjung, J., Maidiawati, Nugroho, F., 2019, *Seismic Performance Evaluation of a Multistorey RC Building in Padang City*, MATEC Web Conference, Vol. 258, pp. 03018.
- Tremblay, R., Poncet, L., 2005, *Seismic Performance of Concentrically Braced Steel Frames in Multistorey Buildings with Mass Irregularity*, Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 9, pp. 1363-1375.

- Trung, K. L., Lee, K., Lee, J., Lee, D. H., 2012, *Evaluation of Seismic Behaviour of Steel Spacial Moment Frame Buildings with Vertical Irregularities*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 21, pp. 215-232.
- Varadharajan, S., Sehgal, V. K., Saini, B., 2014, *Seismic Response of Multistory Reinforced Concrete Frame with Vertical Mass and Stiffness Irregularities*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, pp. 362-389.
- Wang, J., Dai, K., Yin, Y., Tesfamariam, S., 2018, *Seismic Performance-Based Design and Risk Analysis of Thermal Power Plant Building with Consideration of Vertical and Mass Irregularities*, Engineering Structures, Vol. 164, pp. 141-154.
- Wijaya, U., Soegiarsa, R., Tavio, 2019, *Sesimic Performance Evaluation of a Base Isolated Building*, International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 288-296.

