

## Pengaruh Variasi Model Ketidakberaturan Vertikal pada Gedung Bertingkat Tinggi terhadap Respons Seismik dengan Analisis Respons Spektrum

Reki Karunia<sup>1</sup>, Baehaki<sup>2</sup>, Woelandari Fathonah<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa  
Jl. Jenderal Sudirman Km. 3 Kota Cilegon – Banten Indonesia  
[rekikarunia10@gmail.com](mailto:rekikarunia10@gmail.com)

### ABSTRAK

Indonesia secara geografis terletak di kawasan cincin api pasifik, sehingga berpotensi terhadap ancaman gempa. Data BMKG menunjukkan adanya peningkatan aktivitas kegempaan dari 7000 kali (tahun 2017) menjadi 11920 kali (tahun 2018), 23 di antaranya menimbulkan kerusakan struktur. Kerusakan struktur dipengaruhi karakteristik gempa, salah satunya adalah frekuensi yang mampu merusak bangunan bertingkat tinggi. Konfigurasi ketidakberaturan pada bangunan bertingkat tinggi juga rentan terhadap kerusakan akibat gempa, terutama ketidakberaturan vertikal. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan respons seismik model-model ketidakberaturan vertikal pada bangunan bertingkat tinggi berdasarkan tinjauan *base shear*, *displacement*, dan *drift*.

Penelitian ini membandingkan 4 variasi model ketidakberaturan vertikal berdasarkan SNI 1726-2012, yaitu model A (tipe 1, 5a), B (tipe 1, 2, 5a), C (tipe 1, 3, 5a), dan D (tipe 1, 4, 5a). Tinjauan-tinjauan respons seismik pada seluruh model dibandingkan terhadap model A. Analisis yang digunakan adalah metode respons spektrum SNI 1726-2012.

Dihasilkan nilai *base shear* untuk arah x dan y sebesar 96,41% dan 96,47% pada model B, 129,45% dan 128,66% pada model C, serta 79,52% dan 80,15% pada model D. Nilai *displacement* untuk arah x dan y sebesar 99,89% dan 99,87% pada model B, 90,52% dan 90,78% pada model C, serta 91,36% dan 89,98% pada model D. Nilai *drift* maksimum untuk arah x dan y sebesar 100,73% dan 100,88% pada model B, 105,24% dan 94,80% pada model C, serta 96,77% dan 98,76% pada model D. Nilai-nilai *drift* tersebut mendekati kinerja batas layannya. Disimpulkan bahwa model D memiliki respons seismik terburuk dikarenakan menghasilkan *base shear* terkecil dan *drift* yang terjadi sangat besar.

**Kata Kunci:** Analisis Respons Spektrum, Bangunan Bertingkat Tinggi, Ketidakberaturan Vertikal, Respons Seismik

### ABSTRACT

Indonesia is geographically located in the Pacific Ring of Fire, which has the potential to pose an earthquake threat. BMKG data shows an increase in seismic activity from 7000 times (in 2017) to 11920 times (in 2018), 23 of which caused structural damage. Structural damage is affected by earthquake characteristics, one of which is the frequency of being able to damage high-rise buildings. The configuration of irregularities in high-rise buildings is also vulnerable to earthquake damage, especially vertical irregularities. This study aims to compare the seismic response of vertical irregularity models in high-rise buildings based on a review of *base shear*, *displacement*, and *drift*.

This study compares 4 variations of the vertical irregularity model based on SNI 1726-2012, namely models A (types 1, 5a), B (types 1, 2, 5a), C (types 1, 3, 5a), and D (types 1, 4, 5a). Reviews of seismic responses in all models compared to model A. The analysis used spectrum response method SNI 1726-2012.

The resulting *base shear* values for the x and y directions were 96,41% and 96,47% in model B, 129,45% and 128,66% in model C, and 79,52% and 80,15% in model D. *Displacement* values for x and y directions were 99,89% and 99,87% in model B, 90,52% and 90,78% in model C, and 91,36% and 89,98% in model D. Maximum *drift* values for x and y directions were 100,73% and 100,88% in

model B, 105,24% and 94,80% in model C, and 96,77% and 98,76% in model D. The drift values are close to the service limit performance. It was concluded that the model D has the worst seismic response because it produced the smallest base shear and the drift that occurs is very large.

**Keywords:** Spectrum Response Analysis, High-Rise Building, Vertical Irregularity, Seismic Response

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia secara geografis terletak pada kawasan cincin api pasifik, sehingga berpotensi tinggi terhadap ancaman gempa bumi. Data BMKG menunjukkan adanya peningkatan aktivitas kegempaan secara signifikan dari 7000 kali pada tahun 2017 menjadi 11920 kali pada tahun 2018, 23 di antaranya menimbulkan kerusakan struktur bangunan [8]. Berdasarkan literatur, kerusakan struktur dipengaruhi oleh karakteristik gempa, salah satunya adalah frekuensi gempa yang dapat menimbulkan kerusakan pada bangunan bertingkat tinggi. Selain frekuensi, konfigurasi bentuk tidak beraturan pada bangunan bertingkat tinggi juga rentan terhadap kerusakan akibat gempa, terutama ketidakberaturan vertikal. [2]

Permasalahan tersebut mendasari tujuan penelitian ini, yaitu untuk membandingkan pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal pada bangunan bertingkat tinggi terhadap respons seismik berdasarkan tinjauan *base shear*, *displacement*, dan *drift*.

### 1.2 Lokasi Model Bangunan

Tanjung Lesung dipilih sebagai lokasi model bangunan dikarenakan memiliki nilai PGA 0,8 – 0,9 g dan merupakan daerah strategis yang dikembangkan sebagai Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) untuk zona pariwisata. [7]

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian ini menggunakan tinjauan dari beberapa peneliti sebelumnya, di antaranya:

Penelitian tentang pengaruh ketinggian bangunan terhadap respons struktur akibat beban gempa pernah diteliti oleh Faizah pada tahun 2015 dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang berjudul “Pengaruh Frekuensi Gempa terhadap Respons Bangunan Bertingkat”. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin rendah frekuensi gempa, maka gaya geser dasar V pada bangunan yang relatif tinggi akan semakin tinggi. [3]

Penelitian tentang pengaruh bentuk bangunan tidak beraturan vertikal tipe 1 terhadap respons struktur akibat beban gempa pernah diteliti oleh Windah pada tahun 2018 dari Universitas Sam Ratulangi Manado yang berjudul “Respons Struktur Gedung Bertingkat dengan Variasi Kekakuan Kolom akibat Gempa berdasarkan SNI 03-1726-2012”. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai simpangan pada tingkat yang memiliki ketidakberaturan tingkat lunak setidaknya 2 kali lebih besar dibandingkan dengan simpangan pada model struktur eksisting. [11]

Penelitian tentang pengaruh bentuk bangunan yang tidak beraturan vertikal tipe 2 dan tipe 3 terhadap respons struktur akibat beban gempa pernah diteliti oleh Shah pada tahun 2017 dari *Navrachana University*, Vadodara, India yang berjudul “*Effects of Vertical Geometric and Mass Irregularities in Structure*”. Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat dengan

konfigurasi ketidakberaturan massa dan geometri vertikal memiliki respons yang lebih buruk dibandingkan struktur beraturan, nilai simpangan yang terjadi sangat besar. [10]

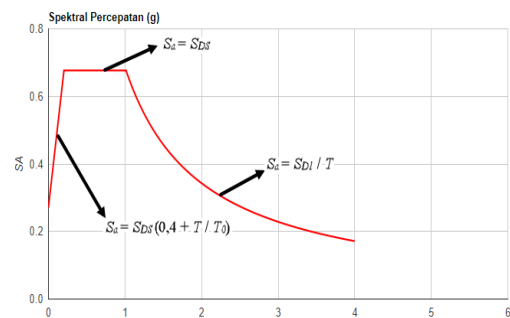
Penelitian tentang pengaruh bentuk bangunan yang tidak beraturan vertikal tipe 4 terhadap respons struktur akibat beban gempa pernah diteliti oleh Manasa pada tahun 2017 dari *Dr. Ambedkar Institute of Technology* (Dr. AIT), Karnataka, India yang berjudul “*Study on Dynamic Behaviour of High Riser In-Plane Discontinuity in Vertical Element Lateral Loads*”. Respons yang dihasilkan menunjukkan geser dasar pada struktur yang terkonfigurasi ketidakberaturan ini memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan struktur beraturan. [6]

Penelitian tentang pengaruh bentuk bangunan yang tidak beraturan vertikal tipe 5 terhadap respons struktur akibat beban gempa pernah diteliti oleh Ozbasaran pada tahun 2010 dari *Ekisehir Osmangazi University*, Ekisehir, Turkey yang berjudul “*Failure of Weak Storey during Earthquakes*”. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh dari ketidakberaturan ini akan meningkatkan nilai simpangan antar lantai. [5]

### 3. LANDASAN TEORI

#### 3.1 Beban Gempa Rencana

Respons spektrum rencana dalam perhitungan beban gempa dibuat dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dengan redaman (*damping ratio*) 5%. Respons spektrum berdasarkan SNI 1726-2012 dihasilkan berdasarkan nilai percepatan batuan dasar pada periode pendek,  $S_s$ , dan periode 1 detik,  $S_l$ , serta klasifikasi situs tanah. [1]



**Gambar 1.** Respons spektrum daerah Tanjung Lesung dengan klasifikasi situs tanah lunak  
Sumber: Hasil analisis, 2019

Percepatan batuan dasar pada periode pendek,  $S_s$ , dan periode 1 detik,  $S_l$  pada daerah Tanjung Lesung berdasarkan Aplikasi Desain Spektra Indonesia 2011 Puskim memiliki nilai masing-masing  $S_s = 1,128 g$  dan  $S_l = 0,429 g$ . Klasifikasi situs tanah diambil pada kondisi paling kritis, yaitu tanah lunak. Respons spektrum yang terbentuk seperti diperlihatkan pada gambar 1. [9]

#### 3.2 Ketidakberaturan Vertikal

Tipe ketidakberaturan vertikal berdasarkan SNI 1726-2012 terbagi menjadi 7 macam, yaitu:

- Tipe 1A (ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak), didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya. [1]
- Tipe 1B (ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan), didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 60% kekakuan lateral tingkat di atasnya. [1]
- Tipe 2 (ketidakberaturan massa), didefinisikan ada jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150% massa efektif tingkat di dekatnya. [1]
- Tipe 3 (ketidakberaturan geometri vertikal), didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem penahan gaya seismik di semua tingkat lebih dari 130%

dimensi horizontal sistem penahan gaya seismik tingkat di dekatnya. [1]

- e. Tipe 4 (diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya lateral), didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen penahan gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen penahan di tingkat di bawahnya. [1]
- f. Tipe 5A (diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat), didefinisikan ada, jika kuat lateral tingkat kurang dari 80% kuat lateral tingkat di atasnya. [1]
- g. Tipe 5B (diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat berlebihan), didefinisikan ada, jika kuat lateral tingkat kurang dari 80% kuat lateral tingkat di atasnya. [1]

### 3.3 Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur dihitung menggunakan persamaan: [1]

$$T_a = C_t \times h_n^x \tag{1}$$

Keterangan:

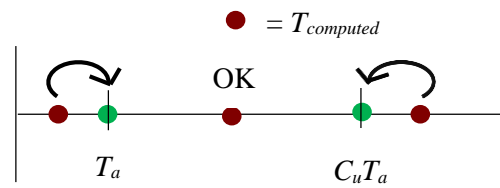
$T_a$  = Periode fundamental pendekatan (s)

$C_t$  = Parameter waktu

$x$  = Parameter ketinggian

$h_n$  = Ketinggian total struktur, pada kasus ini ketinggian model adalah 62 m

Batas atas periode fundamental struktur adalah hasil perhitungan  $T_a$  dikalikan dengan parameter  $C_U$ , namun tidak perlu lebih kecil dari periode fundamental struktur hasil analisis komputer,  $T_c$ , dalam kondisi momen inersia tidak direduksi (*gross*). Analisis periode dilakukan dengan titik kontrol di bawah ini. [4]



Gambar 2. Analisis periode fundamental struktur

Sumber: FEMA 451B, 2007

Keterangan gambar:

$T_{computed}$  = Periode fundamental hasil analisis komputer dengan kondisi momen inersia direduksi

### 3.4 Respons Seismik Struktur

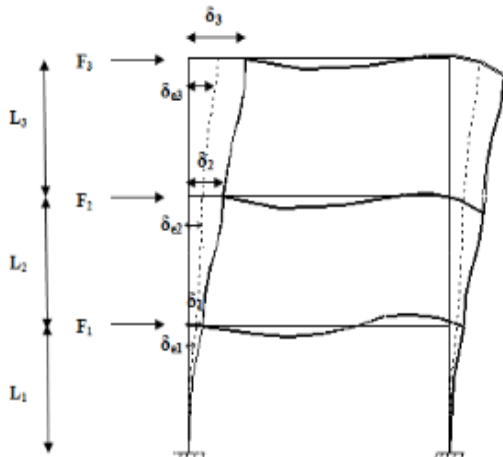
Respons seismik yang ditinjau pada struktur, antara lain:

- a. Geser dasar (*base shear*)

Metode analisis respons spektrum harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing-masing arah orthogonal yang ditinjau. [1]

Parameter respons struktur yang diinputkan ke dalam pemodelan harus sesuai dengan sistem struktur yang sesuai. Sistem struktur yang digunakan adalah Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) pada gedung beton bertulang, sehingga nilai-nilai parameter responsnya berturut-turut adalah 8 untuk koefisien modifikasi respons ( $R$ ), 5,5 untuk faktor amplifikasi defleksi ( $C_d$ ), dan 3 untuk faktor kuat lebih sistem ( $\Omega$ ). [1]

- b. Perpindahan lateral



**Gambar 3.** Perhitungan perpindahan lateral dan simpangan antar lantai tingkat  
 Sumber: SNI 1726-2012, 2012

Perpindahan lateral pada pusat massa di tingkat  $x$ ,  $\delta_x$ , dalam mm, harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut: [1]

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (2)$$

Keterangan:

- $\delta_x$  = Defleksi pusat massa
- $C_d$  = Faktor amplifikasi defleksi
- $I_e$  = Nilai faktor keutamaan gempa
- $\delta_{xe}$  = Defleksi yang ditentukan dengan analisis elastis (mm)

c. Simpangan antar lantai tingkat  
 Simpangan antar lantai tingkat desain di tingkat  $x$ ,  $\Delta_x$ , dalam mm, harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut: [1]

$$\Delta_x = \delta_x - \delta_{x-1} \quad (3)$$

### 3.5 Kekakuan Lateral Tingkat

Kekakuan lateral tingkat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini. [4]

$$K = \frac{V}{\Delta} \quad (4)$$

Keterangan:

- $K$  = Kekakuan lateral tingkat (N/mm)
- $V$  = Geser tingkat (N)
- $\Delta$  = Simpangan antar tingkat (mm)

## 4. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Tahapan Penelitian

- a. Identifikasi masalah penelitian  
 Melakukan studi tentang permasalahan pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap respons seismik gedung tinggi dengan metode analisis respons spektrum.
- b. Studi pustaka  
 Studi pustaka bersumber kepada artikel ilmiah, jurnal penelitian, dan buku yang terkait dengan rumusan masalah.
- c. Desain variasi ketidakberaturan vertikal  
 Langkah ini ditentukan dengan metode *trial and error* (apabila langkah  $i$  tidak terpenuhi, maka langkah ini harus diulang kembali).
- d. *Preliminary design* elemen struktur kolom, balok, dan plat  
 Dimensi penampang awal elemen struktur plat, balok, kolom bertujuan untuk mengestimasi respons elastis penampang yang cukup ketika diberikan beban gempa.
- e. Analisis pembebanan gravitasi dan beban gempa rencana  
 Menganalisis beban gravitasi, yaitu beban mati beserta tambahannya dan beban hidup sesuai fungsi layan bangunan serta beban gempa rencana pada lokasi Tanjung Lesung.
- f. Pemodelan pada program ETABS  
 Desain bentuk konfigurasi bangunan dimodelkan pada program ETABS v.17.0.1 dan dianalisis dengan metode respons spektrum.
- g. Evaluasi respons seismik  
 Evaluasi harus mempertimbangkan kinerja batas layan, jika tidak sesuai maka perencanaan harus diulang kembali dari langkah d.
- h. Evaluasi konfigurasi bentuk ketidakberaturan vertikal  
 Konfigurasi bentuk ketidakberaturan vertikal yang dapat diterima pada langkah

ini adalah seperti poin 4.2, apabila ada konfigurasi yang tidak terdefinisi maka perencanaan harus diulang kembali dari langkah d.

i. Analisis hasil dan pembahasan

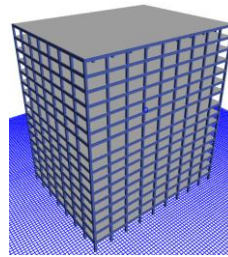
Model-model dibandingkan respons seismiknya berdasarkan *base shear*, *displacement*, dan *drift*.

j. Kesimpulan dan saran

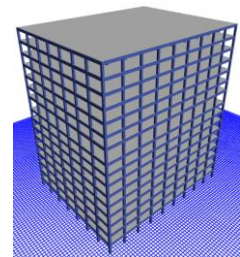
Menjawab tujuan penelitian mengenai pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap respons seismik *base shear*, *displacement*, dan *drift*.

#### 4.2 Model Struktur

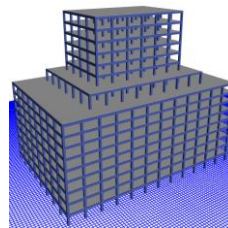
Struktur dimodelkan dengan memberikan variasi tipe ketidakberaturan vertikal seperti pada gambar di bawah ini.



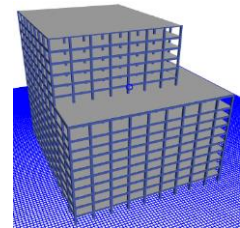
**Gambar 4.** Model A dengan konfigurasi tipe 1 dan 5A  
*Sumber: Hasil analisis, 2019*



**Gambar 5.** Model B dengan konfigurasi tipe 1, 2, dan 5A  
*Sumber: Hasil analisis, 2019*



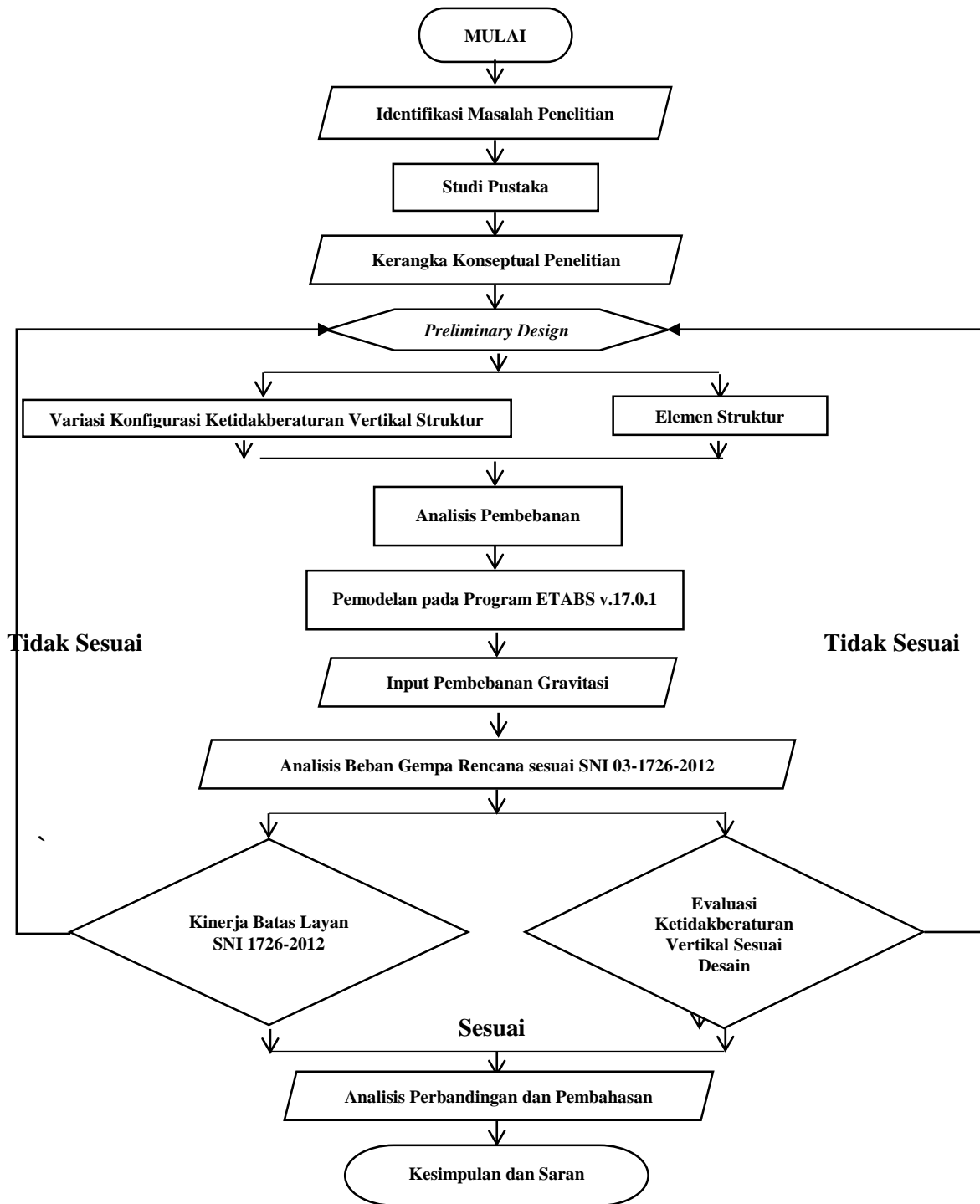
**Gambar 6.** Model C dengan konfigurasi tipe 1, 3, dan 5A  
*Sumber: Hasil analisis, 2019*



**Gambar 7.** Model D dengan konfigurasi tipe 1, 4, dan 5A  
*Sumber: Hasil analisis, 2019*



4.3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 8. Bagan alir penelitian  
 Sumber: Hasil analisis, 2019

**5. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**5.1 Evaluasi Ketidakberaturan Vertikal**

Hasil evaluasi ketidakberaturan vertikal yang terjadi pada seluruh model penelitian seperti pada tabel 1 telah sesuai rencana desain. Disimpulkan bahwa seluruh model penelitian telah sesuai persyaratan

bangunan berkategori desain seismik D, yaitu tidak diizinkan memiliki diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral elemen penahan gaya seismik (kolom) yang berlebihan (tipe 5B).

**Tabel 1.** Hasil evaluasi ketidakberaturan vertikal

| Tipe | Model |   |   |   |   |
|------|-------|---|---|---|---|
|      | Sb.   | A | B | C | D |
| 1A   | X     | ✓ | ✓ | ✓ | - |
|      | Y     | ✓ | ✓ | ✓ | - |
| 1B   | X     | - | - | - | ✓ |
|      | Y     | - | - | - | ✓ |
| 2    | X     | - | ✓ | - | - |
|      | Y     | - | ✓ | - | - |
| 3    | X     | - | - | ✓ | - |
|      | Y     | - | - | ✓ | - |
| 4    | X     | - | - | - | ✓ |
|      | Y     | - | - | - | ✓ |
| 5A   | X     | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
|      | Y     | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5B   | X     | - | - | - | - |
|      | Y     | - | - | - | - |

Sumber: Hasil analisis, 2019

Tipe-tipe ketidakberaturan vertikal didesain pada seluruh model penelitian terjadi pada tingkat yang sama, yaitu pada lantai 10 agar lebih fokus pembahasannya. Kesimpulan pada tabel di atas didapatkan bahwa bangunan yang diklasifikasikan sebagai gedung tinggi yang memiliki diskontinuitas ketinggian antar tingkat dapat menimbulkan konfigurasi ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (tipe 1) walaupun denah struktur seluruh lantai tipikal seperti pada kasus model A dan B.

Efek diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya seismik yang dimiliki model D menimbulkan kekakuan tingkat yang berlebihan atau ketidakberaturan vertikal tipe 1B, di mana pada kasus model lainnya dengan adanya variasi ketidakberaturan

vertikal bukan tipe 4 tidak terjadi kekakuan tingkat yang berlebihan. Kekakuan tingkat jika semakin kecil, maka geser dasar yang dihasilkan pun sangat kecil, sehingga faktor kuat lebih sistem dalam kebutuhan perhitungan gaya-gaya dalam pada model D perlu diperhitungkan sebagai representasi dari geser dasar yang tidak sempurna akibat adanya reduksi kekakuan yang diakibatkan oleh transfer beban pada kolom tidak sentris.

**5.2 Periode Fundamental Struktur**

Besarnya gaya gempa pada struktur dipengaruhi oleh beberapa properti dinamik, salah satunya oleh periode fundamental struktur. Pengaruh periode fundamental struktur terhadap perilaku dinamik bangunan sangat besar, mengingat bahwa gaya gempa merupakan



fungsi dari waktu. Tinjauan ini dibahas sebagai salah satu pertimbangan dasar dalam membahas perilaku dinamik yang akan dijelaskan pada subbab-subbab berikutnya. Periode fundamental struktur yang dibahas hanya pada ragam tinggi saja. Tabel di bawah ini merupakan rekapitulasi periode fundamental struktur pada masing-masing model.

**Tabel 2.** Perbandingan periode fundamental struktur

| Model | $T_x$ (s) | $T_y$ (s) |
|-------|-----------|-----------|
| A     | 2,054     | 2,086     |
| B     | 2,054     | 2,085     |
| C     | 1,649     | 1,678     |
| D     | 2,014     | 2,104     |

Sumber: Hasil analisis, 2019

**Tabel 3.** Perbandingan berat seismik efektif

| Model | W (kN)     | % W   |
|-------|------------|-------|
| A     | 486151,111 | 100   |
| B     | 464156,871 | 95,48 |
| C     | 467410,769 | 96,15 |
| D     | 473764,070 | 97,45 |

Sumber: Hasil analisis, 2019

Menurut FEMA 451B (2007), periode fundamental merupakan fungsi dari massa dan kekakuan. Artinya, konfigurasi bentuk bangunan sangat mempengaruhi nilai periode fundamental struktur yang terjadi. Semakin lama bangunan bergetar, maka struktur semakin dikatakan fleksibel. Pengaruhnya adalah geser dasar yang dihasilkan akan semakin kecil dan simpangan antar tingkat semakin besar.

Berdasarkan tabel 2 terlihat bahwa model C memiliki periode fundamental yang paling kecil baik arah x maupun y dengan nilai sebesar  $T_x = 1,649$  s dan  $T_y = 1,678$  s. Periode tersebut kecil dikarenakan konfigurasi bangunan secara vertikal pada model C berbentuk struktur podium (semakin tinggi bangunan, denah bangunan semakin kecil) atau memiliki konfigurasi ketidakberaturan geometri vertikal (tipe 3). Telah disebutkan bahwa periode fundamental merupakan fungsi

dari massa dan kekakuan, oleh sebab itu pada model C periode fundamental yang dihasilkan akan lebih pendek daripada model lainnya dikarenakan memiliki kekakuan tingkat yang besar. Sebaliknya, pada kasus model lainnya yang memiliki kekakuan tingkat yang kecil di seluruh lantai akan memiliki periode fundamental yang lebih besar daripada model C. Periode fundamental terbesar pada arah x terjadi pada model A dan B sebesar  $T = 2,054$  s serta pada arah y terjadi pada model D sebesar  $T = 2,104$  s.

### 5.3 Respons Seismik Struktur

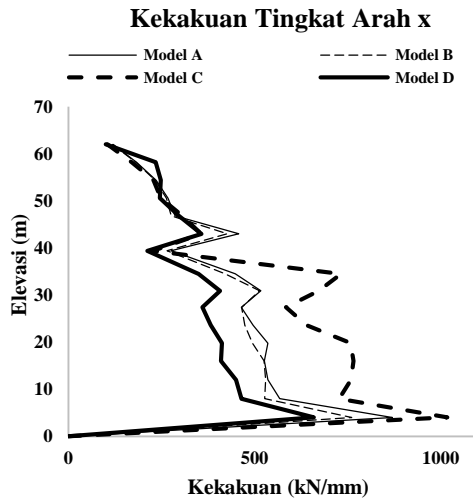
Respons seismik dibandingkan berdasarkan tinjauan *base shear*, *displacement*, dan *drift*. Adapun sebagai pertimbangan dalam melakukan kesimpulan, kekakuan lateral struktur juga diperhitungkan.

#### a. Kekakuan lateral tingkat

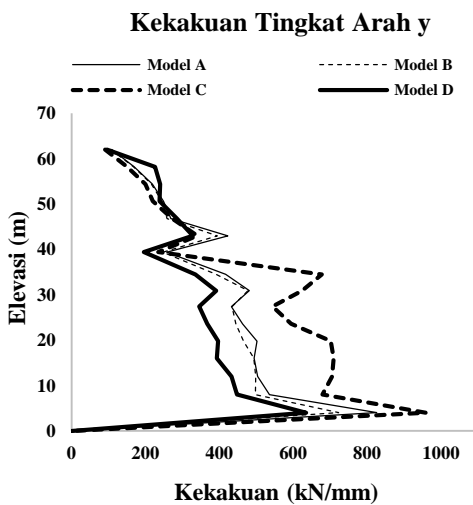
Berdasarkan rumus empiris menurut FEMA 451B, kekakuan tingkat merupakan fungsi dari geser tingkat dan simpangan antar lantai tingkat. Teori tersebut membuat penelitian ini membandingkan kekakuan tingkat pada masing-masing model sebagai salah satu pertimbangan dasar untuk menarik kesimpulan perilaku dinamik struktur.

Kekakuan tingkat berkaitan dengan deformasi struktur yang terjadi selama memikul beban gempa. Struktur dikatakan kaku apabila deformasi yang dihasilkan kecil dikarenakan nilai kekakuan di setiap tingkat besar, dan sebaliknya apabila deformasinya besar maka struktur dikatakan fleksibel. Kekakuan struktur dipengaruhi oleh momen inersia struktur yang berasal dari luasan denah dan momen torsi yang diakibatkan eksentrisitas. Kekakuan struktur akan bernilai besar apabila pusat

massa dan pusat rotasi berhimpit serta memiliki nilai momen inersia besar.



Gambar 9. Kekakuan struktur arah x  
Sumber: Hasil analisis, 2019

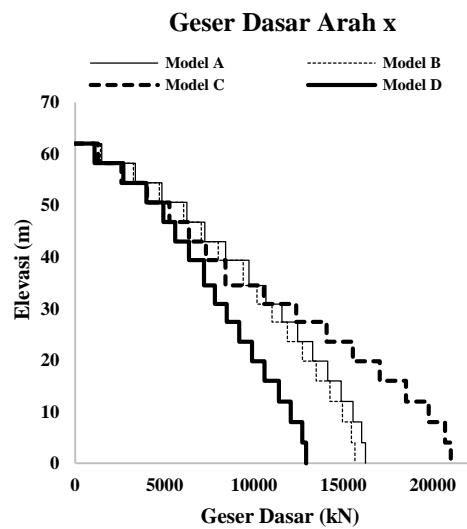


Gambar 10. Kekakuan struktur arah y  
Sumber: Hasil analisis, 2019

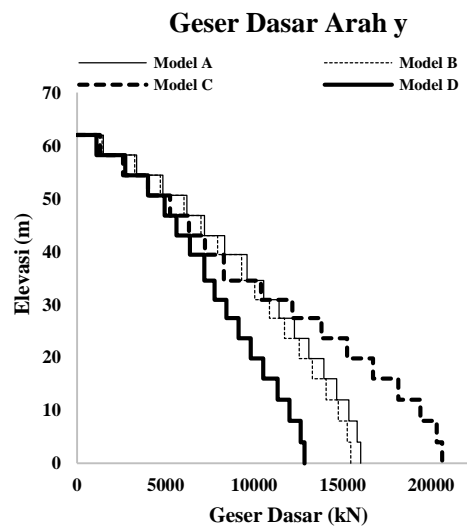
Model dengan struktur paling fleksibel dimiliki oleh model D, terlihat pada grafik kekakuan struktur di semua tingkat pada kedua arah ortogonal merupakan yang paling rendah. Kekakuan fleksibel yang terjadi disebabkan oleh reduksi kekakuan akibat pengaruh diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya seismik serta terjadi eksentrisitas torsi akibat pusat massa dan

pusat rotasi yang tidak berhimpit sehingga menghasilkan rotasi pada *mode shape*. Artinya, model D akan menghasilkan perilaku dinamik yang buruk dengan deformasi yang besar dan representasi gaya-gaya dalam elemen yang kecil pada semua tingkat.

b. Tinjauan geser dasar (*base shear*)



Gambar 11. Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap geser dasar arah x  
Sumber: Hasil analisis, 2019



Gambar 12. Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap geser dasar arah x  
Sumber: Hasil analisis, 2019

Berdasarkan gambar 11 dan 12 terlihat bahwa model C baik arah x maupun arah y memiliki geser tingkat yang paling besar pada tingkat 1 – 9, akan tetapi pada tingkat 10 hingga atap geser tingkat yang dihasilkan menjadi kedua terendah akibat dari efek ketidakberaturan geometri vertikal. Faktor yang mempengaruhi nilai geser dasar pada model ini paling besar adalah dikarenakan merupakan model dengan perioda fundamental terkecil dan kekakuan struktur yang terbesar.

Geser dasar berdasarkan konsep dinamika struktur merupakan produk dari kekakuan, eksentrisitas torsi, dan perioda fundamental. Disimpulkan bahwa model D yang merupakan struktur tidak simetris, memiliki kekakuan fleksibel, dan perioda yang besar seperti yang telah dipaparkan sebelumnya akan menghasilkan geser dasar terkecil. Semakin kecil geser dasar, maka kekuatan struktur dalam menahan gempa akan semakin rentan, sehingga model D adalah model dengan pengaruh dinamik terburuk.

**Tabel 4.** Perbandingan nilai *base shear* seluruh model

|   | $V_x$ (kN) | $V_y$ (kN) | % $V_x$ | % $V_y$ |
|---|------------|------------|---------|---------|
| A | 16243,108  | 16037,293  | 100,00  | 100,00  |
| B | 15660,551  | 15471,201  | 96,41   | 96,47   |
| C | 21027,307  | 20633,840  | 129,45  | 128,66  |
| D | 12917,082  | 12853,343  | 79,52   | 80,15   |

Sumber: Hasil analisis, 2019

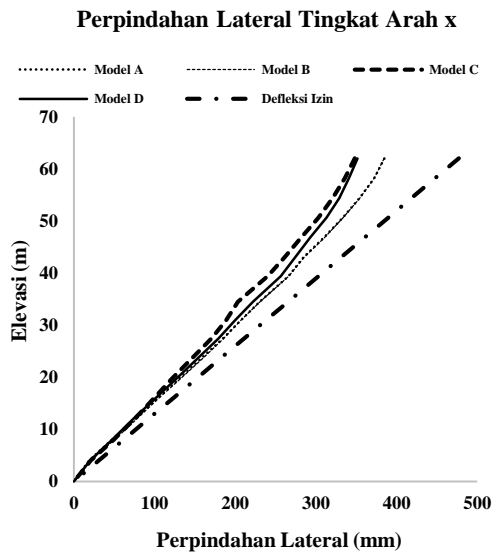
Berdasarkan tabel 4, hasil persentase perbandingan *base shear* untuk arah x dan y sebesar 96,41% dan 96,47% pada model B, 129,45% dan 128,66% pada model C, serta 79,52% dan 80,15% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal.

#### c. Tinjauan perpindahan lateral tingkat

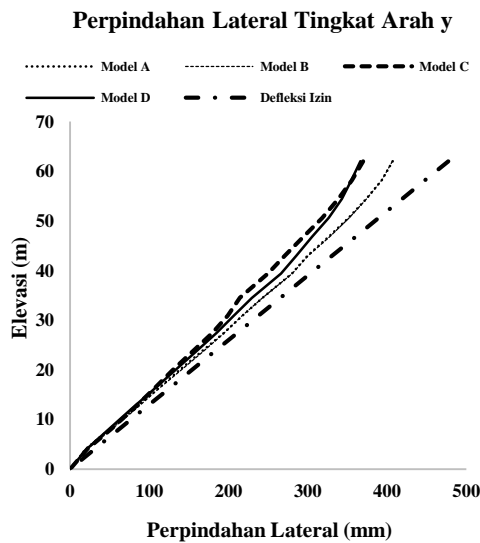
Diketahui dari gambar 13 dan 14 perpindahan lateral tingkat pada model A dan B berhimpit, kedua model tersebut memiliki defleksi paling maksimum di

antara model lainnya. Faktor yang membuat perpindahan pada model A paling maksimum dikarenakan model ini memiliki berat seismik yang paling besar dengan konfigurasi denah struktur tipikal hingga atap, sehingga menimbulkan efek P-delta yang besar pada elemen penahan gaya seismik. Diketahui bahwa salah satu properti dinamik yang membuat defleksi besar adalah pengaruh dari efek P-delta, sehingga inilah yang membuat model A memiliki defleksi paling besar kedua setelah model B.

Adanya variasi ketidakberaturan massa pada model B membuat struktur menghasilkan defleksi yang paling maksimum dibandingkan model lainnya. Variasi ketidakberaturan ini menjadi faktor utama yang membuat defleksi model B besar, dikarenakan model B merupakan model dengan berat seismik paling ringan. Hasil ini bukan merupakan kesimpulan mengenai model yang berperilaku dinamik paling buruk, dikarenakan berdasarkan hasil tinjauan subbab sebelumnya pada model D terjadi reduksi kekakuan yang menghasilkan representasi geser dasar tidak sempurna sehingga analisis harus memperhitungkan faktor kuat lebih sistem.



**Gambar 13.** Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap perpindahan lateral arah x  
 Sumber: Hasil analisis, 2019



**Gambar 14.** Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap perpindahan lateral arah y  
 Sumber: Hasil analisis, 2019

**Tabel 5.** Perbandingan nilai total displacement seluruh model

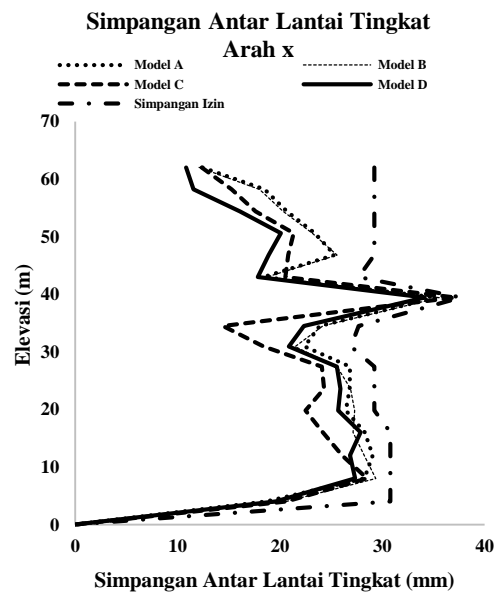
|   | $\delta_x$ (mm) | $\delta_y$ (mm) | % $\delta_x$ | % $\delta_y$ |
|---|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| A | 384,632         | 407,127         | 100,00       | 100,00       |
| B | 384,192         | 406,588         | 99,89        | 99,87        |
| C | 348,167         | 369,600         | 90,52        | 90,78        |
| D | 351,406         | 366,344         | 91,78        | 89,98        |

Sumber: Hasil analisis, 2019

Berdasarkan tabel 5, hasil persentase perbandingan *total displacement* untuk arah x dan y sebesar 99,89% dan 99,87% pada model B, 90,52% dan 90,78% pada model C, serta 91,78% dan 89,98% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal.

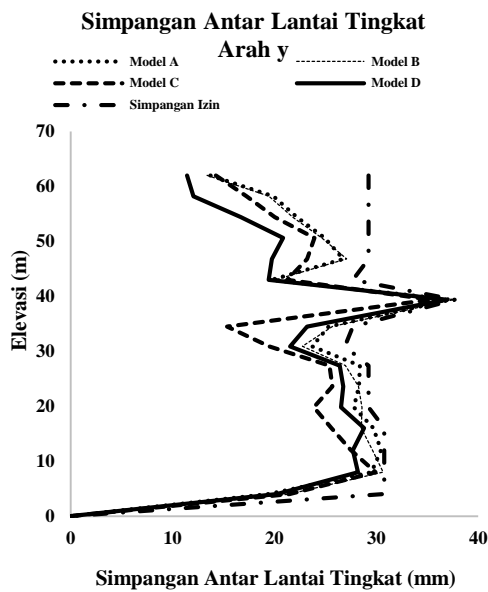
d. Tinjauan simpangan antar lantai tingkat

Berdasarkan gambar 15 dan 16 dapat disimpulkan bahwa terdapat pengaruh dari ketidakberaturan vertikal tipe 1A ataupun 1B yang terdefinisi pada seluruh model penelitian di tingkat 10. Simpangan antar lantai pada tingkat tersebut mengalami peningkatan yang sangat signifikan dan mempengaruhi simpangan antar lantai tingkat lainnya menjadi tidak seragam, seharusnya struktur didesain dengan berprinsip pada struktur tahan gempa, yaitu semakin tinggi elevasi struktur maka simpangan antar lantai yang dihasilkan semakin kecil.



**Gambar 15.** Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap simpangan antar tingkat arah x

Sumber: Hasil analisis, 2019



**Gambar 16.** Pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap simpangan antar tingkat arah y  
 Sumber: Hasil analisis, 2019

Berdasarkan tabel 6, hasil persentase perbandingan *maximum drift* untuk arah x dan y sebesar 100,73% dan 100,88% pada model B, 105,24% dan 94,80% pada model C, serta 96,77% dan 98,76% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal. Nilai-nilai tersebut mendekati kinerja batas layan maksimumnya, yaitu sebesar 37,692 mm.

**Tabel 6.** Perbandingan nilai *maximum drift* seluruh model

|   | $\delta_x$ (mm) | $\delta_y$ (mm) | % $\delta_x$ | % $\delta_y$ |
|---|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| A | 35,277          | 37,312          | 100,00       | 100,00       |
| B | 35,536          | 37,642          | 100,73       | 100,88       |
| C | 37,125          | 35,371          | 105,24       | 94,80        |
| D | 34,139          | 36,850          | 96,77        | 98,76        |

Sumber: Hasil analisis, 2019

## 6. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Hasil analisis mengenai pengaruh variasi ketidakberaturan vertikal terhadap respons seismik yang ditinjau berdasarkan tinjauan *base shear*, *displacement*, dan *drift* dapat ditarik kesimpulan bahwa:

a. Hasil persentase perbandingan *base*

*shear* untuk arah x dan y sebesar 96,41% dan 96,47% pada model B, 129,45% dan 128,66% pada model C, serta 79,52% dan 80,15% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal. Geser dasar dipengaruhi oleh kekakuan, kesimetrisan bangunan, dan lamanya perioda getar. Semakin kaku bangunan, maka perioda yang dihasilkan akan semakin kecil sehingga berdampak kepada geser dasar yang besar. *Base shear* terkecil terdapat pada model D akibat dari tidak simetrisnya sistem struktur dan terdapat reduksi kekakuan yang diakibatkan oleh adanya diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen kolom.

- b. Hasil persentase perbandingan *total displacement* untuk arah x dan y sebesar 99,89% dan 99,87% pada model B, 90,52% dan 90,78% pada model C, serta 91,78% dan 89,98% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal. Faktor-faktor yang memberikan pengaruh terhadap deformasi lateral adalah perioda fundamental. Semakin besar perioda, maka deformasi yang dihasilkan akan semakin besar.
- c. Hasil persentase perbandingan *maximum drift* untuk arah x dan y sebesar 100,73% dan 100,88% pada model B, 105,24% dan 94,80% pada model C, serta 96,77% dan 98,76% pada model D dari model A yang merupakan model tipikal. Nilai-nilai tersebut mendekati kinerja batas layan maksimumnya, yaitu sebesar 37,692 mm. Bangunan ketidakberaturan vertikal merupakan struktur yang fleksibel, dikarenakan nilai simpangan antar tingkat pada seluruh model tidak

menurun seiring bertambahnya ketinggian.

Berdasarkan poin-poin di atas, disimpulkan bahwa model D merupakan model dengan respons seismik terburuk, dikarenakan nilai geser dasar paling kecil dibandingkan model lainnya. Mengingat bahwa properti dinamik tersebut merupakan parameter utama struktur dalam menahan gempa.

## 6.2 Saran

Penulis menyarankan beberapa hal untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

- 1) Kajian ini dapat dilanjutkan pada bangunan *eksisting* yang terkonfigurasi sebagai gedung tidak beraturan vertikal dan didesain berdasarkan standar terbaru, yaitu SNI 1726-2019.
- 2) Pengembangan dari penelitian ini dapat dilakukan dengan merubah variasi menjadi ketidakberaturan horizontal, sehingga pengaruh konfigurasi bentuk secara horizontal terhadap respons seismik bangunan bertingkat tinggi juga dapat diketahui.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standarisasi Nasional. (2012). *SNI 1726-2012 Tata Cara Perencanaan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Kementerian Pekerjaan Umum.
- [2] Boen, T., dkk. (2010). Cara Memperbaiki Bangunan yang Rusak akibat Gempa Bumi. *World Seismic Safety Initiative*.
- [3] Faizah, R. (2015). Pengaruh Frekuensi Gempa terhadap Respons Bangunan Bertingkat. *Seminar Nasional Teknik Sipil V UMS*, 2015.
- [4] *Federal Emergency Management Agency*. (2007). *FEMA 451B. National Earthquake Hazards Reduction Program Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials*. Safety Council National Institute of Building Sciences.
- [5] Kirac, N., Dogan, M., & Ozbasaran, H. (2010). *Failure of Weak Storey during Earthquakes. Engineering Failure Analysis Vol. 18*.
- [6] Manasa, B. R., & Suresh, M. R. (2017). *Study on Dynamic Behaviour of High Riser In-Plane Discontinuity in Vertical Element Lateral Loads. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 04 Issue: 10*.
- [7] Mulyadi, D., & Nur, W. H. (2016). Aplikasi Analitik Hirarki Proses untuk Ancaman Bahaya Gempa di daerah Tanjung Lesung-Panimbang, Kabupaten Pandeglang. *Riset Geologi dan Pertambangan Vol. 28 (1)*.
- [8] Pusat Gempa Bumi dan Tsunami. (2019). Katalog Gempa Bumi Signifikan dan Merusak 1821 – 2018. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- [9] Pusat Penelitian Mitigasi Bencana Institut Teknologi Bandung. (2011). Aplikasi Desain Spektra Indonesia 2011. Dikutip 15 Maret 2018 dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (Puskim): [http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain\\_spektra\\_indonesia\\_2011/](http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/)
- [10] Shah, K., & Vyas, P. (2017). *Effects of Vertical Geometric and Mass Irregularities in Structure. Kalpa Publications in Civil Engineering Volume 1, Pages 87-92*.
- [11] Windah, R. S., Handono, B. D., & Siajaya, K. (2018). Respons Struktur Gedung Bertingkat dengan Variasi Kekakuan Kolom akibat Gempa berdasarkan SNI 03-1726-2012. *Jurnal Sipil Statik Vol. 6 No. 6*.