

## ANALISIS DINAMIK PERILAKU GEDUNG DENGAN KETIDAKBERATURAN MASSA PADA MASING-MASING TINGKAT TERHADAP BEBAN GEMPA

Leonardus Ivan<sup>1</sup> dan Edison Leo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: ivan.leonardus@gmail.com

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: edisonl@ft.untar.ac.id

### ABSTRAK

Di Indonesia, gempa bumi merupakan bencana alam yang sangat sering terjadi. Intensitas terjadinya gempa yang tinggi di Indonesia akibat posisinya yang berada di pertemuan tiga lempeng tektonik dan posisinya yang berada di daerah Cincin Api Pasifik yang merupakan sabuk gempa bumi terbesar di dunia. Namun, sebenarnya bukan gempa bumi yang menyebabkan korban, melainkan disebabkan oleh bangunan yang rubuh karena tidak mampu merespons dengan baik getaran gempa. Ketidakmampuan struktur merespons getaran gempa, salah satunya adalah akibat terdapatnya ketidakberaturan struktur. Ketidakberaturan struktur yang akan dibahas pada Skripsi ini adalah ketidakberaturan massa. Struktur yang dimodelkan adalah gedung bertingkat yang memiliki ketidakberaturan massa sebesar 300% pada setiap tingkat secara terpisah. Gedung yang dimodelkan memiliki 10 tingkat dan terletak pada Kota Lombok. Gedung dianalisis secara dinamik menurut SNI 1726:2012 dengan bantuan program ETABS, terhadap beban gempa. Analisis dinamik yang digunakan adalah analisis ragam respons spektrum dan analisis ragam riwayat waktu. Respons gedung yang ditinjau adalah gaya geser tingkat, simpangan lateral tingkat, dan simpangan antar lantai tingkat pada masing-masing pemodelan gedung. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa beban gempa hasil kedua analisis dinamik memiliki deviasi yang kecil. Dengan demikian, kedua analisis dinamik relatif dapat menggambarkan beban gempa yang akan terjadi sebenarnya. Hasil analisis yang didapat menggunakan kedua metode analisis dinamik tersebut, menunjukkan bahwa ketidakberaturan massa dinyatakan relatif aman jika berada pada 10-20% ketinggian gedung and dinyatakan berbahaya jika diletakkan pada ketinggian paling atas dan 90%, 70%, 40%, dan 30% dari ketinggian gedung.

Kata kunci: analisis dinamik, ketidakberaturan massa, perencanaan gempa, SNI 1726:2012, ETABS

## 1. PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Gempa bumi merupakan peristiwa yang sangat umum dan sering terjadi di negara-negara di seluruh bumi, termasuk juga di Indonesia. Intensitas yang tinggi dari terjadinya gempa bumi di Indonesia adalah karena posisinya di antara pertemuan 3 lempeng utama dunia, serta berada di dalam Cincin Api pasifik yang merupakan sabuk gempa bumi terbesar di bumi. Namun sebenarnya bukan gempa bumi yang menyebabkan korban jiwa, melainkan struktur bangunan yang rubuh akibat tidak dapat merespon gempa dengan baik. Penyebab dari ketidakmampuan ini adalah akibat adanya ketidakberaturan struktur dalam suatu bangunan. Salah satu jenis ketidakberaturan struktur yang sering terjadi adalah ketidakberaturan massa. Ketidakberaturan massa dapat terjadi pada suatu struktur jika massa dalam suatu tingkat lebih besar dari 150% massa tingkat dibawahnya. Salah satu penyebabnya adalah karena kebutuhan arsitektur (Sadashiva dkk, 2009:288), misalnya keberadaan ruang mesin atau gudang dalam suatu tingkat pada suatu gedung. Kasus lainnya adalah suatu tingkat dalam gedung yang direncanakan akan berfungsi sebagai area kolam renang. Selain karena kebutuhan arsitektur, dapat juga terjadi karena pengalihan fungsi bangunan. Misalnya seperti studi kasus dalam penelitian yang dilakukan oleh Christiawan dkk (2008) yaitu alih fungsi ruang kuliah pada lantai II Gedung G Universitas Semarang menjadi ruang perpustakaan. Perubahan fungsi ruang tersebut biasanya dilakukan berdasarkan pertimbangan efisiensi pemanfaatan ruang dari segi pembiayaan dan ketersediaan lahan.

### Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan beberapa parameter respons dari gedung yang memiliki ketidakberaturan massa terhadap gedung beraturan, menggunakan analisis dinamik dengan bantuan program

ETABS pada masing-masing tingkat, sehingga dapat diketahui tingkat mana yang paling aman hingga paling berbahaya untuk diberikan ketidakberaturan massa.

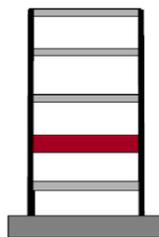
### Batasan Masalah

Bangunan yang dimodelkan dalam penelitian ini adalah gedung 10 tingkat yang berada di kota Lombok dengan kelas situs tanah lunak yang memiliki ketidakberaturan massa sebesar 300% pada tingkat yang berbeda-beda secara terpisah pada masing-masing pemodelan gedung. Gedung yang direncanakan mengikuti ketentuan-ketentuan perencanaan hanya gedung beraturan. Gedung yang memiliki ketidakberaturan massa dibiarkan melewati ketentuan tersebut untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan yang terjadi.

## 2. DASAR TEORI

### Ketidakberaturan Massa

Menurut Tabel 11 SNI 1726:2012, Ketidakberaturan berat (massa) didefinisikan ada jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150% massa efektif didekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai bawahnya tidak perlu ditinjau.



Gambar 1. Ilustrasi Ketidakberaturan Massa  
(Sumber: *Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples*)

### Metode Analisis Dinamik

Analisis dinamik untuk perancangan struktur tahan gempa dilakukan jika diperlukan evaluasi yang lebih akurat dari gaya-gaya gempa yang bekerja pada struktur, serta untuk mengetahui perilaku dari struktur akibat pengaruh gempa. Pada struktur bangunan tingkat tinggi atau struktur dengan bentuk atau konfigurasi yang tidak teratur. Analisis dinamik dapat dilakukan dengan cara elastis maupun inelastis. Pada cara elastis, analisis dibedakan menjadi 2 metode analisis, yaitu analisis ragam spektrum respons (*response spectrum modal analysis*) dan ragam riwayat waktu (*time history modal analysis*). Pada analisis ragam spektrum respons, struktur diberikan suatu spektrum respons dari gempa rencana yang kemudian ditentukan respons struktur terhadap pengaruh suatu gempa melalui superposisi dari respons tiap getarnya. Pada analisis ragam riwayat waktu, memerlukan masukan data rekaman percepatan gempa untuk menganalisa respon dinamik struktur yang menerima beban yang berubah-ubah terhadap waktu.

### Gaya Geser Dasar (*Base Shear*) dan Gaya Geser Tingkat (*Story Shear*)

Gaya geser dasar merupakan pengganti atau penyederhanaan dari getaran gempa bumi yang bekerja pada dasar bangunan dan selanjutnya digunakan sebagai gaya gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung. Gaya geser dasar pada struktur gedung beraturan dapat ditentukan dengan metode statik ekuivalen, sedangkan untuk struktur gedung tidak beraturan ditinjau dengan metode dinamik.

Gaya geser dasar akan didistribusikan secara vertikal sepanjang tinggi struktur sebagai gaya horizontal tingkat yang bekerja pada masing-masing tingkat bangunan. Penjumlahan gaya horizontal pada tingkat yang ditinjau dapat disebut dengan gaya geser tingkat. Akibat dari gaya geser pada suatu tingkat, maka akan mengakibatkan terjadinya perpindahan dan simpangan pada tingkat-tingkat tersebut.

### Simpangan Lateral Tingkat dan Simpangan Antar Lantai Tingkat

Simpangan lateral tingkat (*story displacement*) adalah perpindahan lateral suatu tingkat yang diukur dari dasar bangunan, sedangkan simpangan antar lantai tingkat (*story drift*) adalah perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan atau simpangan mendatar tiap tingkat bangunan yang diukur dari lantai di bawahnya.

Simpangan antar lantai tingkat desain ( $\Delta$ ) dihitung sebagai selisih terbesar dari defleksi titik-titik di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau dan letaknya segaris secara vertikal, disepanjang salah satu bagian tepi struktur. Defleksi pusat massa pada tingkat  $x$  ( $\delta_x$ ) (mm) harus ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

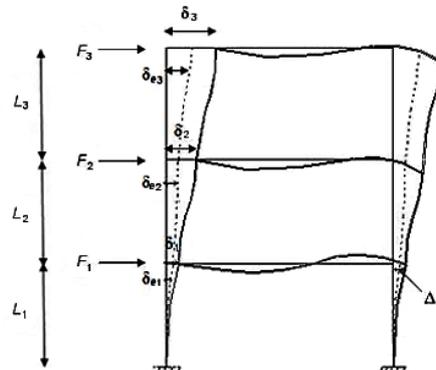
$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{ex}}{I_e} \quad (1)$$

Keterangan:

$C_d$  = faktor amplifikasi defleksi

$\delta_{ex}$  = simpangan lateral elastis akibat gaya gempa desain pada tingkat  $x$

$I_e$  = faktor keutamaan gempa yang



Gambar 2. Penentuan Simpangan Antar Lantai  
(Sumber: SNI 1726:2012)

Keterangan:

$F_i$  = gaya geser dasar seismik pada tingkat  $i$

$\delta_{ei}$  = simpangan lateral elastis akibat gaya gempa desain pada tingkat  $i$

$\delta_i = C_d \delta_{ei} / I_e =$  simpangan lateral yang diperbesar pada tingkat  $i$

$\Delta_i = (\delta_{ei} - \delta_{e(i-1)}) C_d / I_e =$  simpangan antar lantai pada tingkat  $i$  yang diperbesar

Simpangan antar lantai tingkat yang diperbesar,  $\Delta_x$  tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat yang diizinkan,  $\Delta_a$  seperti yang dirujuk dalam Tabel 1 di semua tingkat.

Tabel 1. Simpangan Antar Lantai Izin ( $\Delta_a$ ) Berdasarkan SNI 1726:2012

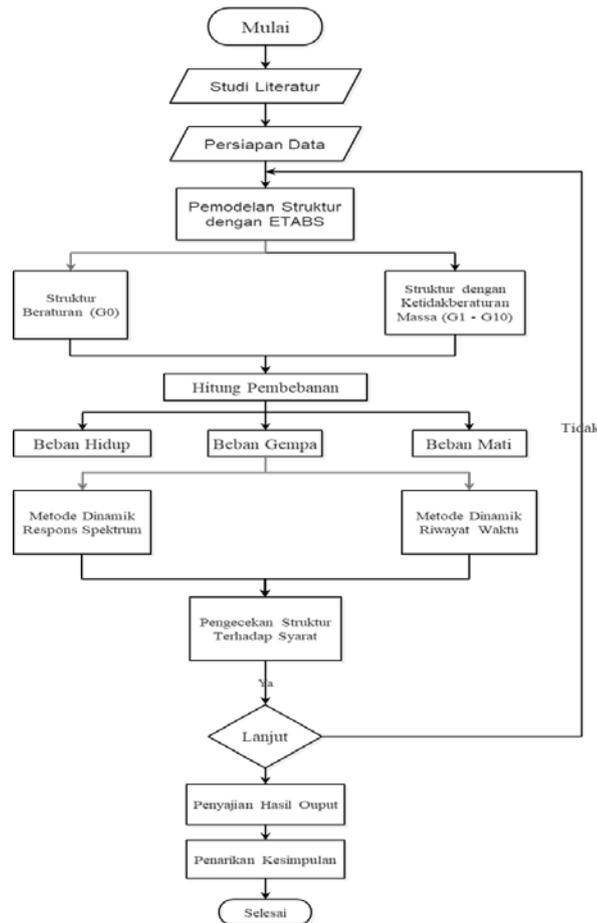
Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat	0.025 $h_{sx}$	0.020 $h_{sx}$	0.015 $h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever atau bata	0.010 $h_{sx}$	0.010 $h_{sx}$	0.010 $h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0.007 $h_{sx}$	0.007 $h_{sx}$	0.007 $h_{sx}$
Semua struktur lainnya	0.020 $h_{sx}$	0.015 $h_{sx}$	0.010 $h_{sx}$

Keterangan:

$h_{sx}$  = tinggi tingkat di bawah tingkat  $x$

### 3. METODE PENELITIAN

Langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan berbagai studi literatur mengenai hal-hal yang diperlukan. Setelah itu dilakukan pemodelan struktur pada program ETABS, baik beraturan dan struktur yang memiliki ketidakberaturan massa pada masing-masing tingkat sesuai dengan ketentuan dan asumsi yang telah ditentukan. Kemudian dilanjutkan dengan pembebanan gedung dengan beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban gempa yang digunakan adalah hasil analisis dinamik spektrum respons dan riwayat waktu. Setelah semua selesai, pada masing-masing model akan dilakukan pengecekan terhadap syarat partisipasi massa ragam, pengecekan terhadap kemungkinan terjadinya ketidakberaturan selain ketidakberaturan massa, dan pengecekan terhadap kapasitas momen dan lendutan pelat (terutama pada gedung yang memiliki ketidakberaturan massa). Jika semua pemodelan sudah sesuai dengan syarat-syarat pengecekan, maka dilakukan analisis struktur menggunakan program ETABS untuk mendapatkan parameter-parameter respons gedung berupa gaya geser tingkat (*story shear*), dan simpangan antar lantai tingkat (*story drift*). Parameter-parameter tersebut kemudian dibandingkan antara model gedung beraturan dengan model-model gedung yang memiliki ketidakberaturan massa pada masing-masing tingkat.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

### Data Struktur

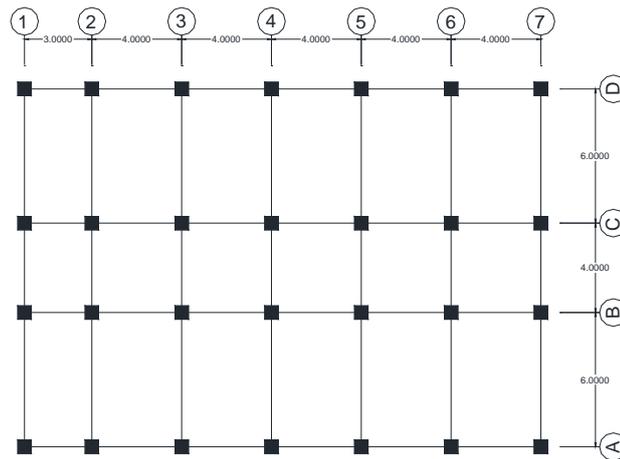
Pada penelitian ini terdapat total 11 model gedung 10 tingkat. Model pertama adalah gedung yang beraturan (G0) dan sisanya model gedung yang memiliki ketidakberaturan massa sebesar 300% pada masing-masing tingkat. Data-data teknis yang digunakan dalam pemodelan gedung pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Lokasi Bangunan : Lombok
- b. Fungsi Bangunan : Gedung Perkantoran
- c. Jarak Antar Tingkat : 5 m (lantai 1) ; 4 m (lantai 2 - lantai 10)
- d. Jenis Konstruksi : Struktur Beton Bertulang
- e. Jenis Tanah : Tanah Lunak (Kelas Situs E)
- f. Dimensi Elemen Struktur
 

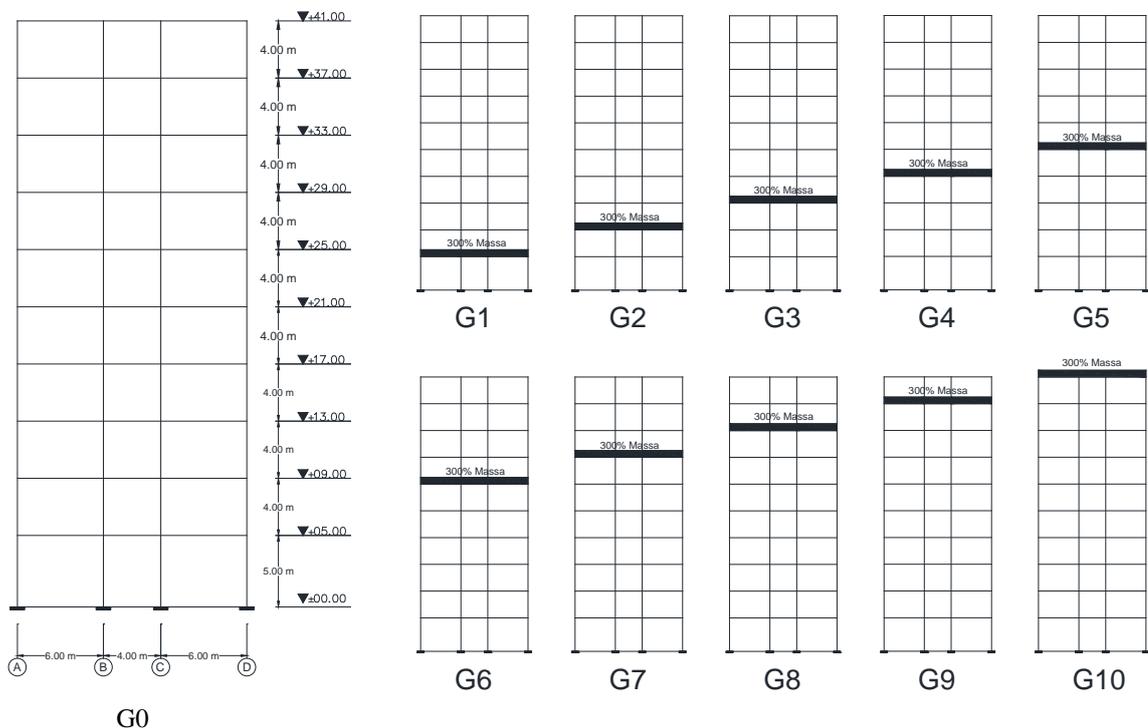
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Balok</li> <li style="padding-left: 20px;">GF - St. 6 = <math>300 \times 600 \text{ mm}^2</math> [1]</li> <li style="padding-left: 20px;">= <math>250 \times 500 \text{ mm}^2</math> [2]</li> <li style="padding-left: 20px;">St. 7 - ROOF = <math>250 \times 500 \text{ mm}^2</math> [1]</li> <li style="padding-left: 20px;">= <math>200 \times 400 \text{ mm}^2</math> [2]</li> <li>- Pelat Lantai</li> <li style="padding-left: 20px;">GF - ROOF = 150 mm (untuk gedung beraturan)</li> <li style="padding-left: 20px;">= 275 mm (untuk gedung tidakberaturan pada tingkat 1 dan 3-10)</li> <li style="padding-left: 20px;">= 285 mm (untuk gedung tidakberaturan pada tingkat 2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kolom</li> <li style="padding-left: 20px;">GF - ST. 2 = <math>600 \times 600 \text{ mm}^2</math></li> <li style="padding-left: 20px;">St. 3 - St. 6 = <math>500 \times 500 \text{ mm}^2</math></li> <li style="padding-left: 20px;">St. 7 - ROOF = <math>450 \times 450 \text{ mm}^2</math></li> </ul>
---	---
- g. Mutu Material
 

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mutu Beton (<math>f'c</math>)</li> <li style="padding-left: 20px;">Kolom GF - St. 2 = 37 MPa</li> <li style="padding-left: 20px;">Kolom St 3 - ROOF = 35 MPa</li> <li style="padding-left: 20px;">Balok &amp; Pelat = 30 MPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mutu Tulangan Baja</li> <li style="padding-left: 20px;">Tulangan Pokok = 400 MPa</li> <li style="padding-left: 20px;">Tulangan Geser = 400 MPa</li> </ul>
--	--

Keterangan : [1] → Untuk Bentang 6 m ; [2] → Untuk Bentang 4 m dan 3 m



Gambar 4. Denah Struktur yang Direncanakan



Gambar 5. Tampak Elevasi Model Gedung G0 - G10

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini merupakan hasil-hasil (*output*) yang didapatkan dari hasil analisis menggunakan program ETABS serta pembahasannya. Semua hasil didapatkan berdasarkan analisis dinamik ragam spektrum respons (RS), ragam riwayat waktu menggunakan data riwayat gempa hasil simulasi program SIMQKE (TH - SMQ), Chuetsu-Oki (TH - CHT), dan Niigata (TH - NGT).

##### Perbandingan Parameter Respons Gedung

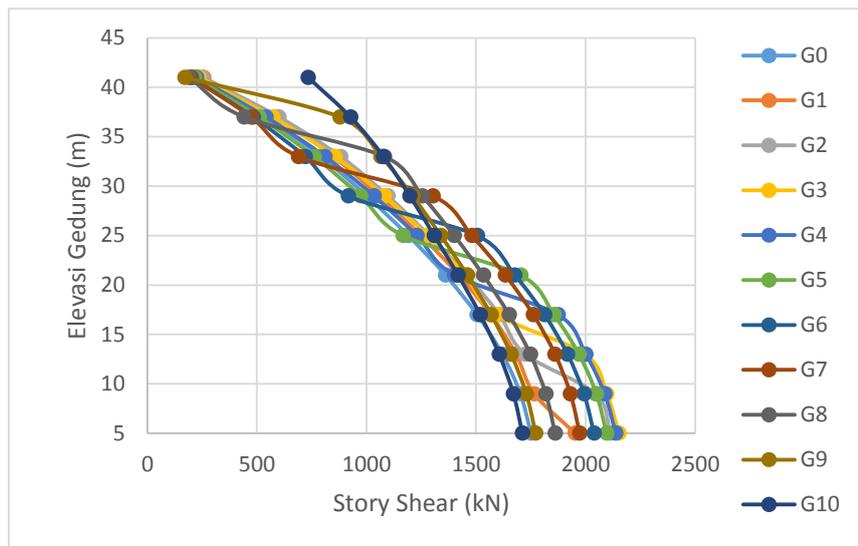
Parameter-parameter respons gedung pada semua model gedung yang memiliki ketidakberaturan massa pada masing-masing tingkat dibandingkan dengan model gedung beraturan. Parameter-parameter tersebut adalah gaya geser tingkat (*story shear*) dan simpangan antar lantai tingkat (*story drift*).

##### 1. Perbandingan Gaya Geser Tingkat (*Story Shear*)

Perbandingan dari gaya geser tingkat dari model gedung G1 sampai G10 terhadap model gedung G0 berdasarkan analisis dinamik respons spektrum dapat dilihat melalui Gambar 6. Persentase peningkatan gaya geser tingkat

model gedung G1 sampai G10 terhadap model gedung G0 berdasarkan semua metode analisis dapat dilihat di Tabel 2 sampai Tabel 5.

Pada Tabel 2 sampai Tabel 5 dapat dilihat juga gradasi warna yang menunjukkan pembagian *level* keamanan suatu tingkat (*story*). Kotak yang memiliki warna kemerahan berarti memiliki peningkatan gaya geser tingkat yang sangat signifikan sehingga dianggap sangat berbahaya. Kotak yang memiliki warna keemasan berarti memiliki peningkatan gaya geser tingkat yang cukup signifikan sehingga dianggap masih cukup berbahaya. Kotak yang memiliki warna kekuningan berarti memiliki peningkatan gaya geser tingkat yang tidak terlalu signifikan sehingga dianggap sedikit berbahaya. Kotak yang memiliki warna kehijauan berarti memiliki peningkatan gaya geser tingkat yang kecil sehingga dianggap relatif tidak berbahaya.



Gambar 6. Gaya Geser Tingkat Model Gedung G0 - G10 Berdasarkan Analisis Spektrum Respons

Tabel 2. Persentase Peningkatan Gaya Geser Tingkat Model Gedung G1 - G10 Terhadap Model Gedung G0 Berdasarkan Analisis Spektrum Respons

Story	Elevasi (m)	Peningkatan Gaya Geser Tingkat - RS (%)									
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
10	41	13.8285	10.3443	4.3915	-0.3196	-5.0476	-11.2555	-10.8469	-15.3253	-24.1183	225.3645
9	37	10.4430	12.2527	6.8486	1.0947	-4.5500	-9.8069	-11.4513	-17.3772	64.2088	73.3116
8	33	7.3359	11.4604	8.1663	2.4491	-3.8091	-8.9643	-12.8045	36.7977	34.7552	36.2049
7	29	5.6712	9.6212	8.0138	3.2933	-2.7800	-8.3910	30.1965	25.3084	20.8686	19.6389
6	25	4.8624	8.0195	7.3158	3.2901	-2.0580	26.4710	24.3257	17.6450	12.4825	9.9600
5	21	4.4780	7.1569	6.5250	3.0107	25.2024	23.2382	20.0558	12.6901	7.3281	4.2197
4	17	4.1322	6.7089	5.9505	24.4906	23.2435	20.4232	17.0265	9.6797	4.2272	0.9171
3	13	3.8502	6.4160	23.2757	23.5020	21.5511	18.3621	14.8378	7.8810	2.4674	-0.9204
2	9	3.7241	20.1608	23.1279	22.5974	20.3692	17.0691	13.4225	6.8203	1.5973	-1.8556
1	5	11.4531	20.7393	22.9117	22.0694	19.7055	16.4167	12.6898	6.2869	1.2155	-2.2536
GF	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 3. Persentase Peningkatan Gaya Geser Tingkat Model Gedung G1 - G10 Terhadap Model Gedung G0 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Hasil SIMQKE

Story	Elevasi (m)	Peningkatan Gaya Geser Tingkat - SMQ (%)									
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
10	41	7.1706	11.6196	26.0149	17.1374	12.2221	-13.2583	-31.7518	-29.7683	-26.8499	233.3283
9	37	8.6312	11.4164	21.2174	10.6840	10.7557	-10.4716	-27.1959	-28.5763	66.6731	78.1808
8	33	7.7523	7.7263	7.8616	8.0181	4.1695	-10.1176	-23.5402	27.0113	36.5855	36.3941
7	29	4.2056	4.4894	6.8965	5.8328	3.7405	-13.4470	22.7723	15.6924	22.0732	15.8537
6	25	0.5416	2.2032	7.1888	7.2710	0.4964	14.8355	17.1188	10.5688	10.8987	4.4901
5	21	0.4792	5.4207	7.9118	8.7588	15.5145	10.9033	14.6731	7.2273	2.4332	3.0513
4	17	-0.4186	7.8466	8.1682	29.4730	13.5177	7.3013	13.1041	4.7561	-3.1499	1.8814
3	13	1.6687	9.7249	28.4582	28.5684	11.9112	3.4454	11.3896	3.2150	-4.0479	0.7467
2	9	3.6410	23.0916	30.6047	29.2484	10.7047	0.0406	10.0663	2.6293	-3.5992	2.8807
1	5	9.3055	24.1779	31.9148	30.2835	10.8432	-1.9061	9.4087	2.5057	-2.8708	6.5959
GF	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 4. Persentase Peningkatan Gaya Geser Tingkat Model Gedung G1 - G10 Terhadap Model Gedung G0 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Chuetsu-oki

Story	Elevasi (m)	Peningkatan Gaya Geser Tingkat - CHT (%)									
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
10	41	7.0523	17.5180	37.4893	26.6021	15.1700	2.9372	-18.4854	-29.4175	-31.2470	188.3588
9	37	6.3295	21.4904	39.7005	28.5893	18.0333	4.2764	-16.8940	-28.4971	54.1228	46.9812
8	33	5.9462	20.2424	36.0281	25.1819	15.2790	1.0259	-19.8362	22.1134	20.4063	6.2668
7	29	5.7679	16.7198	28.7577	18.6771	9.1890	-2.8508	17.1489	8.2992	-0.1909	-12.6160
6	25	5.2028	12.4389	20.1179	11.3548	1.8563	21.6313	10.1815	-1.6735	-11.8958	-15.6396
5	21	4.6585	7.9471	12.2682	5.0366	25.7101	17.6382	5.8136	-3.9411	-10.0380	-13.1652
4	17	6.7373	4.5779	4.8427	22.5239	26.9368	14.8706	5.0071	-2.3432	-5.1388	-10.6534
3	13	7.3968	2.1436	27.6143	23.7894	27.4665	14.5457	6.7310	-0.3838	-0.4590	-9.1075
2	9	5.3220	14.6499	29.7805	24.9876	27.6900	14.2959	8.9181	3.5332	4.2919	-7.1310
1	5	6.0611	15.6840	31.1425	25.8049	27.8320	14.1696	10.6100	6.4767	7.5461	-5.7693
GF	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 5. Persentase Peningkatan Gaya Geser Tingkat Model Gedung G1 - G10 Terhadap Model Gedung G0 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Niigata

Story	Elevasi (m)	Peningkatan Gaya Geser Tingkat - NGT (%)									
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
10	41	13.9844	3.8479	5.0182	-2.6205	-1.4843	-4.7923	-1.1012	-11.5304	-18.7288	263.0305
9	37	6.4407	7.7473	10.3470	2.5338	3.1564	-0.0559	2.9645	-8.9565	83.9501	95.6154
8	33	5.5266	7.1054	11.3414	3.2650	3.7657	1.4932	2.6617	54.0419	45.8423	53.5227
7	29	4.8657	7.7330	11.6574	4.5791	4.8913	3.0657	53.8532	37.2940	26.6984	34.8595
6	25	2.9880	6.4518	9.9738	4.5386	4.2542	43.0634	41.1861	24.2283	15.1144	21.9883
5	21	1.1720	5.6169	8.8614	5.0855	32.4332	37.5497	32.7521	15.6799	8.5407	14.1162
4	17	1.2311	5.0370	8.3737	28.8924	29.4774	34.3187	27.0550	10.1229	4.5523	9.3620
3	13	0.9124	4.5027	24.0292	28.5273	27.5410	32.2062	23.0404	6.6451	2.1326	6.3405
2	9	0.4076	13.2146	25.1286	29.1178	25.9426	30.3388	20.1019	6.6418	1.2828	4.1327
1	5	4.3808	12.8107	25.9309	29.8149	24.7749	29.0862	18.4022	6.8548	0.9606	2.8132
GF	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Setelah dilakukan pengamatan pada Tabel 2 sampai Tabel 5, ketidakberaturan massa pada suatu tingkat tidak hanya mengakibatkan peningkatan pada tingkat tersebut saja, namun juga menyebabkan tingkat-tingkat lainnya mengalami peningkatan. Pada penelitian ini penulis menggunakan suatu pendekatan yaitu, jika terjadi peningkatan gaya geser tingkat lebih besar dari 10%, tingkat tersebut dianggap mengalami peningkatan gaya geser yang cukup signifikan. Tabel 6 menunjukkan banyaknya tingkat yang mengalami peningkatan gaya geser pada masing-masing pemodelan gedung pada arah X dan Tabel 7 pada arah Y.

Tabel 6. Banyaknya Tingkat yang Mengalami Peningkatan Gaya Geser Lebih Besar dari 10% pada Masing-Masing Model pada Arah X

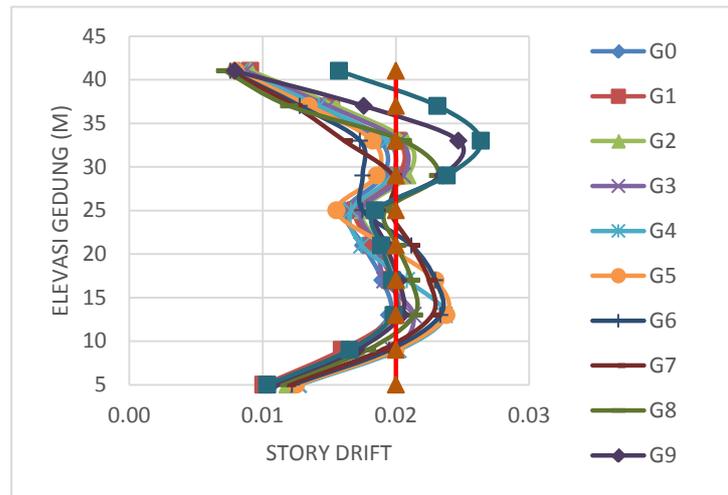
Model	Banyaknya Tingkat				
	RS	TH - SMQ	TH - CHT	TH - NGT	Average
G10	4	4	2	6	4
G9	4	4	2	4	4
G8	4	3	1	5	3
G7	7	6	3	7	6
G6	6	2	6	6	5
G5	5	7	8	5	6
G4	4	6	9	4	6
G3	3	5	9	6	6
G2	5	4	7	2	5
G1	3	0	0	1	1

Tabel 7. Banyaknya Tingkat yang Mengalami Peningkatan Gaya Geser Lebih Besar dari 10% pada Masing-Masing Model pada Arah Y

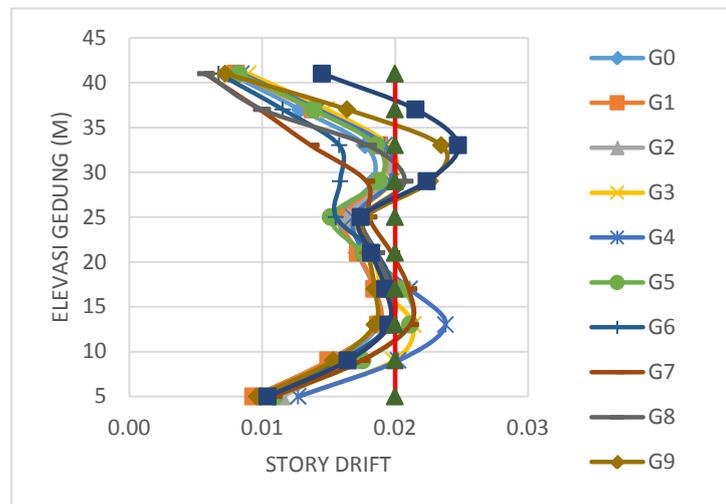
Model	Banyaknya Tingkat				
	RS	TH - SMQ	TH - CHT	TH - NGT	Average
G10	5	4	5	6	5
G9	4	4	5	5	5
G8	5	3	4	5	4
G7	7	5	4	7	6
G6	6	2	6	8	6
G5	5	2	5	7	5
G4	4	5	8	7	6
G3	3	5	9	8	6
G2	5	2	5	7	5
G1	3	0	2	5	3

## 2. Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat (*Story Drift*)

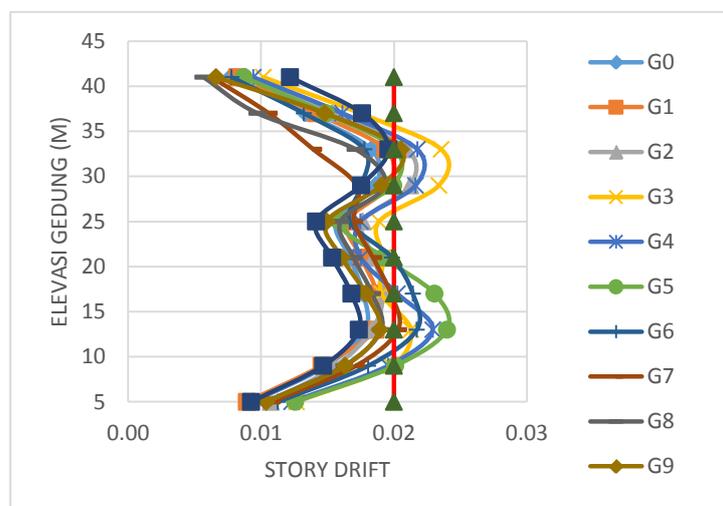
Perbandingan masing-masing simpangan antar lantai tingkat (yang telah diperbesar) terhadap batasan yang diizinkan pada setiap tingkat dapat dilihat pada Gambar 7 sampai Gambar 10. Pada pembahasan subbab ini, hanya ditampilkan hasil pada gedung arah X saja. Hasil yang didapat pada gedung arah X dianggap sudah dapat mewakili hasil pada gedung arah Y.



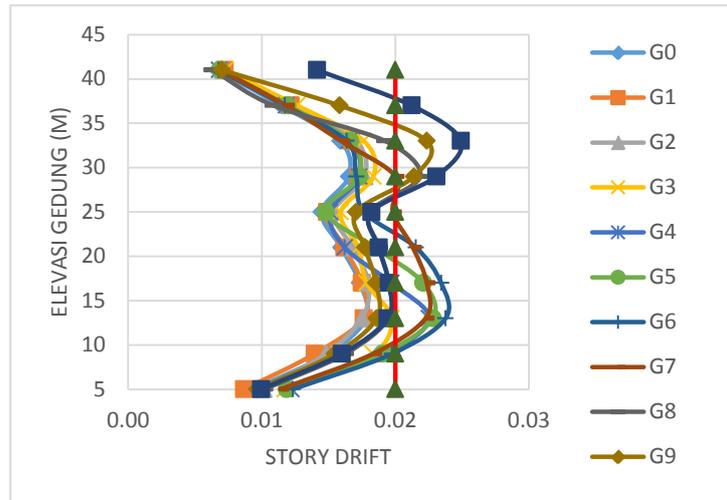
Gambar 7. Grafik Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat Terhadap Simpangan Izin pada Model Gedung G0 - G10 Berdasarkan Analisis Spektrum Respons



Gambar 8. Grafik Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat Terhadap Simpangan Izin pada Model Gedung G0 - G10 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Hasil SIMQKE



Gambar 9. Grafik Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat Terhadap Simpangan Izin pada Model Gedung G0 - G10 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Chuetsu-oki



Gambar 10. Grafik Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat Terhadap Simpangan Izin pada Model Gedung G0 - G10 Berdasarkan Analisis Riwayat Waktu - Niigata

Berdasarkan Gambar 7 sampai Gambar 10 di atas dapat dilihat, ketidakberaturan massa pada suatu tingkat mengakibatkan peningkatan simpangan antar lantai tingkat (*story drift*) pada tingkat-tingkat lainnya dalam suatu gedung. Tabel 8 dan Tabel 9 menunjukkan banyaknya tingkat yang mengalami simpangan antar lantai tingkat melebihi simpangan batas pada masing-masing tingkat. Secara rata-rata dari keempat hasil analisis, model yang memiliki paling banyak memiliki simpangan antar lantai tingkat melebihi simpangan batas adalah pada model gedung G4, G5, dan G7 pada arah X dan model G9 dan G10 pada arah Y.

Tabel 8. Banyaknya Tingkat yang Melebihi Batas Simpangan Antar Lantai pada Masing - Masing Model Gedung pada Arah X

Model	Banyaknya Tingkat				Average
	RS	TH - SMQ	TH - CHT	TH - NGT	
G10	3	3	0	3	2
G9	4	2	1	2	2
G8	5	1	0	1	2
G7	3	2	1	4	3
G6	3	0	2	3	2
G5	2	2	4	2	3
G4	3	3	4	1	3
G3	3	1	3	0	2
G2	3	0	2	0	1
G1	2	0	0	0	1
G0	0	0	0	0	0

Tabel 9. Banyaknya Tingkat yang Melebihi Batas Simpangan Antar Lantai pada Masing - Masing Model Gedung pada Arah Y

Model	Banyaknya Tingkat				Average
	RS	TH - SMQ	TH - CHT	TH - NGT	
G10	7	6	7	7	7
G9	6	6	7	7	7
G8	7	4	7	6	6
G7	6	6	6	6	6
G6	4	3	4	4	4
G5	4	3	4	3	4
G4	4	6	5	3	5
G3	6	6	6	4	6
G2	5	5	5	2	4
G1	4	4	4	2	4
G0	3	3	2	1	2

### Penentuan Level Keamanan Masing-Masing Tingkat yang Memiliki Ketidakberaturan Massa

Berdasarkan pembahasan mengenai dampak ketidakberaturan di atas, maka akan dicoba melakukan suatu pendekatan untuk dapat mengetahui pada tingkat mana yang diperkirakan relatif aman hingga berbahaya, jika direncanakan suatu tingkat akan memiliki ketidakberaturan massa. Penilaian tingkat keamanan dilakukan berdasarkan pengaruh letak tingkat yang mengalami ketidakberaturan massa terhadap 4 faktor sebagai berikut:

1. Tingkat keamanan berdasarkan model gedung yang memiliki persentase kenaikan gaya geser tingkat (*story shear*) paling besar pada suatu *story* akibat adanya ketidakberaturan massa, yaitu pada model gedung G10
2. Tingkat keamanan berdasarkan banyaknya *story* lain yang ikut mengalami peningkatan gaya geser tingkat (*story shear*) lebih dari 10% akibat adanya ketidakberaturan massa pada suatu *story* pada arah X dan arah Y.
3. Tingkat keamanan berdasarkan model gedung yang memiliki persentase penyimpangan dari simpangan antar lantai tingkat (*story drift*) paling besar pada suatu *story* terhadap simpangan antar lantai izin pada akibat adanya ketidakberaturan massa, yaitu pada model gedung G10.

4. Tingkat keamanan berdasarkan banyaknya story lain yang memiliki simpangan antar lantai tingkat (*story drift*) yang melewati simpangan batas akibat adanya ketidakberaturan massa pada suatu *story*, pada arah X dan arah Y.

Tabel penilaian tingkat keamanan letak ketidakberaturan massa dapat dilihat pada Tabel 10

Tabel 10. *Level* Keamanan Masing-Masing Tingkat (*Story*) yang Memiliki Ketidakberaturan Massa

Story	Faktor Penilaian						Rata - Rata
	Peningkatan Gaya Geser Tingkat Terbesar (G10)	Banyaknya Tingkat yang Mengalami Peningkatan Gaya Geser Tingkat Arah X	Banyaknya Tingkat yang Mengalami Peningkatan Gaya Geser Tingkat Arah Y	Simpangan Antar Lantai Tingkat Maksimum (G10)	Banyaknya Tingkat yang Melebihi Simpangan Batas Arah X	Banyaknya Tingkat yang Melebihi Simpangan Batas Arah Y	
10	225.3645	4	5	0.0157	2	7	Berbahaya
9	73.3116	4	5	0.0231	2	7	Berbahaya
8	36.2049	3	4	0.0264	2	6	Cukup Berbahaya
7	19.6389	6	6	0.0238	3	6	Berbahaya
6	9.9600	5	6	0.0184	2	4	Tidak Terlalu Berbahaya
5	4.2197	6	5	0.0189	3	4	Berbahaya
4	0.9171	6	6	0.0197	3	5	Berbahaya
3	-0.9204	6	6	0.0198	2	6	Berbahaya
2	-1.8556	5	5	0.0165	1	4	Relatif Aman
1	-2.2536	1	3	0.0103	1	4	Relatif Aman

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Ketidakberaturan massa pada suatu tingkat dapat menyebabkan peningkatan dan juga penurunan gaya geser tingkat (*story shear*), pada tingkat-tingkat lain selain tingkat yang memiliki ketidakberaturan massa tersebut. Ketidakberaturan massa pada suatu tingkat juga dapat menyebabkan simpangan antar lantai tingkat (*story drift*) pada tingkat-tingkat lainnya melebihi simpangan izin.
2. Berdasarkan penilaian pada pengaruh penempatan suatu tingkat yang memiliki ketidakberaturan massa terhadap beberapa faktor penilaian pada subbab 4.7, dapat diketahui bahwa tingkat-tingkat ke-10, 9, 7, 5, 4, 3 (atau 100%, 90%, 70%, 50%, 40%, 30% dari tinggi total gedung) dinyatakan berbahaya untuk memiliki ketidakberaturan massa. Sangat tidak disarankan untuk memodelkan ketidakberaturan massa pada bagian-bagian gedung tersebut.
3. Pada tingkat 2 dan 1 (atau 20% dan 10% dari tinggi total gedung) dinyatakan relatif aman jika memiliki ketidakberaturan massa. Namun, jika pada tingkat ke-2 dan 1 tidak memungkinkan untuk direncanakan sebagai tingkat yang akan memiliki ketidakberaturan massa, maka pada tingkat ke-6 atau tingkat ke-8 masih dapat menjadi pertimbangan.

Kesimpulan-kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian di atas hanya berlaku untuk pemodelan struktur dengan ketentuan dan asumsi yang dijelaskan pada Bab 3 atau dengan kata lain kesimpulan di atas belum bersifat umum. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan ketentuan dan asumsi yang berbeda.

## 6. SARAN

1. Memodelkan gedung menggunakan asumsi yang kurang lebih sama namun dengan tinggi yang berbeda
2. Memodelkan gedung menggunakan asumsi-asumsi yang berbeda untuk tinggi gedung yang relatif sama
3. Memodelkan ketidakberaturan massa hanya terjadi di beberapa ruangan (tidak di seluruh tingkat)

## DAFTAR PUSTAKA

- Christiawan, Ignatius, Andreas Triwiyono dan Hary Christady. (2008). "Evaluasi Kinerja dan Perkuatan Struktur Gedung Guna Alih Fungsi Bangunan (Studi Kasus: Perubahan Fungsi Ruang Kelas Menjadi Ruang Perpustakaan pada Lantai 11 Gedung G Universitas Semarang". Forum Teknik Sipil. No. XVIII
- Computer & Structure, Inc (CSI). (2017). *CSI Analysis Reference Manual*. America: Computer & Structure, Inc
- Departemen Pekerjaan Umum. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Sktruktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012)*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- FEMA 451. (2006). *NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*. Building Seismic Safety Council National Institute of Building Sciences. Washington D.C.
- Indarto, Himawan, Hanggoro Tri Cahyo A., dan Kukuh C. Adi Putra. (2013). *Aplikasi SNI Gempa 1726:2012 for Dummies*. Semarang: Shortcourse, Teknik Sipil UNNES - A Tribute to Bambang Dewasa
- Sadashiva, Vinod, Gregory A. MaeRae dan Bruce L. Deam. (2009). "Determination of Structural Irregularity Limits - Mass Irregularity Example". Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering. Vol. 42.