

RESPONS STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT DENGAN VARIASI KEKAKUAN KOLOM AKIBAT GEMPA BERDASARKAN SNI 03-1726-2012

Kiemberly Siajaya

Reky S. Windah, Banu D. Handono

Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: kiemberlysiajaya@gmail.com

ABSTRAK

Variasi konfigurasi yang diterapkan pada struktur seringkali menimbulkan ketidakberaturan vertikal maupun horisontal pada struktur. Bangunan dengan tinggi kolom yang berlebihan dan plat lantai yang tidak utuh mengikuti denah lantai dapat menyebabkan distribusi kekakuan vertikal sepanjang bangunan menjadi buruk. Variasi ini juga dapat menyebabkan munculnya torsi pada bangunan akibat pusat massa yang tidak tepat dengan pusat kekakuan. Struktur seperti ini perlu diperiksa terhadap ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak dan ketidakberaturan torsional, untuk mencegah kerusakan dan keruntuhan struktur serta agar tetap nyaman digunakan.

Model struktur yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan bangunan beton bertulang 12 lantai yang difungsikan sebagai hotel. Program ETABS digunakan untuk menganalisis respons dinamik struktur dengan metode Ragam Respons Spektrum. Standar peraturan pembebanan gempa yang digunakan yaitu SNI 03-1726-2012. Variasi struktur bangunan dengan ketidakberaturan distribusi kekakuan vertikal dimodelkan dengan adanya plat-plat lantai 1 yang dihilangkan sehingga ada kolom tertentu yang tingginya menjadi 2 kali tinggi lantai tipikal.

Hasil pemeriksaan ketidakberaturan pada lantai 1 adalah ditemukan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak di lantai 1 pada model g (model double height soft story). Sedangkan pada beberapa model dengan partial soft story terjadi tingkat lunak pada lantai 2. Pada semua model tidak ditemukan kemungkinan terjadinya ketidakberaturan torsi di semua lantai. Simpangan antar lantai maksimum ditemukan pada model g arah Y sebesar 62,80 mm. Nilai simpangan antar tingkat pada tingkat dengan ketidakberaturan tingkat lunak ditemukan setidaknya 2 kali lebih besar dibandingkan dengan simpangan antar lantai tingkat tersebut pada model struktur awal tanpa adanya variasi perbedaan kekakuan kolom. Penurunan kekakuan tingkat sebesar 44,55% (dibandingkan dengan kekakuan tingkat model awal) sudah menyebabkan ketidakberaturan vertikal tipe 1a pada model e2.

Kata kunci: gempa, analisis ragam respons spektrum, ETABS, ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak, ketidakberaturan torsi.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang sering dilanda gempa bumi. Kapan, dimana dan seberapa besar gempa akan terjadi belum bisa diprediksi dan diantisipasi. Untuk mencegah kerugian material dan jatuhnya korban jiwa, diperlukan metode perencanaan dan pelaksanaan struktur bangunan yang tahan gempa, terutama pada gedung bertingkat tinggi yang rentan terhadap gempa.

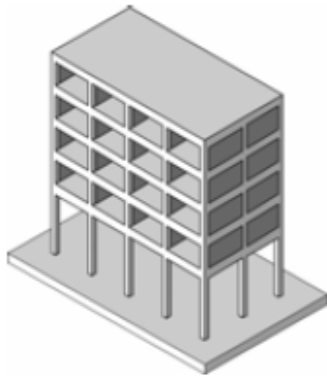
Kekakuan merupakan salah satu faktor yang menentukan respons suatu struktur terhadap beban gempa. Struktur bangunan dengan kekakuan yang baik dapat menahan beban, namun simpangan/ perpindahan yang terjadi relatif kecil

agar nyaman ditinggali. Setelah bencana gempa terjadi, sering ditemukan bangunan tinggi dengan distribusi kekakuan vertikal yang tidak baik mengalami kerusakan hingga keruntuhan, terutama sering ditemukan di kota-kota besar.

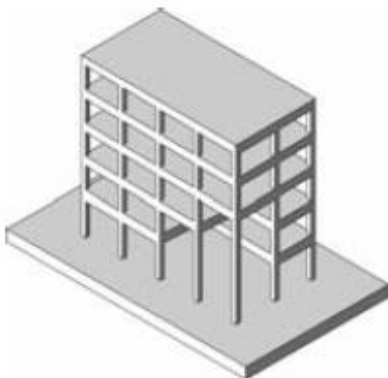
Tinggi tingkat yang tidak seragam menyebabkan distribusi kekakuan tidak merata di seluruh bangunan secara vertikal. Jika tinggi suatu tingkat berlebihan dibanding tinggi tingkat lainnya dan dimensi kolom sama pada semua tingkat, maka tingkat yang lebih tinggi akan lebih kecil kekakuannya. Tingkat tinggi dengan kekakuan lebih kecil berpotensi menjadi tingkat lunak (*soft story*). Sistem struktur seperti ini banyak ditemukan di lapangan sebagai akibat pertimbangan tata ruang maupun perancangan arsitekturnya. Tingkat lunak terutama banyak

ditemukan pada tingkat bawah bangunan (*soft first story*) yang digunakan sebagai area parkir, lobi, area rekreasi, lantai *mezzanine*, dan lainnya pada bangunan hotel, apartemen, maupun gedung perkantoran. Jika lantai lunak berada pada lantai paling bawah, maka kerusakan struktur dapat berakibat bangunan harus diruntuhkan seluruhnya walaupun kerusakan tingkat di atasnya masih bisa diperbaiki.

Tinggi lantai pada struktur dengan *soft first story* sering dibuat 2 kali tinggi tingkat di atasnya (tinggi semua kolom lantai bawah 2 kali lipat) untuk memenuhi kebutuhan dan estetika dari bangunan tersebut. Selain tinggi yang berlebihan, adanya interupsi balok (balok pada tingkat tidak menerus) yang disebabkan oleh bukaan pada plat bentang tertentu juga dapat memperkecil kekakuan kolom, sehingga mungkin mengakibatkan terjadinya tingkat lunak. Tingkat lunak yang terjadi disebut tingkat lunak sebagian (*partial soft story*), dimana hanya beberapa kolom saja yang lebih tinggi dan kekakuannya lebih kecil pada bentang dimana plat ditiadakan.



Gambar 1. Tingkat Bawah Bangunan dengan Tinggi 2 Kali Tinggi Tingkat Lainnya (*Double Height Soft Story*)



Gambar 2. Beberapa Kolom Menjadi Lebih Tinggi (*Partial Soft Story*) di Bagian Sudut

Ketidakteraturan kekakuan tingkat lunak dapat memicu terjadinya torsi (puntir) yang tidak terduga. Efek torsional pada bangunan dikaitkan dengan adanya perubahan kekakuan secara tiba-tiba yang mengakibatkan lantai tersebut menerima gaya yang besar. Ketidakteraturan torsi merupakan salah satu jenis ketidakteraturan horisontal, dapat dilihat dari terjadinya perbedaan yang signifikan antara simpangan antar lantai tingkat maksimum pada sebuah ujung struktur dengan simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Jika ketidakteraturan torsi juga terjadi, perlu diadakan langkah-langkah perbaikan lainnya untuk mencegah struktur kolom dan dinding pada bagian tepi mengalami pergerakan lebih besar dan menyebabkan kerusakan lebih besar.

Dalam penelitian ini dibandingkan hasil respons struktur bangunan dengan variasi kekakuan kolom akibat perbedaan tinggi beberapa atau semua kolom pada lantai 1. Berkurangnya kekakuan kolom menyebabkan lantai tersebut lebih fleksibel daripada tingkat di atasnya, sehingga dapat menyebabkan timbulnya tingkat lunak dan torsi pada bangunan. Peraturan yang digunakan yaitu SNI 03-1726-2012 untuk menghitung beban gempa serta memeriksa bangunan terhadap ketidakteraturan tingkat lunak dan ketidakteraturan torsi.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dibahas sebelumnya, maka permasalahan yang akan diteliti adalah bagaimanakah pengaruh adanya perbedaan kekakuan pada kolom lantai 1 akibat plat bentang tertentu dihilangkan terhadap respons struktur terhadap gempa dan kemungkinan terjadinya ketidakteraturan tingkat lunak serta ketidakteraturan torsi.

Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Struktur yang digunakan adalah struktur beton bertulang.
2. Tidak meninjau perancangan struktur bawah dan struktur sekunder serta tidak meninjau aspek ekonomi.
3. Variasi kekakuan kolom dimodelkan dengan adanya kolom dengan tinggi 2 (dua) kali lipat tinggi tingkat (akibat adanya bukaan bentang tertentu pada plat lantai 1) dengan jumlah serta letak yang berbeda-beda pada denah struktur lantai 1.
4. Struktur dianggap terjepit sempurna pada tanah.

5. Struktur direncanakan untuk hotel berlokasi di Kota Manado dengan jenis tanah sedang.
6. Analisis beban gempa berdasarkan peraturan gempa SNI 03-1726-2012 dan menggunakan metode Analisis Dinamis Ragam Spektrum Respons.
7. Pemodelan dan analisis gempa menggunakan program ETABS 2016.
8. Untuk sistem penahan gaya seismik digunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perbandingan respons struktur dengan variasi kekakuan kolom pada tingkat 1 serta memeriksa model struktur yang direncanakan terhadap ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b) dan ketidakberaturan torsi (ketidakberaturan horisontal tipe 1a dan 1b).

Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan pemahaman tentang analisis dinamik Ragam Spektrum Respons serta perhitungan beban gempa dengan SNI 03-1726-2012 dengan bantuan program ETABS 2016.
2. Mengetahui pengaruh adanya variasi kekakuan pada kolom-kolom tertentu pada lantai dasar struktur bangunan terhadap respons struktur akibat beban gempa.
3. Mengetahui kemungkinan terjadinya tingkat lunak (*soft story*) dan torsi pada struktur dengan adanya kolom-kolom lantai 1 yang memiliki kekakuan lebih kecil sesuai dengan peraturan SNI 03-1726-2012.

LANDASAN TEORI

Bangunan Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki risiko tinggi terhadap kejadian gempa bumi. Bencana gempa terjadi di Indonesia dengan kekuatan yang beragam. Gempa ringan umumnya tidak menyebabkan kerusakan, sedangkan gempa sedang hingga kuat dapat menimbulkan kerusakan ringan hingga berat. Untuk menghindari kerusakan parah dan korban jiwa, dibutuhkan bangunan yang dapat menahan gempa kuat, tetapi biaya pembangunannya relatif tidak

mahal. Agar struktur tetap berdiri tegak, hierarki kerusakan elemen struktur secara logika dapat ditentukan kolom harus lebih kuat daripada balok. Prinsip ini disebut prinsip Kolom Kuat Balok Lemah (*Strong Column and Weak Beam*).

Persyaratan untuk melakukan desain penampang beton bertulang yang direncanakan untuk memikul beban gempa ditentukan berdasarkan Kategori Desain Seismik (KDS) dari struktur tersebut. Untuk struktur dengan KDS lebih tinggi, diperlukan perencanaan detailing komponen struktur yang sesuai dengan SNI Standar Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non- Gedung berdasarkan KDS struktur.

Analisis Dinamis Ragam Respons Spektrum

Cara lain untuk menghitung/menentukan simpangan, gaya-gaya dinamik dan lainnya pada struktur berderajat kebebasan banyak (MDOF) adalah dengan memakai metode Respons Spektrum. Penentuan/hitungan dengan memakai metode Respons Spektrum merupakan metode yang lebih sederhana dan cepat disbanding dengan analisis riwayat waktu. Metode spektrum respon tidak termasuk dalam *Time History Analysis*, karena hanya nilai-nilai maksimum sajalah yang dapat dihitung. Hal ini dimungkinkan karena nilai-nilai spektrum respon (simpangan, kecepatan dan percepatan) tersebut adalah nilai-nilai maksimum.

Kekakuan Kolom dan Kekakuan Tingkat

Kekakuan adalah salah satu karakteristik struktur bangunan yang sangat penting disamping massa bangunan. Kekakuan tingkat dapat dihitung menurut model *shear building*. Pada pemodelan ini, balok lantai dianggap tetap horisontal baik sebelum maupun setelah terjadi penggoyangan. Plat dan balok lantai yang menyatu dan tetap horisontal sebelum dan sesudah peng-goyangan juga berarti bahwa balok mempunyai kekakuan tak terhingga. Sebelum dan sesudah peng-goyangan sama sekali tidak mengalami rotasi. Pada desain bangunan tahan gempa masih dimungkinkan memakai model kekakuan yang dihitung berdasarkan prinsip *shear building*, sekaligus memakai prinsip *lumped mass*.

Walaupun plat lantai dan balok cukup kaku, namun kenyataannya masih juga mempunyai fleksibilitas, artinya kekuatannya tidak tak terhingga. Adanya kekakuan tertentu pada balok ini semakin nyata manakala terdapat struktur dinding yang lebih kaku daripada balok dan

adanya retak-retak rambut atau retak-retak minor saat terjadi gempa.

Pada prinsipnya, balok yang semakin kaku akan mempunyai kemampuan dalam mengekang rotasi ujung kolom. Kemampuan pengekangan terhadap rotasi ujung kolom/join selanjutnya akan membuat kolom lebih kaku. Untuk itu kekakuan relatif balok terhadap kolom akan berpengaruh terhadap kekakuan kolom. Kekakuan kolom cara Muto, Blume, serta cara Aydin dan Gonen dapat menjadi alternatif cara perhitungan kekakuan tingkat dengan memperhitungkan kekakuan relatif balok. Perhitungan kekakuan balok akan lebih teliti apabila pengaruh plat lantai ikut diperhatikan sehingga diperhitungkan sebagai balok T.

Ketidakteraturan Tingkat Lunak pada Bangunan

Bangunan gedung dengan kekakuan vertikal yang tidak baik adalah bangunan gedung yang dalam tingkat-tingkatnya terdapat tingkat yang lunak (*soft story*). Tingkat lunak merupakan tingkat pada bangunan yang memiliki kekakuan lebih kecil secara signifikan, sehingga menjadi lebih fleksibel dibandingkan tingkat lainnya. Jika tidak diperhitungkan dalam perencanaan struktur, kerusakan yang tidak bisa diperbaiki lagi dapat terjadi pada elemen struktur dan non struktural pada lantai tersebut, dan mengakibatkan keruntuhan total bangunan.

Soft story bisa terjadi biasanya akibat tinggi tingkat yang berlebihan atau ukuran kolom yang terlalu kecil, karena mutu bahan kolom pada umumnya sama. Selain itu, bangunan dengan tingkat lunak juga dapat terjadi akibat pemasangan dinding yang tidak menerus, sehingga kekakuan tingkat lebih kecil dimana dinding tidak dipasang.

Pada peraturan SNI 03-1726-2012 Pasal 7.3.2.2 struktur yang digolongkan sebagai tingkat lunak jika terdapat suatu tingkat dengan kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tingkat di atasnya. Jika kekakuan lateral yang terjadi kurang dari 60 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 persen kekakuan rata-rata tingkat di atasnya maka struktur tersebut termasuk ketidakteraturan kekakuan tingkat lunak berlebihan.

Tingkat lunak juga muncul akibat yang memiliki kolom lebih sedikit dibandingkan tingkat di atas atau dibawahnya. Perbedaan tinggi kolom juga menyebabkan timbulnya tingkat

lunak. Perbedaan tinggi kolom dapat ditemukan pada bagian sudut gedung untuk menonjolkan bagian tersebut. Trotoar beratap (*covered sidewalk*) atau *arcade* juga merupakan bagian dari ketidakteraturan tingkat lunak. *Covered sidewalk* bisa dikembangkan menjadi tingkat lunak dengan tinggi dobel, yang memungkinkan adanya lantai *mezzanine* untuk penyimpanan dan tempat memamerkan barang dagangan yang lebih tinggi. Munculnya kolom yang sangat langsing dan tinggi lantai yang dobel menyebabkan distribusi massa, kekakuan dan tahanan yang tidak teratur.

Tingkat lunak pada lantai dasar (*soft first story*) merupakan ketidakteraturan tingkat lunak yang paling banyak ditemukan. Bagian bawah gedung yang lebih fleksibel akan menyerap lebih banyak energi dibandingkan bagian yang lebih kaku, dan sisanya akan diserap secara merata pada tingkat atas yang lebih kaku. Maka terjadi perpindahan (*interstory drift*) yang relatif besar antara plat bagian atas dan bagian bawah *soft story*, sehingga kolom pada lantai bawah ini akan mengalami deformasi lebih besar.

Ketidakteraturan Torsi pada Bangunan

Torsi merupakan efek momen termasuk putaran/puntiran yang terjadi pada penampang tegak lurus terhadap sumbu utama dari elemen. Beban lateral dapat mengakibatkan torsi pada bangunan ketika pusat beban tidak tepat dengan pusat kekakuan elemen vertikal beban lateral. Eksentrisitas diantara pusat kekakuan dan massa bangunan dapat menyebabkan gerakan torsi selama terjadinya gempa. Torsi ini dapat meningkatkan perpindahan pada titik ekstrim bangunan dan menimbulkan masalah pada elemen penahan lateral yang berlokasi pada tepi gedung. Torsi yang timbul pada bangunan dapat disebabkan oleh beberapa hal, yaitu bentuk bangunan, efek gangguan bangunan lain, dan pengaruh dinamis. Namun perencana seringkali tidak menghiraukan pengaruh tersebut. Efek torsi terjadi jika diafragma horisontal relatif kaku. Torsi tidak dapat dihapus, tetapi dapat diperkecil.

Struktur yang dirancang untuk kategori desain seismic C, D, E, atau F dimana terjadi ketidakteraturan torsi tipe 1a dan 1b, momen torsi bawaan setiap tingkat harus dikalikan dengan faktor pembesaran torsi. Pengaruh torsi perlu ditinjau pada perhitungan simpangan antar lantai jika ditemukan ketidakteraturan struktur vertikal kekakuan tingkat lunak.

Spektrum Respons Desain

Pada peraturan SNI 03-1726-2012, grafik

respon spektrum harus dirancang sendiri menggunakan parameter-parameter percepatan yang berbeda-beda untuk setiap wilayah gempa dan jenis tanah dimana bangunan berdiri. Kurva spektrum respon desain dibentuk setelah mendapat nilai S_{DS} dan S_{D1} , dengan mengacu pada ketentuan berikut:

Untuk perioda yang kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan disain, S_a , harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (1)$$

Untuk perioda lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan disain, S_a diambil menurut persamaan:

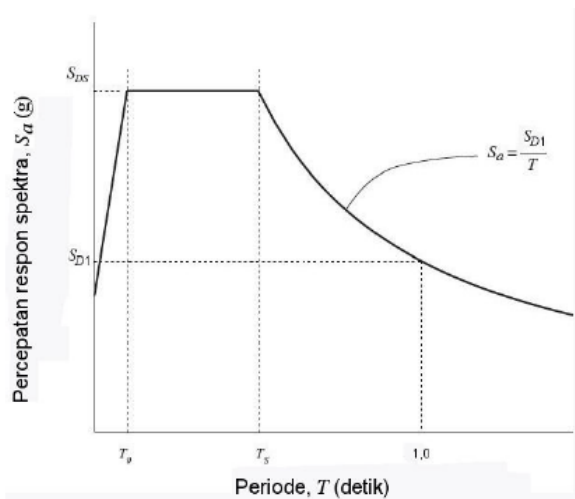
$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (4)$$

Keterangan:

- S_{DS} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda pendek
- S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda 1 detik.
- T = perioda getar fundamental struktur



Gambar 3. Spektrum Respons Desain

Simpangan Antar Lantai

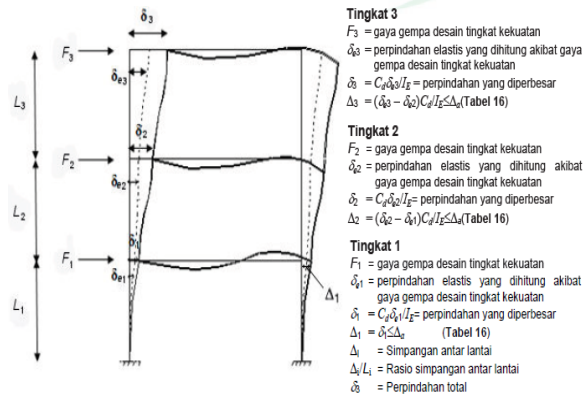
Dalam proses perencanaan struktur, maka simpangan lateral antar tingkat (*story drift*) harus selalu diperiksa untuk menjamin stabilitas struktur, mencegah kerusakan elemen-elemen struktur, serta untuk menjamin kenyamanan pengguna bangunan. Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan tingkat terbawah yang ditinjau.

Defleksi pusat massa di tingkat x (δ_x) harus dihitung sesuai persamaan berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (5)$$

dengan:

- C_d = faktor pembesaran defleksi
- Δ_{xe} = defleksi pada lokasi lantai yang ditinjau yang diakibatkan gaya gempa lateral
- I_e = faktor keutamaan struktur



Gambar 4. Perhitungan Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin (Δ_a) untuk semua tingkat.

Tabel 1. Simpangan Antar Lantai Ijin, Δ_a

Struktur	Kategori risiko		
	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.	0,020 h_{sx}	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser kantilever batu 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}

h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat x . Untuk sistem penahan gaya gempa yang terdiri dari hanya rangka momen pada struktur yang dirancang untuk kategori desain seismik D, E, atau F, simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi Δ_a/ρ untuk semua tingkat.

Ketidakteraturan Vertikal dan Horisontal Struktur

Struktur bangunan gedung harus diklasifikasikan sebagai beraturan atau tidak beraturan berdasarkan pada kriteria dalam pasal 7.3.2. Klasifikasi tersebut harus didasarkan pada

konfigurasi horisontal dan vertikal dari struktur bangunan gedung. Struktur bangunan yang dikategorikan memiliki ketidakberaturan vertikal atau horizontal harus memenuhi persyaratan tertentu, sehingga menjamin keamanan penggunaan bangunan gedung tersebut.

Tabel 2. Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 13	D, E, dan F
1b.	Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 60 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 13	E dan F D, E, dan F
2.	Ketidakteraturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150 persen massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 13	D, E, dan F
3.	Ketidakteraturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horisontal sistem penahan gaya gempa di semua tingkat lebih dari 130 persen dimensi horisontal sistem penahan gaya gempa tingkat di dekatnya.	Tabel 13	D, E, dan F
4.	Diskontinuitas Arah Bidang dalam Ketidakteraturan Elemen Penahan Gaya Lateral Vertikal didefinisikan ada jika pegeseran arah bidang elemen penahan gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen penahan di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 13	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Diskontinuitas dalam Ketidakteraturan Kuat Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 80 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat lateral tingkat adalah kuat lateral total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.	7.3.3.1 Tabel 13	E dan F D, E, dan F
5b.	Diskontinuitas dalam Ketidakteraturan Kuat Lateral Tingkat yang Berlebihan didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 65 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat tingkat adalah kuat total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 13	D, E, dan F B dan C D, E, dan F

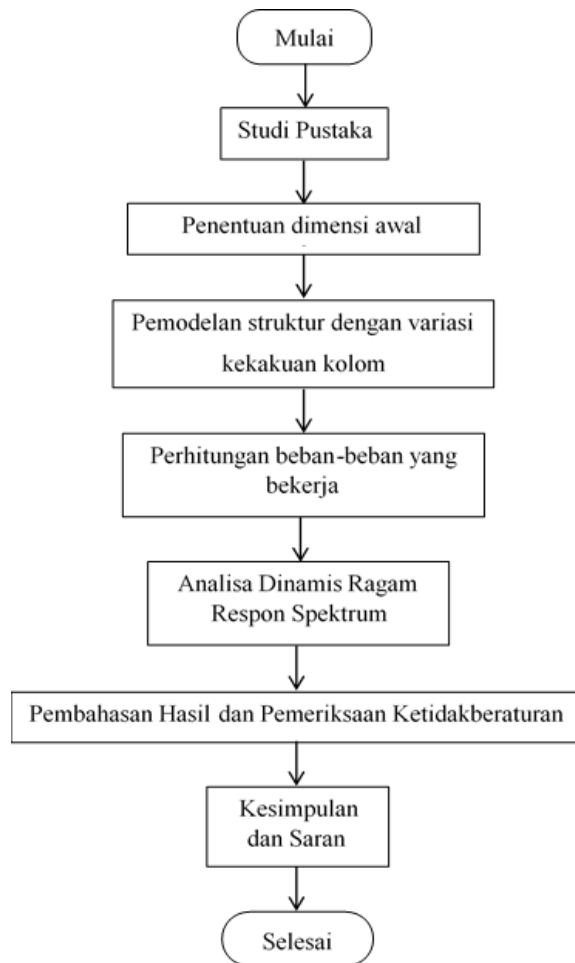
Tabel 3. Ketidakberaturan Horisontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakteraturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 13 12.2.2	D, E, dan F B, C, D, E, dan F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
1b.	Ketidakteraturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,4 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 13 12.2.2	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	Ketidakteraturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.	7.3.3.4 Tabel 13	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakteraturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 persen daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 persen dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 13	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakteraturan pegeseran melintang terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pegeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 13 12.2.2	B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	Ketidakteraturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem penahan gaya gempa.	7.5.3 7.7.3 Tabel 13 12.2.2	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

METODOLOGI PENELITIAN

Bagan Alir Penelitian

Bagan alir langkah-langkah penelitian diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5. Bagan Alir Penelitian

Data Struktur

Bangunan direncanakan berada di kota Manado (Lat: 1,4748305 dan Long: 124,8420794) dan berdiri di atas tanah sedang. Struktur bangunan beton bertulang dengan fungsi bangunan ditentukan sebagai Hotel. Sistem Struktur Penahan Gempa yang digunakan yaitu Struktur Rangka Penahan Momen Khusus (SRPMK).

Material

- Kuat tekan beton (f_c') : 30 MPa
- Modulus elastisitas beton : 25473 MPa
- Berat jenis beton (W) : 2400 kg/m³
- Tegangan leleh baja (f_y) : 400 MPa

Parameter Desain Struktur

- Jumlah tingkat : 12 tingkat
- Luas lantai tipikal : 576 m²
- Ketinggian antar lantai : 3,5 m
- Jumlah bentang arah x : 4
- Jarak antar bentang x : 6 m
- Jumlah bentang arah y : 3

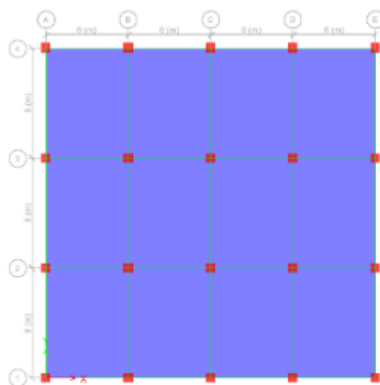
- Jarak antar bentang y : 8 m
- Penampang balok : 35/60
- Penampang kolom :
70/70 (untuk kolom lantai 1-3)
60/60 (untuk kolom lantai 4-6)
50/50 (untuk kolom lantai 7-9)
40/40 (untuk kolom lantai 10-12)
- Tebal plat lantai : 17 cm
- Tebal plat atap : 10 cm
- Kuat tekan beton (f_c') : 30 MPa
- Berat jenis beton (W) : 2400 kg/m³
- Tegangan leleh baja (f_y) : 400 MPa

Penentuan Variasi Model

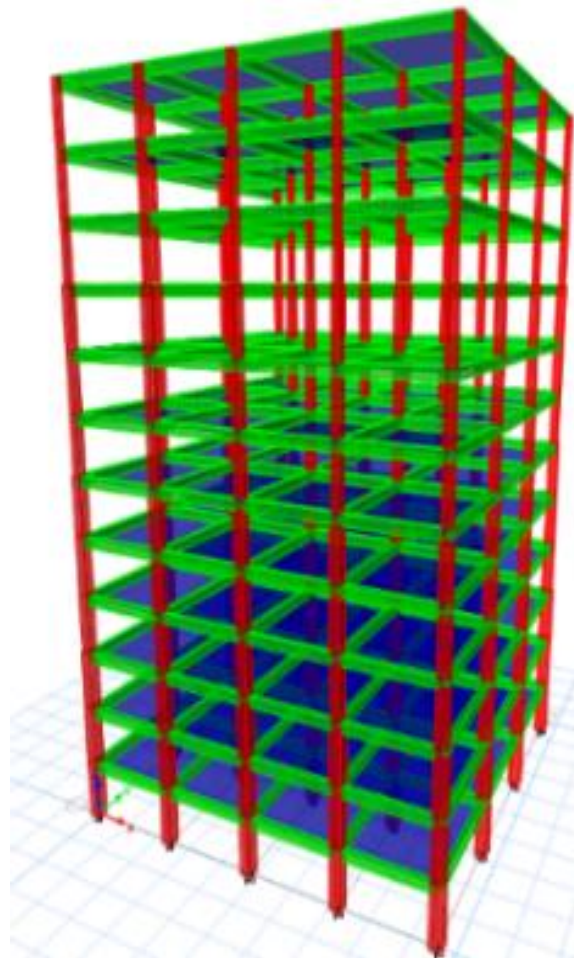
Model yang dibuat diperlihatkan pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Variasi Model Struktur

No.	Nama Model	Jumlah plat hilang	Kode plat yg hilang	Jumlah Kolom Tinggi	Kode Kolom yang hilang
1.	a	0	-	0	-
2.	b1	2	b,c	1	1C
3.	b2		c,d	2	1D, 1E
4.	b3		d,h		1E, 2E
5.	c1	4	b,c,f,g	2	1C, 2C
6.	c2		c,d,g,h	4	1D, 1E, 2D, 2E
7.	c3		a,b,c,d	5	1A-1E
8.	d1		b,c,e,f,g,h	2	1C, 2C
9.	d2	6	b,c,f,g,j,k	4	1C, 2C, 3C, 4C
10.	d3		a,b,c,e,f,g	6	1A-1C, 2A-2C
11.	d4		a,b,c,d,f,g		1A-1E, 2C
12.	d5		a,b,e,f,i,j	8	1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B
13.	e1		8	b,c,e,f,g,h,j,k	4
14.	e2	a,b,c,d,f,g,j,k		8	1A-1E, 2C, 3C, 4C
15.	e3	a,b,c,d,e,f,g,h		10	1A-1E, 2A-2E
16.	f1	10	a,b,c,d,e,f,g,h,j,k	12	1A-1E, 2A-2E, 3C, 4C
17.	f2		a,b,c,d,f,g,i,j,k,l		1A-1E, 2C, 3C, 4A-4E
18.	g	12	a-l	20	semua



Gambar 6. Denah Lantai 1 Model a



Gambar 7. Struktur 3 Dimensi Model a

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Kontrol Analisis Beban Gempa

Periode Struktur

Waktu getar alami struktur dapat diketahui secara otomatis pada program ETABS dengan memunculkan hasil ragam getar *mode 1* dan *mode 2* untuk masing-masing arah x dan y.

Apabila periode alami struktur diperoleh dari hasil analisis menggunakan *software*, maka periode alami struktur yang diambil (T) harus ditentukan dengan ketentuan sebagai berikut:

Jika $T_c > C_u T_a$, maka $T = C_u T_a$

Jika $T_a < T_c < C_u T_a$, maka $T = T_c$

Jika $T_c < T_a$, maka $T = T_a$

$$T_a = 0,0466 42^{0,9}$$

$$= 1,3468 \text{ detik}$$

$$T_{maks} = 1,4 (1,3468)$$

$$= 1,886 \text{ detik}$$

Tabel 5. Periode Getar Model Struktur

No.	Nama Model	Periode Getar Struktur (T_s)		Kondisi analisis periode getar struktur						Periode yang digunakan (T)	
		<i>cracked</i> (detik)		$T_c > T_{maks}$		$T_a < T_c < T_{maks}$		$T_c < T_a$		(detik)	
		Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty
1.	a	2,077	2,355	OK	OK					1,886	1,886
2.	b1	2,085	2,358	OK	OK					1,886	1,886
3.	b2	2,085	2,362	OK	OK					1,886	1,886
4.	b3	2,085	2,362	OK	OK					1,886	1,886
5.	c1	2,096	2,365	OK	OK					1,886	1,886
6.	c2	2,097	2,375	OK	OK					1,886	1,886
7.	c3	2,102	2,377	OK	OK					1,886	1,886
8.	d1	2,1	2,384	OK	OK					1,886	1,886
9.	d2	2,115	2,374	OK	OK					1,886	1,886
10.	d3	2,387	2,113	OK	OK					1,886	1,886
11.	d4	2,115	2,386	OK	OK					1,886	1,886
12.	d5	2,117	2,391	OK	OK					1,886	1,886
13.	e1	2,12	2,393	OK	OK					1,886	1,886
14.	e2	2,137	2,398	OK	OK					1,886	1,886
15.	e3	2,135	2,41	OK	OK					1,886	1,886
16.	f1	2,154	2,422	OK	OK					1,886	1,886
17.	f2	2,149	2,421	OK	OK					1,886	1,886
18.	g	2,187	2,455	OK	OK					1,886	1,886

Bisa dilihat dari tabel 5. diatas, periode getar alami struktur yang didapat dengan bantuan program kondisi retak pada penampang (lebih dari periode alami batas atas yang disyaratkan, sehingga periode getar alami yang dipakai adalah $T = C_u T_a$ yaitu 1,886 detik.

Partisipasi Massa

Menurut SNI 03-1726-2002 Pasal 7.2.1, jumlah pola getar yang ditinjau dalam penjumlahan respons ragam harus mencakup partisipasi massa sekurang-kurangnya 90%.

Dari tabel 6. terlihat bahwa partisipasi massa sebesar 90% sudah tercapai pada mode ke-5 pada sebagian besar model struktur yang memiliki kolom 7 m, sedangkan model lainnya tercapai pada mode ke-7 dan ke-8.

Tabel 6. Partisipasi massa Model Struktur Tercapai 90%

No.	Nama Model	Kode plat yang hilang	Jumlah Kolom Tinggi	Tercapai partisipasi massa 90%		
				Mode ke-	% Partisipasi Massa	
					Sum x	Sum y
1.	a1	Tidak ada	0	8	91,22	90,94
2.	b1	b,c	1	8	93,36	93,08
3.	b2	c,d	2	8	93,44	93,2
4.	b3	d,h	2	8	93,45	93,19
5.	c1	b,c,f,g	2	7	90,17	93,64
6.	c2	c,d,g,h	4	5	90,28	90,02
7.	c3	a,b,c,d	5	5	90,23	90,2
8.	d1	b,c,e,f,g,h	2	5	90,74	90,65
9.	d2	b,c,f,g,j,k	4	5	91,24	90,51
10.	d3	a,b,c,e,f,g	6	5	91,06	90,87
11.	d4	a,b,c,d,f,g	6	5	90,97	90,88
12.	d5	a,b,e,f,i,j	8	5	91,55	90,98
13.	e1	b,c,e,f,g,h,j,k	4	5	91,88	91,45
14.	e2	a,b,c,d,f,g,j,k	8	5	92,4	91,79
15.	e3	a,b,c,d,e,f,g,h	10	5	91,92	92,05
16.	f1	a,b,c,d,e,f,g,h,j,k	12	5	93,26	92,86
17.	f2	a,b,c,d,f,g,i,j,k,l	12	5	93,38	92,86
18.	g	semua	20	5	94,92	94,31

Gaya Geser Dasar

Gempa rencana yang diterapkan pada struktur gedung dalam analisis yang dilakukan ini dibuat berdasarkan SNI 03-1726-2012 Pasal 5.8.2, dimana pengaruh beban gempa dalam arah utama dihitung sebesar 100% dan pengaruh gempa dalam arah tegak lurus arah utama dihitung sebesar 30% dan terjadi bersamaan.

Nilai gaya geser dasar struktur gedung dalam suatu arah tertentu tidak boleh diambil kurang dari 85% nilai respons struktur dengan analisis gempa statis ekuivalen yang merupakan gaya geser dasar ragam pertama, sesuai dengan SNI 03-1726-2012 Pasal 7.9.4.1. Nilai gaya geser dasar ragam pertama diperoleh dengan bantuan program ETABS.

Apabila persyaratan gaya geser gempa dinamik belum terpenuhi, maka besarnya gaya geser dinamik harus dikalikan dengan faktor skala $0,85 V/V_t$.

Hasil gaya geser yang didapat cenderung semakin kecil seiring lebih banyaknya jumlah plat yang dihilangkan dan semakin banyaknya kolom tinggi yang terjadi. Model dengan jumlah plat yang dihilangkan dan jumlah kolom tinggi yang sama menunjukkan gaya geser dasar yang sama.

Tabel 7. Gaya Geser Dasar Analisis Ragam Respons Spektrum

No.	Nama Model	Kode plat yang hilang	Jumlah Kolom Tinggi	Gaya Geser Dasar (kN)			
				RSP x		RSP y	
				Fx	Fy	Fx	Fy
1.	a1	Tidak ada	0	1885,4561	502,0327	637,2996	1885,4561
2.	b1	b,c	1	1813,8211	484,6894	610,6968	1813,8211
3.	b2	c,d	2	1812,2450	484,0768	610,6644	1812,2450
4.	b3	d,h	2	1812,2450	482,5479	612,5831	1812,2450
5.	c1	b,c,f,g	2	1800,0175	482,0157	605,2046	1800,0176
6.	c2	c,d,g,h	4	1796,8654	480,5171	605,6393	1796,8654
7.	c3	a,b,c,d	5	1795,2893	487,6688	594,8212	1795,2893
8.	d1	b,c,e,f,g,h	2	1785,2149	476,4085	602,0659	1785,2148
9.	d2	b,c,f,g,j,k	4	1784,1811	476,2683	601,5458	1784,1811
110.	d3	a,b,c,e,f,g	6	1781,4858	481,1866	594,7724	1781,4858
11.	d4	a,b,c,d,f,g	6	1781,4858	486,4623	587,1622	1781,4858
12.	d5	a,b,e,f,i,j	8	1769,3783	468,5739	601,3202	1769,3784
13.	e1	b,c,e,f,g,h,j,k	4	1765,6494	469,1489	598,0545	1765,6494
14.	e2	a,b,c,d,f,g,j,k	8	1762,9541	473,4361	590,8309	1762,9541
15.	e3	a,b,c,d,e,f,g,h	10	1762,9542	485,8063	575,7864	1762,9541
16.	f1	a,b,c,d,e,f,g,h,j,k	12	1747,1177	470,4254	583,9774	1747,1177
17.	f2	a,b,c,d,f,g,i,j,k,l	12	1747,1177	463,8251	592,2876	1747,1177
18.	g	semua	20	1724,8370	437,3615	585,449	1724,8370

Perpindahan dan Simpangan Antar Tingkat

Perpindahan yang terjadi di setiap tingkat struktur dengan metode analisis spektrum respons ragam berdasarkan SNI 03-1726-2012 Pasal 7.9.3 merupakan perpindahan yang diperbesar (δ). Perpindahan pada tingkat paling atas merupakan perpindahan total struktur bangunan yang ditinjau. Sedangkan simpangan antar tingkat pada suatu lantai diperoleh dari selisih perpindahan (yang diperbesar) lantai tersebut dengan lantai di bawahnya.

Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a) seperti yang disebutkan dalam SNI 03-1726-2012 Pasal 7.12.1. Sesuai dalam SNI 03-1726-2012 Pasal 7.12.1.1, untuk sistem penahan gaya gempa yang terdiri dari hanya rangka momen pada struktur yang dirancang untuk kategori desain seismki D, E, atau F, simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi Δ_a/ρ untuk semua tingkat.

Simpangan antar lantai tingkat izin, Δ_a untuk tingkat dengan tinggi 3,5 m,

$$\Delta_a = 0,02 h_{sx} / \rho$$

$$\Delta_a = \frac{0,02 (3500)}{1,3}$$

$$\Delta_a = 53,85 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai tingkat izin, Δ_a untuk tingkat dengan tinggi 7 m (model g lantai 1),

$$\Delta_a = 0,02 h_{sx} / \rho$$

$$\Delta_a = \frac{0,02 (7000)}{1,3}$$

$$\Delta_a = 107,69 \text{ mm}$$

Tabel 8. Perpindahan/Simpangan pada Tingkat 1

No.	Nama Model	Kode plat yang hilang	Jumlah Kolom Tinggi	Perpindahan Lt. 1	
				Arah X (mm)	Arah Y (mm)
1.	a1	Tidak ada	0	14,5255	18,073
2.	b1	b,c	1	15,4055	16,6485
3.	b2	c,d	2	15,62	17,6275
4.	b3	d,h	2	15,0205	17,8365
5.	c1	b,c,f,g	2	16,434	17,0335
6.	c2	c,d,g,h	4	16,852	19,096
7.	c3	a,b,c,d	5	16,28	17,9685
8.	d1	b,c,e,f,g,h	2	16,8135	18,2655
9.	d2	b,c,f,g,j,k	4	15,818	17,4625
10.	d3	a,b,c,e,f,g	6	18,9475	19,8935
11.	d4	a,b,c,d,f,g	6	17,27	18,447
12.	d5	a,b,e,f,i,j	8	15,9335	18,4965
13.	e1	b,c,e,f,g,h,j,k	4	16,0435	18,7495
14.	e2	a,b,c,d,f,g,j,k	8	17,897	18,964
15.	e3	a,b,c,d,e,f,g,h	10	15,2075	19,8715
16.	f1	a,b,c,d,e,f,g,h,j,k	12	17,0335	20,4655
17.	f2	a,b,c,d,f,g,i,j,k,l	12	17,9355	20,823
18.	g	semua	20	54,1035	62,8045

Perpindahan/simpangan paling besar yang terjadi pada lantai 1 terjadi pada model g (*double height soft story*) sebesar 54,1035 mm untuk arah X dan 62,8045 untuk arah Y, dimana semua kolomnya memiliki tinggi 7 m, berbeda secara signifikan dibandingkan model lainnya. Perpindahan paling kecil pada lantai 1 terjadi pada model a sebesar 14,5255 mm untuk arah X serta

pada model b1 sebesar 16,6485 mm untuk arah Y (*partial soft story*).

Tabel 9. Perpindahan Maksimum Struktur

No.	Nama Model	Kode plat yang hilang	Jumlah Kolom Tinggi	Denah Lantai 1	Perpindahan Maks.	
					Arah X (mm)	Arah Y (mm)
1.	a1	Tidak ada	0		273,174	347,017
2.	b1	b,c	1		282,315	336,5505
3.	b2	c,d	2		283,9705	342,1165
4.	b3	d,h	2		276,507	344,113
5.	c1	b,c,f,g	2		287,199	336,259
6.	c2	c,d,g,h	4		290,3065	349,612
7.	c3	a,b,c,d	5		310,409	338,195
8.	d1	b,c,e,f,g,h	2		288,178	337,964
9.	d2	b,c,f,g,j,k	4		268,136	335,7255
11.	d3	a,b,c,e,f,g	6		305,2885	349,3215
11.	d4	a,b,c,d,f,g	6		314,9685	338,195
12.	d5	a,b,e,f,i,j	8		266,5355	355,7675
13.	e1	b,c,e,f,g,h,j,k	4		266,893	336,9355
14.	e2	a,b,c,d,f,g,j,k	8		295,2785	337,3865
15.	e3	a,b,c,d,e,f,g,h	10		328,581	340,758
16.	f1	a,b,c,d,e,f,g,h,j,k	12		305,778	340,296
17.	f2	a,b,c,d,f,g,i,j,k,l	12		270,1545	339,724
18.	g	semua	20		274,2245	343,3265

Perpindahan maksimum yang terjadi pada tingkat 12 paling besar terjadi pada model e3 sejauh 328,581 mm untuk arah X dan pada model d3 sejauh 349,3215 mm untuk arah Y. Sedangkan perpindahan maksimum paling kecil sejauh 266,893 mm pada model e1 untuk arah X dan sejauh 336,259 mm pada model c2 untuk arah Y.

Analisis Ketidakberaturan Tingkat Lunak dan Ketidakberaturan Torsi berdasarkan SNI 03-1726-2012

Kontrol Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (*soft story*) dimasukkan pada kategori ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b, ditentukan berdasarkan kekakuan lateralnya menurut SNI 03-1726-2012. Jika ditemukan tingkat dengan ketidakberaturan tingkat lunak, perlu dilakukan langkah-langkah perbaikan yang sesuai seperti tertera dalam SNI, sehingga menjamin keamanan penggunaan bangunan gedung tersebut.

Berdasarkan kekakuan lateral tingkat, hanya model g (model dengan tinggi semua kolom lantai 1 sebesar 7m) yang memenuhi syarat terjadinya tingkat lunak pada lantai 1, dan termasuk dalam ketidakberaturan tipe 1b (ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan).

Model dengan tingkat lunak yang dimodelkan dengan adanya beberapa kolom pada lantai 1 dengan tinggi 7 m menunjukkan timbulnya tingkat lunak pada lantai 2 struktur bangunan pada model e2, e3, f1, dan model f2

(model dengan *partial soft story*). Jenis ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak yang terjadi pada tingkat 2 termasuk tipe 1a untuk arah X model e2, tipe 1a untuk arah X dan tipe 1b untuk arah Y pada model e2, serta tipe 1b untuk arah X dan Y pada model f1 serta f2.

Hasil perbandingan antara jumlah kolom lantai 1 yang memiliki tinggi 2 kali tinggi tingkat (7 m) dengan kekakuan tingkat 1 diperoleh rata-rata penurunan kekakuan tingkat sebesar 6,93% pada arah X dan 5,71% pada arah Y. Rata-rata penurunan kekakuan tingkat 1 pada kedua arah yaitu 6,1%.

Tinggi kolom pada lantai 1 juga mempengaruhi kekakuan tingkat 2 sehingga muncul tingkat lunak pada beberapa model. Hasil perbandingan antara jumlah kolom lantai 1 yang memiliki tinggi 2 kali tinggi tingkat (7 m) dengan kekakuan tingkat 2 diperoleh rata-rata penurunan kekakuan tingkat sebesar 5,27% pada arah X dan 4,73 pada arah Y. Rata-rata penurunan kekakuan tingkat 2 pada kedua arah yaitu 5%.

Tabel 10. Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat dan Kekakuan Tingkat Ketidakberaturan Tingkat Lunak Lantai 1

No	Nama Model	Tipe Ketidakberaturan Vertikal Tingkat Lunak		Simpangan Antar Lantai Tingkat 1 (mm)		Persentase Peningkatan Simpangan Antar Tingkat (%)		Kekakuan Tingkat 1 (kN/m)		Persentase Penurunan Kekakuan Tingkat (%)	
		Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
1.	a	OK	OK	14,5255	18,073	272,47	247,50	72976,96	59811,88	75,93	74,74
	g	1b	1b	54,1035	62,8045			175658,94	151268,637		

Tabel 11. Perbandingan Simpangan Antar Lantai Tingkat dan Kekakuan Tingkat Ketidakberaturan Tingkat Lunak Lantai 2

No	Nama Model	Tipe Ketidakberaturan Vertikal Tingkat Lunak		Simpangan Antar Lantai Tingkat 2 (mm)		Persentase Peningkatan Simpangan Antar Tingkat (%)		Kekakuan Tingkat 2 (kN/m)		Persentase Penurunan Kekakuan Tingkat (%)	
		Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
1.	a	OK	OK	14,5255	18,073	149,45	99,94	389923,36	307116,93	44,55	39,09
	e2	1a	OK	36,234	36,135			216204,474	187074,311		
2.	a	OK	OK	14,5255	18,073	216,89	103,90	389923,36	307116,93	47,81	49,82
	e3	1a	1b	46,0295	36,85			203519,436	154099,891		
3.	a	OK	OK	14,5255	18,073	182,89	108,03	389923,36	307116,93	62,08	60,47
	f1	1b	1b	41,0905	37,599			147859,265	121403,717		
4.	a	OK	OK	14,5255	18,073	112,68	105,14	389923,36	307116,93	60,85	57,64
	f2	1b	1b	30,8935	37,0755			152641,67	130083,364		

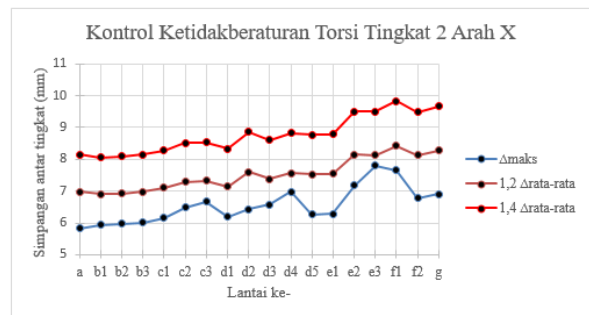
Dilihat dari tabel 10 dan 11, persentase peningkatan simpangan antar tingkat % (dibandingkan dengan simpangan antar tingkat model awal) yang paling kecil, dimana terjadi tingkat lunak berlebihan terjadi di lantai 2 pada model e3 arah Y sebesar 103,9%. Sedangkan persentase peningkatan simpangan antar tingkat yang paling besar, dimana terjadi tingkat lunak berlebihan terjadi di lantai 1 pada model g arah X sebesar 272,47%.

Penurunan kekakuan tingkat sebesar 44,55% (dibandingkan dengan kekakuan tingkat model awal) di tingkat 2 pada model e2 arah X menyebabkan ketidakberaturan vertikal tipe 1a.

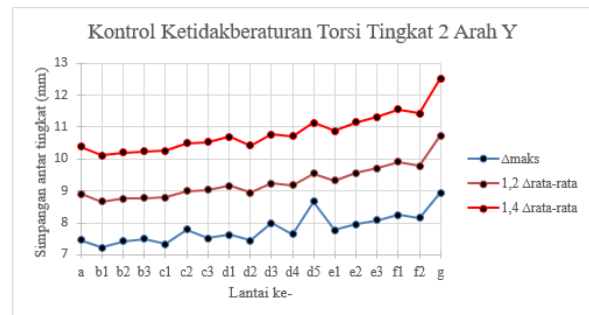
Persentase penurunan kekakuan tingkat yang paling besar terlihat di tingkat 1 pada model g arah X sebesar 75,93%, dimana terjadi ketidakberaturan vertikal tipe 1b.

Kontrol Ketidakberaturan Torsi

Adanya ketidakberaturan torsi (torsi tak terduga) ditunjukkan oleh simpangan antar lantai tingkat maksimum di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur untuk ketidakberaturan horisontal tipe 1a, serta lebih dari 1,4 kali untuk ketidakberaturan horisontal tipe 1b. Persyaratan ini berlaku untuk struktur dengan diafragma kaku atau setengah kaku.



Gambar 8. Kontrol Ketidakberaturan Torsi Tingkat 2 Arah X



Gambar 9. Kontrol Ketidakberaturan Torsi Tingkat 2 Arah Y

Dilihat dari grafik diatas, model yang paling mungkin terjadi torsi di tingkat 2 adalah model e3 untuk arah X, dimana 8 plat yang dihilangkan dan 10 kolom yang tingginya menjadi 2 kali tinggi tingkat saling berdekatan sepanjang arah X. Sementara model d5 adalah model yang paling mungkin terjadi torsi di lantai 2, dimana pada model d5 6 plat yang dihilangkan dan 8 kolom yang tingginya 2 kali tinggi tingkat saling berdekatan sepanjang arah Y. Keduanya merupakan model dengan tingkat lunak sebagian.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak yang berlebihan (tipe 1b) ditemukan pada lantai 1 model g dengan tinggi semua kolom lantai pertama 2 kali tinggi tingkat (7 m).
2. Adanya plat lantai dan balok tertentu yang dihilangkan mengakibatkan beberapa kolom lantai 1 menjadi lebih tinggi (partial soft story) sehingga timbul ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak di lantai 2 pada model e2, e3, f1, dan model f2, bervariasi dari ketidakberaturan vertikal tipe 1a hingga 1b.
3. Setiap penambahan kolom lantai 1 yang memiliki tinggi 2 kali tinggi tingkat lainnya menyebabkan kekakuan tingkat di lantai 1 menurun rata-rata sebesar 6,1% untuk arah X dan Y, sedangkan penurunan kekakuan tingkat di lantai 2 rata-rata sebesar 5% untuk arah X dan Y.
4. Simpangan antar tingkat pada model dengan ketidakberaturan tingkat lunak yang terjadi pada lantai 1 dan lantai 2, meningkat lebih dari 100% dibanding simpangan antar tingkat model struktur awal. Penurunan kekakuan tingkat sebesar 44,55% di tingkat 2 pada model e2 arah X sudah cukup untuk menyebabkan ketidakberaturan vertikal tipe 1a.
5. Model yang berpotensi paling besar untuk terjadinya torsi pada tingkat 2 bangunan adalah model-model dimana plat-plat dan balok-balok yang dihilangkan dan kolom-kolom yang memiliki tinggi 7m terletak berdekatan dan terkumpul pada arah X atau arah Y.
6. Tidak semua model dimana ada beberapa kolom dengan tinggi 2 kali tinggi lantai lainnya (partial soft story) dapat digolongkan sebagai bangunan dengan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak, karena nilai simpangan antar tingkat tidak memenuhi

persyaratan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak sesuai dengan peraturan SNI 03-1726-2012.

7. Pengurangan luasan plat lantai tidak signifikan terhadap kemungkinan terjadinya tingkat lunak. Terjadinya interupsi balok akibat plat bentang tertentu yang dihilangkan lebih berpengaruh terhadap kekakuan kolom sehingga mempengaruhi kekakuan tingkat dan perpindahan struktur serta simpangan antar tingkat yang menentukan timbulnya tingkat lunak atau tidak.

Saran

Beberapa saran dari penulis mengenai hal-hal yang perlu diperhatikan dalam penelitian:

1. Standar-standar yang digunakan untuk perencanaan dan analisis bangunan gedung tahan gempa disesuaikan dengan kebutuhan model struktur yang ada serta persyaratan yang memadai.
2. Sangat penting untuk memeriksa pengaruh variasi-variasi yang dibuat pada bangunan terhadap beban gempa dan disesuaikan perencanaan serta pelaksanaannya sesuai dengan peraturan yang ada.
3. Studi mengenai ketidakberaturan tingkat lunak perlu dicoba dengan berbagai variasi konfigurasi bangunan yang berbeda dan atau dengan variasi pada elemen struktur/nonstruktural lain yang menimbulkan perbedaan kekakuan lateral tingkat. Serta perlu diperiksa terhadap kemungkinan terjadinya ketidakberaturan torsi akibat adanya tingkat lunak tersebut.
4. Variasi yang dapat diterapkan pada model untuk studi selanjutnya seperti kolom-kolom tertentu pada denah lantai yang dihilangkan atau adanya elemen inclined shearwall atau ramp yang dipasang antara tingkat bangunan yang banyak diterapkan pada bangunan baru untuk memenuhi kebutuhan penyandang difabel atau sebagai akses parkir kendaraan pada tingkat-tingkat atas bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 03-1726-2012)*. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 03-1727-2013)*. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2013)*. Jakarta.

- Computers & Structures, Inc. 2016. *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE, CSiBridge*. Berkeley, California.
- Guevara-Perez, Teresa. 2012. "Soft Story" and "Weak Story" in Earthquake Resistant Design: A Multidisciplinary Approach. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Building-WCEE. pp. 518-519
- Setiawan, Agus. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang (Berdasarkan SNI 2847-2013)*. Erlangga. Jakarta
- Tumilar, Steffie. 2012. *Prosedur Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung Berdasarkan SNI 03-1726-201x*. Manado.