

KERUNTUHAN PROGRESIF GEDUNG STRUKTUR BERATURAN DAN TIDAK BERATURAN

Ardian Yolanda¹⁾, Zulfikar Djauhari²⁾, Ridwan²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, ²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil
Program Studi Teknik Sipil S1, Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas Km. 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293
Email : ardian.yolanda@student.unri.ac.id

ABSTRACT

This research aimed to examine the progressive collapse of regular and irregular structural building. This research conducted by analyzing the structural elements that were first destroyed due to addition of gravity load and lateral load of the earthquake. This analysis conducted by removing one or more critical columns with General Services Administration (GSA) guide. Examination of structural strength using finite element software based Demand Capacity Ratio (DCR) value. The regular structure will have progressive collapse if the $DCR > 2$ and irregular structure will have progressive collapse if the $DCR > 1,5$. Progressive collapse occurs when removal of five critical columns on the side of the regular structure, with the largest of DCR value is 4,665. In irregular structure, progressive collapse occurs when removal of four critical columns in middle of horizontal side of structure with the largest of DCR value is 3,44375. The analysis results show progressive collapse did not occurs when removal of single column from GSA guide. Progressive collapse only occurs after removal of some critical columns in pushover analysis results. This show that the structure is still capable to carrying the load when remove single column, but the structure is unable to carrying the load when some critical column were removed. Based on the deformation, the regular and irregular structures analyzed have progressive collapse of domino type. The value of robustness indicator is almost equal one, that indicated the load distribution is normal despite of the damage structure.

Keywords : Progressive collapse, irregular structure, regular structure, GSA, DCR

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya teknologi dalam bidang konstruksi, untuk memenuhi aspek estetika bangunan dan akibat keterbatasan lahan, konstruksi gedung bertingkat tidak hanya didesain dengan struktur beraturan berbentuk persegi maupun persegi panjang, namun juga didesain dengan struktur tidak beraturan. Menurut SNI 1726-2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non gedung, struktur beraturan dan tidak beraturan diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan tersebut.

Runtuhnya menara kembar World Trade Center (WTC) di New York pada tanggal 11 September 2001 menjadi fenomenal karena sifat keruntuhannya yang bersifat progresif. Dampak dari tabrakan pesawat yang memicu kebakaran pada sebagian gedung menyebabkan kegagalan lokal dari struktur di area tabrakan pesawat. Kegagalan struktur tersebut secara bertahap memberikan beban vertikal kepada lantai di bawahnya sehingga mengakibatkan keruntuhan progresif pada gedung.

Berdasarkan tipe keruntuhan yang terjadi, keruntuhan progresif dibedakan menjadi *pancake-type*, *zipper-type*, *domino-type*, *section-type*, *instability-type* dan *mixed-type collapse* (Starossek, 2009).

Keruntuhan gedung WTC yang bertipe *pancake* menyebabkan peluang untuk menyelamatkan diri menjadi kecil karena keruntuhan terjadi dalam hitungan detik. Berbeda dengan *domino-type* yang terjadi secara bertahap yang membuat peluang untuk menyelamatkan diri lebih besar. Untuk itu perlunya kajian lebih lanjut mengenai keruntuhan progresif ini karena berbeda jenis struktur akan berbeda pula perilaku struktur yang terjadi.

Menurut SNI 1726-2002 sebelum digantikan oleh SNI 1726-2012, zonasi gempa Kota Pekanbaru termasuk dalam wilayah 2 dengan nilai $S_{DS}=0,38g$ dan $S_{D1}=0,23g$. Namun berdasarkan SNI 1726-2012 untuk tanah sedang pada Kota Pekanbaru mempunyai nilai $S_{DS}=0,421g$ dan $S_{D1}=0,337g$. Hal ini menunjukkan spektral gempa Kota Pekanbaru berada di atas zonasi gempa wilayah gempa 2 sehingga Kota Pekanbaru berpotensi mengalami gempa yang dapat meruntuhkan bangunan bertingkat hingga dapat menyebabkan keruntuhan gedung secara progresif.

Seiring berkembangnya desain struktur gedung beraturan dan tidak beraturan, Kota Pekanbaru yang tidak terbebas dari gempa, serta beberapa karakteristik keruntuhan progresif pada gedung, mendasari pentingnya penelitian ini untuk mengetahui fenomena keruntuhan progresif pada gedung bertingkat struktur beraturan dan tidak beraturan.

1.3 Perumusan Masalah

Semakin maju dan berkembang suatu wilayah, pembangunan gedung bertingkat semakin meningkat. Gedung bertingkat tidak hanya didesain dengan struktur beraturan berbentuk persegi maupun persegi panjang, namun juga didesain dengan struktur tidak beraturan. Gedung bertingkat tersebut berpotensi mengalami keruntuhan gedung akibat kelebihan beban gravitasi maupun beban gempa, bahkan dapat menyebabkan keruntuhan gedung secara progresif. Oleh karena itu, perlu

dilakukan penelitian dengan menganalisis keruntuhan progresif pada gedung bertingkat struktur beraturan dan tidak beraturan, dengan menganalisis elemen struktur yang terlebih dahulu hancur akibat penambahan beban gravitasi dan akibat beban lateral gempa, dengan menghilangkan salah satu atau beberapa elemen struktur bangunan gedung tersebut.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku keruntuhan progresif gedung struktur beraturan dan tidak beraturan.

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- Memberikan penguatan pada analisis struktur bangunan khususnya untuk memprediksi keruntuhan progresif struktur beraturan dan tidak beraturan.
- Memberikan informasi dalam perencanaan bangunan agar dapat memprediksi karakteristik keruntuhan progresif komponen struktur gedung beraturan dan tidak beraturan.
- Memberikan informasi pola keruntuhan gedung jika terjadi kasus pembongkaran struktur bangunan beraturan dan tidak beraturan.
- Memberikan kontribusi sebagai bahan referensi tentang karakteristik keruntuhan progresif struktur bangunan beton beraturan dan tidak beraturan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan

Berdasarkan SNI 1726-2012 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non Gedung, struktur bangunan gedung diklasifikasikan sebagai gedung beraturan dan tidak beraturan. Klasifikasi tersebut didasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan gedung. Secara khusus pada penelitian ini hanya membatasi masalah ketidakberaturan struktur dalam

arah horizontal seperti dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur Gedung

No	Tipe Dan Penjelasan Ketidakberaturan
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 dimana diafragmanya kaku atau setengah kaku.
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.
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.
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.
4	Ketidakteraturan pergeseran melintang terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal.
5	Ketidakteraturan system nonparalel didefininisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama

Sumber: SNI 1726-2012

2.2 Keruntuhan Progresif

Keruntuhan progresif (*progressive collapse*) merupakan suatu keruntuhan yang disebabkan oleh keruntuhan dari satu atau lebih elemen struktur yang menyebabkan keruntuhan beruntun dari elemen sebelahnya sehingga mengakibatkan keruntuhan struktur secara keseluruhan atau sebagian besar dari struktur tersebut (Starossek, 2009).

General Services Administration (GSA) memberikan pedoman untuk keruntuhan progresif. Pedoman ini

bertujuan untuk mengurangi potensi keruntuhan progresif pada gedung kantor pemerintahan, menilai potensi keruntuhan progresif pada gedung kantor pemerintahan yang sudah ada, serta membantu dalam proses pengembangan dalam peningkatan fasilitas. Skenario dalam pedoman ini yaitu menghapus kolom pada lantai satu. Lokasi yang disarankan dalam penghapusan kolom adalah sebagai berikut.

1. Menghilangkan kolom di tengah atau di dekat tengah sisi pendek struktur
2. Menghilangkan kolom di tengah atau di dekat tengah sisi panjang struktur
3. Menghilangkan kolom sudut
4. Menghilangkan kolom interior

Pada prosedur analisis statis linier atau nonlinier menggunakan kombinasi pembebanan $2(DL + 0.25LL)$ sedangkan pada prosedur analisis dinamis linier atau nonlinier menggunakan kombinasi pembebanan $(DL+0,25LL)$ dengan DL adalah beban mati dan LL adalah beban hidup.

Pendekatan bergantung pada *Demand Capacity Ratio* (DCR) untuk elemen struktural dan membandingkan nilai DCR dengan nilai ambang batas untuk mengidentifikasi keruntuhan struktur. DCR dihitung berdasarkan rumus berikut.

$$DCR = Q_{ud}/Q_{ce} \dots (1)$$

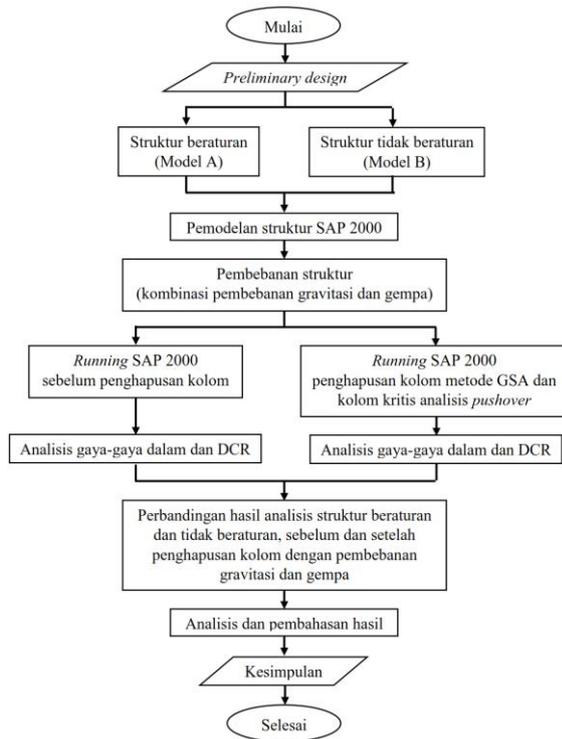
dengan Q_{ud} adalah gaya yang didapat dalam komponen (momen, gaya aksial, geser dan kemungkinan gabungan gaya) yang diperoleh dari analisis linear elastis, sedangkan Q_{ce} adalah perkiraan kekuatan dari komponen (momen, gaya aksial, geser dan kemungkinan gabungan gaya). Nilai DCR yang diijinkan untuk elemen struktur adalah sebagai berikut.

- 1) $DCR < 2,0$ untuk konfigurasi struktural yang beraturan atau khusus.
- 2) $DCR < 1,5$ untuk konfigurasi struktural yang tidak beraturan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

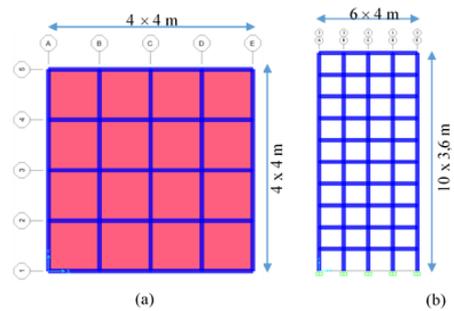
3.2 Desain Pendahuluan

3.2.1 Standar Perencanaan

Perencanaan berdasarkan SNI 03-2847-2013 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1726-2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non gedung. Pembebanan diberikan berdasarkan SNI 1727-2013 tentang beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan bangunan lain.

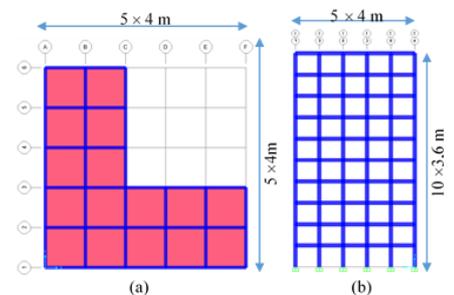
3.2.2 Sistem dan Geometri Struktur

Struktur gedung yang ditinjau dalam penelitian ini terdiri dari struktur beraturan dan struktur tidak beraturan. Setiap struktur terdiri dari 10 lantai yang memiliki tinggi antar lantai 3,6 m, dengan bentang antar kolom sepanjang 4 m, dan luas lantai bangunan 256 m². Tampak atas dan tampak depan pada struktur beraturan dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Struktur bangunan gedung beraturan: (a) Tampak atas dan (b) tampak depan

Tampak atas dan tampak depan pada struktur tidak beraturan dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Struktur bangunan gedung tidak beraturan: (a) Tampak atas dan (b) tampak depan

3.2.3 Material Struktur

1. Data Struktur sebagai berikut.

Fungsi gedung	: Umum/Perkantoran
Jenis struktur	: Beton bertulang
Letak wilayah	: Pekanbaru
Jenis tanah	: Sedang
Kolom	: 700 mm x 700 mm
Balok (bxh)	: 300 mm x 600 mm

2. Beton struktural dengan karakteristik:

$$\text{Kuat tekan beton, } f_c' = 24,9 \text{ MPa} \\ = 24900 \text{ kN/m}^2$$

Modulus elastisitas beton,

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \\ = 4700\sqrt{24,9} \\ = 23452,95291 \text{ MPa}$$

Angka poisson, $\nu = 0,2$

$$\text{Modulus geser, } G = E_c / [2 (1 + \nu)] \\ = 9772,063713 \text{ MPa}$$

Tegangan leleh tulangan utama
 $f_{yc} = 400 \text{ MPa}$
 Tegangan leleh geser,
 $f_{ys} = 240 \text{ MPa}$
Mass per unit volume = 24 kN/m^3

3. Parameter efektifitas momen inersia kondisi penampang retak (*crack*) (SNI 2847-2013)

Balok = $0,35 I_g$
 Kolom = $0,70 I_g$
 Pelat lantai = $0,25 I_g$

3.3 Pembebanan Struktur

Beban mati dan beban hidup diberikan sesuai ketentuan yang tercantum dalam SNI 1727-2013 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Bangunan Lain sedangkan beban gempa diberikan sesuai ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726-2012 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung.

3.3.1 Beban Mati

a. Beban mati struktural

Beban mati struktural merupakan berat sendiri dari elemen struktur yaitu kolom, balok, dan pelat lantai.

b. Beban mati tambahan

Beban mati tambahan adalah berat elemen non struktural yang secara permanen membebani struktur. Beban mati tambahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Beban mati tambahan

1. Beban mati tambahan pada plat (lantai 1-9)	
Beban spesi setebal 3 cm = $0,03 \times 22$	0,66 kN/m ²
Beban keramik setebal 1 cm = $0,01 \times 24$	0,24 kN/m ²
Beban plafon dan penggantung	0,20 kN/m ²
Beban instalasi ME	0,25 kN/m ²
<i>Total beban mati pada plat lantai</i>	1,35 kN/m ²
2. Beban mati tambahan pada atap (lantai 10)	
Beban spesi setebal 3 cm = $0,03 \times 22$	0,66 kN/m ²
Beban plafon dan penggantung	0,20 kN/m ²
Beban instalasi ME	0,25 kN/m ²
<i>Total beban mati pada plat lantai</i>	1,11 kN/m ²
3. Beban mati tambahan pada balok tepi	
Balok tepi lantai 1-9 = $(3,6 - 0,6) \times 2,5$	7,5 kN/m

3.3.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang bekerja pada lantai bangunan tergantung dari fungsi ruang digunakan. Besarnya beban hidup yang bekerja pada lantai bangunan menurut SNI 1727-2013 tentang Tata Cara Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung untuk bangunan perkantoran adalah $2,4 \text{ kN/m}^2$ dan beban hidup pada atap sebesar $0,96 \text{ kN/m}^2$.

3.3.3 Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1726-2012, data gempa untuk kota Pekanbaru jenis tanah sedang dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Respon Spektral Kota Pekanbaru Tanah Sedang

No	Variabel	Nilai
1	S_s (g)	0.435
2	S_1 (g)	0.273
3	F_A	1.452
4	F_V	1.854
5	S_{MS} (g)	0.631
6	S_{MI} (g)	0.506
7	S_{DS} (g)	0.421
8	S_{DI} (g)	0.337
9	T_0 (detik)	0.160
10	T_s (detik)	0.802

3.4 Analisis Gaya-Gaya Dalam

Analisis gaya-gaya dalam yang bekerja pada pemodelan struktur bangunan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga dengan langkah awal adalah pemberian beban-beban. Analisis hasil dan pengolahan data dilakukan dengan mengolah hasil keluaran yang berupa tabel untuk gaya-gaya dalam pada elemen yang ditinjau berupa gaya aksial dan momen.

3.5 Analisis Keruntuhan Progresif

Untuk mengetahui potensi keruntuhan progresif dari gedung bertingkat struktur beraturan dan tidak beraturan, menggunakan analisis penghapusan kolom atau balok untuk melihat elemen struktur mana yang mengalami keruntuhan progresif.

3.6 Analisis Kekuatan Struktur

Pengecekan kekuatan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga yang mengacu pada metode *Load and Resistance Design* (LRFD) berdasarkan *Demand Capacity Ratio* (DCR) yang merupakan perbandingan antara gaya atau momen *ultimate* pada penampang yang terjadi (beban terfaktor: P_u atau M_u) terhadap kuat nominal penampang (P_n atau M_n). Nilai DCR merupakan indikasi numerik terkait kondisi kekuatan (*strength*) pada masing-masing elemen struktur bangunan yang dianalisis.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pemodelan Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan

1. Analisis ketidakberaturan Horizontal diskontinuitas diafragma

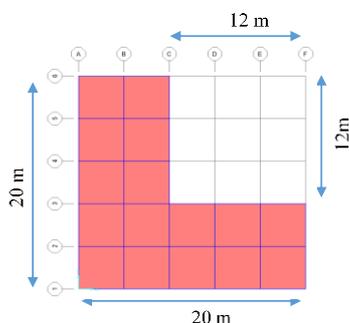
Pemeriksaan ketidakberaturan diskontinuitas diafragma untuk masing-masing model struktur adalah sebagai berikut.

a. Model A

Model A berbentuk persegi utuh beraturan, tidak mempunyai daerah terpotong atau terbuka sehingga model A tidak memiliki ketidakberaturan diskontinuitas diafragma.

b. Model B

Perhitungan diskontinuitas diafragma pada Model B dapat dilihat pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Berdasarkan Gambar 4, diketahui model B mempunyai luas lantai bangunan

seluas 256 m^2 dan mempunyai luas daerah terbuka seluas 144 m^2 atau mempunyai luas bukaan $56,25 \%$ dari luas lantai sehingga model B mempunyai ketidakberaturan diskontinuitas diafragma.

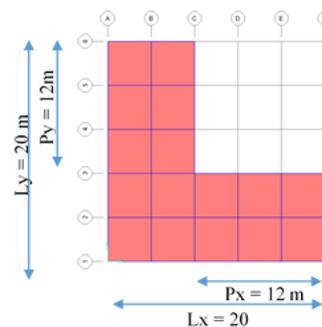
2. Analisis ketidakberaturan horizontal sudut dalam

Perhitungan ketidakberaturan sudut dalam untuk masing-masing model struktur adalah sebagai berikut.

a. Model A

Model A berbentuk persegi utuh beraturan sehingga model A tidak memiliki ketidakberaturan sudut dalam.

b. Model B



Gambar 5. Ketidakberaturan sudut dalam Model B

Berdasarkan Gambar 5, diketahui model B mempunyai nilai $P_y = 12 \text{ m} > 0,15L_y = 3 \text{ m}$ dan $P_x = 12 \text{ m} > 0,15L_x = 3 \text{ m}$, sehingga model B memenuhi syarat ketidakberaturan sudut dalam.

3. Ketidakberaturan horizontal torsi

Perhitungan ketidakberaturan torsi untuk masing-masing model struktur adalah sebagai berikut.

1. Model A

Pada arah X dan Y didapat nilai $\delta_{\text{maks}} X A_x = 18.88812708 < 1,2$ $\delta_{\text{rata-rata}} = 32.638$, sehingga struktur model A arah Y tidak terdapat ketidakberaturan torsi

2. Model B

Arah X didapat nilai $1,2$ $\delta_{\text{rata-rata}} = 22.071 < 1,4$ $\delta_{\text{rata-rata}} = 25.750 < \delta_{\text{maks}} X A_x = 29.376$ sehingga struktur model B arah X

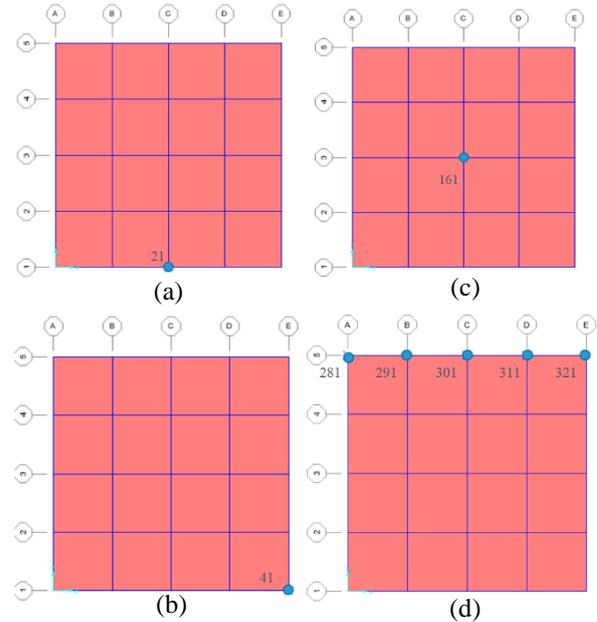
memiliki ketidakberaturan torsi berlebihan, sedangkan arah Y nilai $\delta_{maks} \times A_x = 16.860 < 1,2 \delta_{rata-rata} = 29.134$. Pada arah Y model B tidak terdapat ketidakberaturan torsi.

Berdasarkan hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa model A tergolong struktur beraturan dan model B tergolong struktur tidak beraturan.

4.2 Analisis Keruntuhan Progresif

4.2.1 Analisis Gaya-gaya Dalam dan Keuntuhan Progresif pada Struktur Beraturan

Berdasarkan hasil pemeriksaan struktur beraturan dan tidak beraturan, model A tergolong sebagai struktur beraturan. Pada proses analisis keruntuhan progresif struktur beraturan dilakukan proses penghapusan kolom pada lantai 1 berdasarkan metode GSA yaitu pada sisi panjang dan pendek struktur, sudut struktur dan penghapusan kolom pada nilai P terbesar serta penghapusan kolom kritis hasil analisis metode *pushover*. Selain itu, dilakukan juga analisis sebelum dilakukan penghapusan kolom sebagai pembandingan hasil. Lokasi penghapusan kolom tersebut dapat dilihat pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Penghapusan kolom; (a) sisi struktur pada kolom 21, (b) sudut pada kolom 41, (c) P terbesar pada kolom 161 dan (d) kolom kritis analisis *pushover* pada kolom 281, 291, 301, 311 dan 321.

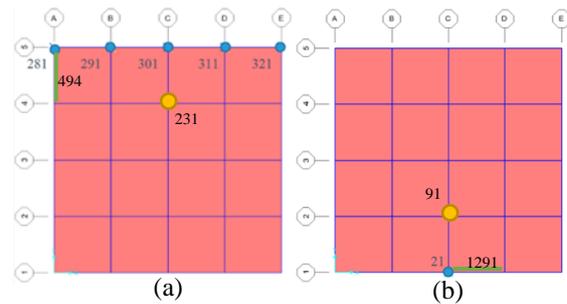
Gaya-gaya dalam pada kolom struktur beraturan berdasarkan nilai P terbesar dengan nilai DCR sebagai indikator keruntuhan progresif dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Gaya-gaya dalam dan nilai DCR pada kolom struktur beraturan

1. Sebelum dilakukan penghapusan kolom (Asli)								
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₁ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	DCR Pu/Pn	Ket.	
Gravitasi	161	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-1973.048	-3.462E-14	6.474E-14	0.41501	Aman	
GSA	161	GSA 2(DL+0.25LL)	-2738.623	-4.93E-14	9.743E-14	0.57604	Aman	
Gempa	161	10) 1,2 DL + LL - 0,3 Ex - Ey	-1820.798	-68.2858	-20.4857	0.38298	Aman	
2. Penghapusan kolom sisi struktur								
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₂ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	P ₂ /P ₁	DCR Pu/Pn	Ket.
Gravitasi	91	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-2697.934	26.788	3.78E-14	1.367	0.56748	Aman
GSA	91	GSA 2(DL+0.25LL)	-3823.438	39.7429	5.614E-14	1.396	0.80421	Aman
Gempa	91	8) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex - Ey	-2571.800	-42.3241	62.1946	1.412	0.54095	Aman
3. Penghapusan lima buah kolom kritis analisis <i>pushover</i>								
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₄ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	P ₅ /P ₁	DCR Pu/Pn	Ket.
Gravitasi	231	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-3887.061	4.1223	-6.504E-13	1.970	0.8176	Aman
GSA	231	GSA 2(DL+0.25LL)	-5600.729	7.0358	-9.609E-13	2.045	1.17805	Runtuh
Gempa	231	7) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex + Ey	-3800.331	83.5421	66.9472	2.087	0.79935	Aman

Berdasarkan Tabel 4, dapat dilihat bahwa kolom pada struktur beraturan tidak mengalami keruntuhan progresif. Nilai DCR terbesar terjadi pada penghapusan lima buah kolom kritis hasil analisis *pushover* dengan nilai DCR 1.17805 pada kolom 231 dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL), sedangkan penghapusan kolom tunggal nilai DCR terbesar terjadi pada skenario penghapusan kolom pada sisi struktur dengan nilai DCR 0.80421 pada kolom 91 dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL).

Lokasi kolom 231 dan 91 pada lantai 1 dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Lokasi kolom dan balok DCR terbesar; (a) kolom kritis analisis *pushover* dan (b) sisi struktur

Gaya-gaya dalam pada balok struktur beraturan dengan nilai M3 terbesar dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

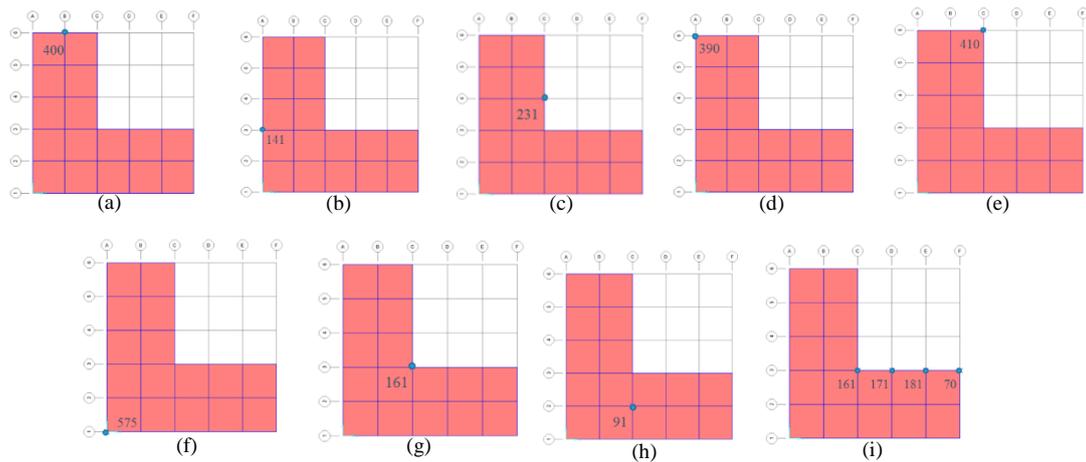
Tabel 5. Gaya-gaya dalam dan nilai DCR pada balok struktur beraturan

1. Sebelum dilakukan penghapusan kolom (Asli)									
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₁ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)		DCR Mu/Mn	Ket.	
Gravitasi	1835	1) 1,4 DL	0	0	-28.8932		0.25937	Aman	
GSA	1835	GSA 2(DL+0.25LL)	0	0	-42.2553		0.37932	Aman	
Gempa	1250	9) 1,2 DL + LL - 0,3 Ex + Ey	0	-3.345E-16	-83.4995		0.74957	Aman	
2. Penghapusan kolom sisi struktur									
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₂ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	M ₂ /M ₁	DCR Mu/Mn	Ket.	
Gravitasi	534	1) 1,4 DL	0	0	-83.7278	2.898	0.75162	Aman	
GSA	534	GSA 2(DL+0.25LL)	0	0	-122.3494	2.895	1.09832	Runtuh	
Gempa	1291	4) 1,2 DL + LL + Ex - 0,3 Ey	0	1.742E-17	-130.8278	1.567	1.17443	Runtuh	
3. Penghapusan lima buah kolom kritis analisis <i>pushover</i>									
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₄ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	M ₃ /M ₁	DCR Mu/Mn	Ket.	
Gravitasi	494	1) 1,4 DL	0	0	-355.3613	12.299	3.19006	Progresif	
GSA	494	GSA 2(DL+0.25LL)	0	0	-519.7147	12.299	4.66545	Progresif	
Gempa	494	8) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex - Ey	0	1.282E-15	-353.0937	4.228	3.1697	Progresif	

Berdasarkan Tabel 5, dapat dilihat bahwa balok mengalami keruntuhan progresif. Nilai DCR terbesar adalah 4.66545 ketika dilakukan penghapusan lima buah kolom kritis dari hasil analisis *pushover* pada balok 494 dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL). Pada penghapusan kolom tunggal, nilai DCR terbesar adalah 1.17443. Hal tersebut menunjukkan bahwa penghapusan kolom tunggal tidak menyebabkan keruntuhan progresif pada struktur. Lokasi kolom 494 berada pada lantai 1 dan 1291 berada pada lantai 2 yang dapat dilihat pada gambar 7.

4.2.2 Analisis Gaya-gaya Dalam Struktur Tidak Beraturan

Analisis keruntuhan progresif struktur tidak beraturan dilakukan proses penghapusan kolom berdasarkan metode GSA yaitu pada (a) kolom ditengah bentang horizontal atas, (b) ditengah bentang vertikal kiri, (c) bentang vertikal kanan, (d) sudut kiri atas, (e) sudut kanan atas, (f) sudut kiri bawah, (g) sudut tengah struktur, (h) kolom dengan P terbesar dan (i) kolom kritis hasil analisis *pushover* yang dapat dilihat pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Skenario penghapusan kolom struktur tidak beraturan

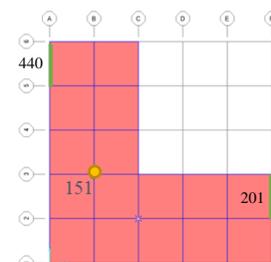
Gaya-gaya dalam dan nilai DCR pada kolom struktur tidak beraturan dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Gaya-gaya dalam dan nilai DCR pada kolom struktur tidak beraturan

1. Sebelum dilakukan penghapusan kolom (Asli)									
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₁ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	DCR P _u /P _n	Ket.		
Gravitasi	91	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-1946.089	-0.2258	-0.5214	0.40934	Aman		
GSA	161	GSA 2(DL+0.25LL)	-2752.625	-2.2905	-2.2905	0.57898	Aman		
Gempa	91	8) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex - Ey	-1821.471	-66.0779	43.7521	0.38312	Aman		
2. Penghapusan kolom Bentang Vertikal Kiri									
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₃ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P ₃ /P ₁	DCR P _u /P _n	Ket.	
Gravitasi	151	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-2712.914	-0.8464	27.2043	1.394	0.57063	Aman	
GSA	151	GSA 2(DL+0.25LL)	-3861.413	-1.176	40.3396	1.403	0.8122	Aman	
Gempa	151	5) 1,2 DL + LL - Ex + 0,3 Ey	-2605.613	48.7804	-39.1678	1.430	0.54806	Aman	
3. Penghapusan empat buah kolom kritis analisis <i>pushover</i>									
Pembebanan	Kolom	Kombinasi	P ₁₀ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P ₁₀ /P ₁	DCR P _u /P _n	Ket.	
Gravitasi	151	2) 1,2 DL + 1,6 LL	-3557.781	29.7773	-46.7667	1.828	0.74834	Aman	
GSA	151	GSA 2(DL+0.25LL)	-5093.928	44.5075	-67.9446	1.850	1.07145	Runtuh	
Gempa	151	7) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex + Ey	-3387.569	114.6787	-22.0052	1.859	0.71254	Aman	

Berdasarkan Tabel 6, dapat dilihat bahwa kolom pada struktur tidak beraturan tidak mengalami keruntuhan progresif. Nilai DCR terbesar terjadi pada penghapusan empat buah kolom kritis hasil analisis *pushover* dengan nilai DCR 1.07145 pada kolom 151 dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL), sedangkan ketika dilakukan penghapusan kolom tunggal nilai DCR terbesar adalah 0.8122 yang terjadi pada skenario penghapusan kolom pada bentang vertikal kiri struktur pada kolom 151 dengan kombinasi

pembebanan 2(DL+0.25LL). Lokasi kolom 151 terletak pada lantai 1 yang dapat dilihat pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Skenario penghapusan kolom struktur tidak beraturan

Gaya-gaya dalam pada balok struktur beraturan dengan nilai M3 terbesar dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Gaya-gaya dalam dan nilai DCR pada balok struktur tidak beraturan

1. Sebelum dilakukan penghapusan kolom (Asli)								
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₁ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)		DCR Mu/Mn	Ket.
Gravitasi	1835	1) 1,4 DL	0	9.755E-17	-29.3867		0.2638	Aman
GSA	1835	GSA 2(DL+0.25LL)	0	1.394E-16	-43.0162		0.38615	Aman
Gempa	1247	8) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex - Ey	0	-1.12E-15	-77.5728		0.69637	Aman
2. Penghapusan kolom Sudut Kiri Atas								
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₁ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	M ₅ /M ₁	DCR Mu/Mn	Ket.
Gravitasi	440	1) 1,4 DL	0	0	-90.4555	3.078	0.81201	Aman
GSA	440	GSA 2(DL+0.25LL)	0	0	-130.9515	3.044	1.17554	Runtuh
Gempa	449	8) 1,2 DL + LL + 0,3 Ex - Ey	0	-1.742E-17	-127.145	1.639	1.14137	Runtuh
3. Penghapusan empat buah kolom kritis analisis <i>pushover</i>								
Pembebanan	Balok	Kombinasi	P ₂ (KN)	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)	M ₁₀ /M ₁	DCR Mu/Mn	Ket.
Gravitasi	201	1) 1,4 DL	0	0	-262.3676	8.928	2.35526	Progresif
GSA	201	GSA 2(DL+0.25LL)	0	-8.71E-18	-383.6178	8.917	3.44372	Progresif
Gempa	201	10) 1,2 DL + LL - 0,3 Ex - Ey	0	-3E-16	-246.789	3.181	2.21541	Progresif

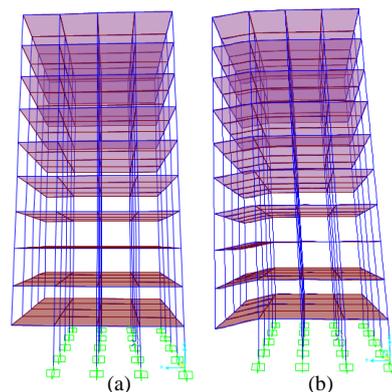
Berdasarkan Tabel 7, dapat dilihat bahwa balok mengalami keruntuhan progresif. Nilai DCR terbesar adalah 3,44372 ketika dilakukan penghapusan empat buah kolom kritis dari hasil analisis *pushover* pada balok 201 dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL). Pada penghapusan kolom tunggal, nilai DCR terbesar adalah 1.17554 yang terjadi pada balok 440. Hal tersebut menunjukkan bahwa penghapusan kolom tunggal tidak menyebabkan keruntuhan progresif pada struktur. Balok 201 dan 440 berada pada lantai yang lokasinya dapat dilihat pada Gambar 9.

4.3 Prediksi Tipe Keruntuhan

4.3.1 Prediksi Tipe Keruntuhan

Progresif Struktur Beraturan

Hasil analisis keruntuhan progresif pada struktur beraturan terjadi pada penghapusan lima buah kolom hasil analisa *pushover* dengan kombinasi pembebanan GSA 2(DL+0.25LL) dengan pola keruntuhan dapat dilihat pada Gambar 10 berikut.

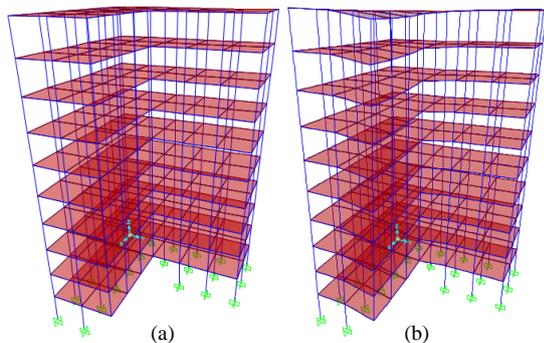


Gambar 10. Pola Keruntuhan Struktur Beraturan; (a) Sebelum *Running* dan (b) Setelah *Running*

Berdasarkan pola keruntuhan yang terjadi terlihat bahwa penghapusan lima buah kolom menyebabkan *overturning* atau terjadi guling pada kolom sebelahny yang memicu kegagalan atau keruntuhan bangunan. Pola keruntuhan yang terjadi bersesuaian dengan pola keruntuhan progresif tipe domino, sehingga disimpulkan bahwa struktur beraturan mengalami keruntuhan progresif tipe domino.

4.3.2 Prediksi Tipe Keruntuhan Progresif Struktur Tidak Beraturan

Pola keuntuhan yang terjadi ketika dilakukan penghapusan empat buah kolom pada struktur tidak beraturan dapat dilihat pada Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11. Pola Keruntuhan Struktur Tidak Beraturan; (a) Sebelum *Running* dan (b) Setelah *Running*

Berdasarkan pola keruntuhan yang terjadi terlihat bahwa penghapusan empat buah kolom menyebabkan guling pada kolom disampingnya yang memicu kegagalan atau keruntuhan bangunan. Pola keruntuhan yang terjadi bersesuaian dengan pola keruntuhan progresif tipe domino, sehingga disimpulkan bahwa struktur tidak beraturan mengalami keruntuhan progresif tipe domino.

4.4 Analisis Kekuatan Struktur

4.4.1 Analisis Geser Dasar Seismik Struktur beraturan

Struktur dinyatakan aman apabila nilai perbandingan geser dasar seismik sebelum dan sesudah dilakukan skenario penghapusan kolom > 1 . Perbandingan nilai geser dasar seismik pada struktur beraturan dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Perbandingan geser dasar seismik

Skenario Penghapusan Kolom	Nilai Geser Dasar Seismik V (kN)	Perbandingan Vskenario/Vasli
Asli	-561.528	1
Bentang	-561.529	1.0000017
Sudut	-561.531	1.0000053
P terbesar	-561.532	1.0000071

Pada Tabel 8 di atas, menunjukkan bahwa struktur memiliki nilai perbandingan geser dasar seismik hampir sama dengan 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa penyaluran beban pada struktur berjalan dengan normal.

4.3.2 Analisis Kolom Struktur Beraturan Menggunakan spColumn

Analisis spColumn dilakukan untuk melihat kemampuan kolom memikul beban ketika sebelum dan sesudah dilakukan penghapusan kolom. Hasil analisis spColumn struktur beraturan dapat dilihat pada Tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Analisis spColumn Struktur Beraturan

Skenario Penghapusan Kolom	K	P ₁ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	Analisis spColumn
Asli	161	-2738.623	-4.93E-14	9.743E-14	Memenuhi
Sisi Struktur	91	-3823.438	39.7429	5.614E-14	Memenuhi
Sudut Struktur	31	-3501.127	-25.3226	-42.3904	Memenuhi
P terbesar	91	-3531.891	-49.9024	9.215E-14	Memenuhi
5 kolom sisi	231	-5600.729	7.0358	-9.609E-13	Tidak Memenuhi

Berdasarkan Tabel 9, hasil analisis spColumn menunjukkan bahwa penghapusan 5 kolom sisi hasil analisis *pushover* tidak mampu memikul beban yang terjadi, sehingga diperlukan pemebesaran penampang atau penambahan tulangan agar kolom dapat memikul beban tersebut.

4.3.3 Analisis Geser Dasar Seismik Struktur Tidak Beraturan

Perbandingan nilai geser dasar seismik pada struktur tidak beraturan dapat dilihat pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Perbandingan geser dasar seismik

Skenario	Nilai Geser Dasar Seismik (V) kN	Perbandingan Vasli/Vx
Asli	-581.341	1
Bentang Horizontal Atas	-581.338	0.9999948
Bentang Vertikal Kanan	-581.341	1
Bentang Vertikal Kiri	-581.343	1.0000034
Sudut Kanan Atas	-581.343	1.0000034
Sudut Kiri Atas	-581.341	1.0000034
Sudut Tengah	-581.342	1
Sudut Kiri Bawah	-581.341	1.0000017
P Terbesar	-581.341	1

Dari Tabel 10 di atas, menunjukkan bahwa struktur memiliki nilai perbandingan geser dasar seismik untuk masing-masing skenario dibandingkan dengan nilai asli sebelum penghapusan kolom berkisar pada angka 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa penyaluran beban pada struktur berjalan dengan normal.

4.3.4 Analisis Kolom Struktur Tidak Beraturan Menggunakan spColumn

Analisis spColumn dilakukan untuk melihat kemampuan kolom memikul beban ketika sebelum dan sesudah dilakukan penghapusan kolom. Hasil analisis spColumn struktur beraturan dapat dilihat pada Tabel 11 berikut ini.

Tabel 11. Analisis spColumn Struktur Beraturan

Skenario Penghapusan Kolom	K	P ₁ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	Analisis spColumn
Asli	161	-2752.625	-2.2905	-2.2905	Memenuhi
Horizontal atas	291	-3689.326	-38.1637	0.155	Memenuhi
Vertikal kiri	151	-3861.413	-1.176	40.3396	Memenuhi
Vertikal kanan	221	-3837.806	-0.0785	-41.8103	Memenuhi
Sudut kiri atas	281	-3506.118	-44.3646	-26.3523	Memenuhi
Sudut kanan atas	301	-3550.053	-44.6275	27.3007	Memenuhi
Sudut tengah	91	-3675.542	-51.6647	-7.5517	Memenuhi
Sudut kiri bawah	11	-3509.824	-25.405	42.365	Memenuhi
P terbesar	161	-3621.994	50.5328	-5.3462	Memenuhi
4 kolom horizontal tengah	151	-5093.928	44.5075	-67.9446	Tidak Memenuhi

Berdasarkan Tabel 11, hasil analisis spColumn menunjukkan bahwa penghapusan 4 kolom horizontal tengah hasil analisis *pushover* tidak mampu memikul beban yang terjadi, sehingga diperlukan pemebesaran penampang atau penambahan tulangan agar kolom dapat memikul beban tersebut.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

a. Keruntuhan progresif pada struktur beraturan dan tidak beraturan tidak terjadi pada penghapusan kolom tunggal, keruntuhan progresif hanya terjadi setelah dilakukan penghapusan beberapa kolom kritis hasil analisis *pushover*.

- b. Pada struktur beraturan keruntuhan progresif terbesar terjadi pada penghapusan lima buah kolom kritis hasil analisis *pushover* pada sisi struktur dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL) yang terjadi pada balok 494 dengan nilai DCR 4,665. Pada penghapusan kolom tunggal masih dalam kategori aman, dengan nilai DCR terbesar yaitu 1,17443.
- c. Pada struktur tidak beraturan keruntuhan progresif terbesar terjadi pada penghapusan empat buah kolom kritis pada bentang horizontal tengah struktur hasil analisis *pushover* dengan kombinasi pembebanan 2(DL+0.25LL) yang terjadi pada balok 201 dengan nilai DCR 3,44372. Pada penghapusan kolom tunggal masih dalam kategori aman dengan nilai DCR terbesar yaitu 1,17554.
- d. Berdasarkan pola keruntuhan yang terjadi, struktur beraturan dan tidak beraturan mempunyai keruntuhan progresif tipe domino.
- e. Perbandingan nilai geser dasar seismik struktur beraturan dan tidak beraturan mendekati angka 1 yang menunjukkan penyaluran beban pada struktur berjalan dengan normal.
- f. Hasil analisis kolom pada struktur beraturan dan tidak beraturan menunjukkan bahwa kolom masih mampu memikul beban ketika dilakukan penghapusan kolom tunggal, namun kolom tidak mampu menahan beban ketika dilakukan penghapusan beberapa kolom kritis dari hasil analisis *pushover*.

5.2 Saran

Pada penelitian ini penentuan struktur beraturan dan tidak beraturan hanya meninjau dari konfigurasi horizontal, sehingga penelitian ini dapat dikembangkan dengan dilakukan juga peninjauan konfigurasi vertikal dari struktur. Selain itu dapat juga dengan melakukan peninjauan struktur dengan bentuk atau variasi struktur yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- BSN. (2002). *SNI 1726-2002: Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. Bandung: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- BSN. (2012). *SNI 1726-2012: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. (2013a). *SNI 1727-2013: Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*.
- BSN. (2013b). *SNI 2847-2013: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- General Services Administrator (GSA). (2003). *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines*.
- Johan, R. (2010). *Limiting the extent of localised failure according to SFS-EN 1991-1-7* (Degree Programme in Construction Engineering. Master's Thesis.). Finland: Aalto University.
- Puskim.pu.go.id. (2011). Nilai Spektral Gempa Kota Pekanbaru. Retrieved March 9, 2017, http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/
- Rakshith, K., & Radhakrishna. (2013). *Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Framed Structure*. Bangalore: RV college for Engineering
- Sagiroglu, S. (2012). *Analytical and experimental evaluation of progressive collapse resistance of reinforced concrete structures*. Boston: Northeastern University
- Starossek, U. (2009). *Progressive Collapse of Structures*. Jerman: thomas telford.
- Sunamy, S. L., Binu, P., & Girija, K. (2014). *Progressive Collapse Analysis of a Reinforced Concrete Frame Building*.