

KERUNTUHAN PROGRESIF GEDUNG BERATURAN SISTEM GANDA

Dhika Fazrian¹, Zulfikar Djauhari², Ridwan³

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Riau,

Jl.HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, e-mail: dhika.fazrian@student.unri.ac.id

^{2,3}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,

Jl.Babarsari 44 Yogyakarta,

e-mail: zulfikar.djauhari@lecturer.unri.ac.id, ridwan@eng.unri.ac.id

Abstract: This research aimed to examine the progressive collapse of dual system building structures due to the loss of one or more structural elements that lead to successive collapse of other elements. Three cases of building structures were analyzed in this study using finite element software. Several columns on the first floor of the structure was removed and then the analysis was conducted to each structure until the progressive collapse existed. The nonlinear statics analysis was used to examine the location of the critical column while the linear statics analysis was carried out to find the demand capacity ratio, the bending moment ratio and robustness indicator as suggested by GSA 2003 and SNI 2847-2013. The results showed that the structure denoted in case 1 and case 2 that was loaded comply with GSA 2003 experienced the progressive collapse. On the other hand this phenomenon did not appear on the structure that was loaded in accordance with SNI 2847-2013. Furthermore, there was an increase in the bending moment capacity of the column/beam on all cases that were loaded comply with SNI 2847-2013 and GSA 2003. Robustness indicator is almost equal one with the type of progressive collapse is pancake collapse type.

Keywords: Progressive Collapse, Demand Capacity Ratio, Bending Moment Ratio And Robustness Indicator.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan mengkaji keruntuhan progresif struktur gedung beraturan sistem ganda akibat hilangnya salah satu atau lebih elemen struktur yang menyebabkan keruntuhan secara beruntun elemen yang ada didekatnya. Tiga kasus struktur bangunan dianalisis dalam penelitian ini dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Beberapa kolom di lantai pertama pada struktur dihilangkan dan dianalisis hingga struktur mengalami keruntuhan progresif. Analisis statik nonlinier digunakan untuk mengetahui bagian kolom kritis dan analisis statik linier untuk mengetahui nilai rasio kapasitas, momen lentur, dan ketahanan batas sesuai dengan kriteria GSA 2003 dan SNI 2847-2013. Kesimpulannya adalah terjadi keruntuhan progresif sesuai kriteria GSA 2003 pada kasus 1 dan kasus 2. Sedangkan untuk kriteria SNI 2847-2013 tidak terjadi keruntuhan progresif. Terjadi peningkatan momen lentur pada setiap kasus sesuai kriteria GSA 2003 maupun SNI 2847-2013 dan nilai ketahanan batas mendekati satu dengan tipe keruntuhan progresif adalah *pancake*.

Kata kunci: Keruntuhan Progresif, Rasio Kapasitas, Rasio Momen Lentur, Ketahanan Batas.

PENDAHULUAN

Indonesia adalah wilayah yang rawan bencana gempa bumi karena posisi geografisnya terletak di daerah lempeng tektonik aktif. Tiga lempeng besar dunia yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, lempeng Pasifik. Terkait dengan struktur bangunan yang terletak di daerah rawan gempa, maka tentu saja perlu diperhatikan perilaku struktur bangunan. Salah satu perilaku struktur bangunan yang harus dikaji adalah perilaku keruntuhan progresif.

Keruntuhan progresif merupakan suatu keruntuhan yang disebabkan oleh kegagalan dari satu atau lebih elemen struktur yang me-

nyebabkan keruntuhan beruntun dari elemen sebelumnya sehingga mengakibatkan keruntuhan struktur secara keseluruhan atau sebagian besar dari struktur tersebut secara tidak proporsional (Rakshith dan Rahtakrishna, 2013). Untuk kasus bangunan yang didesain dengan prinsip *strong column-weak beam*, jika salah satu bagian kolom interior pada lantai dasar dihilangkan, maka kedua bentang balok akan mendistribusikan beban pada kolom yang berdekatan. Lentutan dapat terbentuk pada kedua ujung balok ketika balok tersebut tidak mampu menahan beban seketika pada kondisi elastis. Jika sendi plastis yang terbentuk di balok tidak cukup kuat untuk menahan beban,

maka defleksi pada balok akan menghasilkan aksi tarik beruntun yang merupakan proteksi terakhir dalam mencegah keruntuhan bangunan (Tsai dan Lin, 2008).

TINJAUAN PUSTAKA

Keruntuhan progresif terjadi ketika struktur menerima beban utama struktural dari bagian elemen yang dihapuskan atau dihilangkan secara tiba-tiba dan struktur yang tersisa tidak mampu menahan berat dari bangunan. Karakteristik dari keruntuhan progresif adalah kondisi akhir kehancuran tidak proposional lebih besar daripada kondisi awal kegagalannya (Sunamy dkk., 2008). Contohnya adalah keruntuhan Apartemen Ronan Point di East London, Inggris tahun 1968 yang disebabkan oleh ledakan gas. Ledakan mengakibatkan hancurnya sambungan antara dinding dengan lantai, dinding-dinding beton terpecah membuat empat lantai di atasnya tanpa dukungan struktural. Lalu lantai-lantai berjatuh dan menghancurkan lantai yang berada di bawahnya, keruntuhan elemen strukturnya seperti domino amblas ke lantai dasar.

Keruntuhan progresif terdiri dari 6 macam tipe yakni sebagai berikut (Starossek, 2009).

1. Tipe keruntuhan *pancake*. Tipe keruntuhan ini disebut keruntuhan *pancake* karena hasil akhir dari keruntuhannya berbentuk *pancake*.
2. Tipe keruntuhan domino. Tipe keruntuhan domino ini memiliki karakteristik keruntuhan berantai, yakni ketika satu elemen atau komponen struktur mengalami kegagalan.
3. Tipe keruntuhan campuran. Suatu keruntuhan gedung yang dikategorikan mengalami keruntuhan campuran, bila sebagian segmen gedung mengalami kegagalan *pancake* sedangkan sebagian segmen lainnya mengalami kegagalan domino.
4. Tipe *zipper*. Kehilangan salah satu bagian dari elemen struktur yang mendistribusikan gaya ke bagian lain. Jika resistensi dari bagian elemen struktur yang lain terlampaui, maka kegagalan akan meningkat.
5. Tipe *instability*. Kegagalan yang terjadi akibat terjadinya ketidakstabilan dari bagian elemen struktur yang menerima beban.
6. Tipe Keruntuhan *section*. Kegagalan tipe *section* sering disebut juga *brittle fracture* atau *fast failure*. Keruntuhan ini dapat ter-

jadi pada struktur tipe *zipper* seperti *cable-stayed bridge*, *cable net*, atau *membrane structures*. Tipe keruntuhan ini lebih sering terjadi pada struktur jembatan.

Kriteria Keruntuhan Progresif

Perhitungan keruntuhan progresif biasanya dilakukan dengan pendekatan *threat independent*, yaitu dengan menyederhanakan respon dari struktur (Elvira, 2011). Pada pendekatan ini, respon struktur dihitung dengan menghilangkan elemen pemikul beban (kolom) secara instan. Pada prosedur analisis statis linier atau nonlinier menggunakan kombinasi pembebanan 2(DL + 0,25LL) dengan DL adalah beban mati dan LL adalah beban hidup sesuai dengan pedoman kriteria GSA 2003. Untuk kombinasi lainnya sesuai dengan SNI 2847-2013 adalah 1,4DL; 1,2DL+1,6LL; 0,9DL±1,0E dan 1,2DL±1,0LL±1,0E.

Analisis statik linier ini dilakukan untuk mendapatkan nilai momen lentur,

$$RBM = M_{intact}/M_{damaged} \quad (1)$$

M_{intact} = momen saat elemen struktur utuh

$M_{damaged}$ = momen saat dilakukan penghapusan kolom

nilai rasio kapasitas,

$$DCR = Q_{ud}/Q_{ce} \quad (2)$$

Q_{ud} = gaya yang didapat dalam komponen (momen, gaya aksial, geser dan kombinasi gaya) yang diperoleh dari analisis linear elastis.

Q_{ce} = perkiraan kekuatan dari komponen (momen, gaya aksial, geser dan kombinasi gaya).

Nilai DCR yang diizinkan sesuai dengan pedoman GSA 2003 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.

dan nilai ketahanan batas harus hampir sama dengan 1, sehingga struktur sanggup untuk memberikan jalur beban alternatif (*alternative load path*)

$$R = V_{intact}/V_{damaged} \quad (3)$$

V_{intact} = gaya geser saat elemen struktur masih utuh

$V_{damaged}$ = gaya geser saat dilakukan penghapusan kolom

Pada SNI 1726-2012, gabungan sistem antara rangka pemikul momen dan dinding geser disebut sebagai sistem ganda. Sistem ganda

akan memberikan kemampuan pada bangunan untuk menahan beban yang lebih baik, terutama terhadap beban gempa dan memiliki kemampuan yang tinggi dalam memikul gaya geser. Beban lateral mengakibatkan dinding geser akan berperilaku *flexural/bending mode*, sedangkan rangka akan berdeformasi dalam *shear mode*. Dengan demikian gaya geser dipikul oleh rangka bagian atas dan dinding geser memikul gaya geser pada bagian bawah (Parulian, 2016).

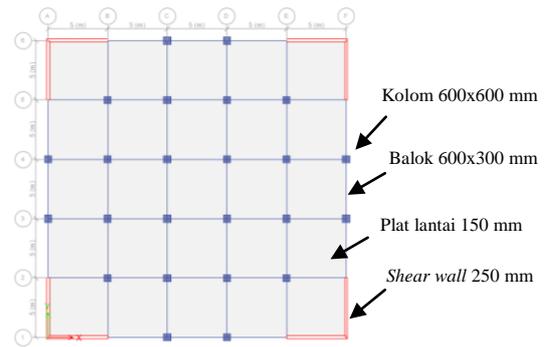
METODE PENELITIAN

Selain aspek desain dan perencanaan bangunan gedung, perilaku keruntuhan elemen-elemen struktur juga penting untuk diketahui sehingga kerugian yang tidak diinginkan dan membahayakan lingkungan sekitar bangunan dapat diantisipasi bila terjadi kegagalan struktur secara tiba-tiba. Kajian dilakukan dengan menganalisis keruntuhan struktur gedung sehingga diketahui karakteristik keruntuhan progresif suatu struktur bangunan gedung bertingkat akibat penambahan beban gravitasi dan akibat menghilangkan salah satu elemen dari struktur bangunan tersebut. Selain itu, analisis keruntuhan akibat beban lateral gempa juga perlu dilakukan untuk mengetahui gaya-gaya dalam yang terjadi dan melihat elemen struktur yang lebih dahulu gagal ketika menerima beban gempa.

Analisis keruntuhan progresif dilakukan pada pembebanan gravitasi dan gempa. Untuk mengetahui bagian kolom kritis dilakukan analisis nonlinier dengan memanfaatkan analisis *pushover*. Kemudian bagian kolom kritis dihilangkan untuk mendapatkan nilai *bending moment ratio*, *demand capacity ratio* dan *robustness indicator*.

Data Struktur

Struktur gedung yang dikaji merupakan struktur gedung beraturan 10 lantai yang memiliki tinggi antar tingkat sebesar 3,5 m dengan ukuran 25 m x 25 m, bentang antar kolom sepanjang 5 m dan berfungsi sebagai gedung perkantoran. Dimensi komponen struktur dapat dilihat pada Gambar 1. Mutu beton yang digunakan memiliki kuat tekan $f_c' = 29,05$ MPa, tegangan leleh tulangan utama $f_{yc} = 400$ MPa, tegangan leleh geser $f_{ys} = 240$ MPa.

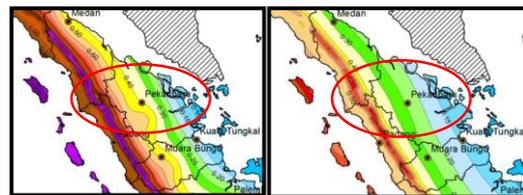


Gambar 1. Denah lantai gedung

Untuk beban mati pada plat lantai 1-9 adalah $1,49 \text{ kN/m}^2$, dan pada lantai 10 adalah $0,73 \text{ kN/m}^2$. Beban mati pada balok tepi lantai 1-9 adalah $7,25 \text{ kN/m}$. Sedangkan beban hidup pada lantai 1-9 adalah $2,4 \text{ kN/m}^2$ dan pada lantai 10 adalah $0,96 \text{ kN/m}^2$ (SNI 1727-2013).

Beban Gempa

Lokasi pemodelan gedung adalah kota Pekanbaru, gedung perkantoran dengan jenis tanah sedang. Tipe struktur yang didesain adalah Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan resiko gempa rendah sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2. Beban gempa statik ekuivalen merupakan ragam pertama dari beban gempa respons spektrum sehingga gaya geser dasar gempa statik ekuivalen sebagai pembatas untuk minimal gaya geser dasar gempa respons spektrum. Untuk nilai gaya geser gempa statik ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Nilai respons spektra kota Pekanbaru (Puskim, 2011)

Pengecekan Sistem Ganda

Struktur dikategorikan sebagai sistem ganda apabila sistem rangka struktur mampu menahan paling sedikit 25% dari gaya gempa yang ditetapkan. Gaya geser dasar diperoleh dengan menjumlahkan seluruh gaya horizontal pada bagian dasar struktur akibat beban gempa yang diberikan. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 2. Ditinjau dari gaya geser dasarnya, Tabel 2 mengindikasikan bahwa proporsi gaya geser yang ditahan oleh sistem rangka belum men-

capai 25% oleh karena itu, kapasitas portal harus dicek kemampuannya untuk menahan 25% gaya gempa yang ditetapkan. Struktur selanjutnya dianalisis tanpa dinding geser dengan memberikan gaya gempa sebesar 25% dari gaya gempa awal. Dengan menggunakan fitur *concrete design software* elemen hingga, dari hasil pengecekan didapat bahwa tidak ada elemen yang mengalami *overstress* (OS) sehingga sistem struktur dianggap sebagai sistem ganda (Parulian, 2016).

Tabel 1. Distribusi Gaya Gempa Statik Ekuivalen

Lantai	h_x (m)	h_x^k	W_x (kN)	$W_x h_x^k$ (kN.m)	C_{vx}	F_y (kN)	V_y (kN)	$F_y 100\%$ (kN)	F_x (kN)	V_x (kN)	$F_x 30\%$ (kN)
Atap	35	368,33	4637,98	1708321,24	0,18	660,94	660,94	660,94	660,94	660,94	198,28
9	32	309,17	6451,29	1994521,70	0,21	771,67	1432,61	771,67	771,67	1432,61	231,50
8	28	254,20	6451,29	1639922,31	0,17	634,48	2067,08	634,48	634,48	2067,08	190,34
7	25	203,61	6488,79	1321167,29	0,14	511,15	2578,23	511,15	511,15	2578,23	153,35
6	21	157,59	6526,29	1028477,74	0,11	397,91	2976,14	397,91	397,91	2976,14	119,37
5	18	116,39	6563,79	763983,49	0,08	295,58	3271,72	295,58	295,58	3271,72	88,67
4	14	80,33	6601,29	530265,86	0,06	205,16	3476,88	205,16	205,16	3476,88	61,55
3	11	49,80	6638,79	330602,10	0,03	127,91	3604,79	127,91	127,91	3604,79	38,37
2	7	25,38	6676,29	169468,19	0,02	65,57	3670,35	65,57	65,57	3670,35	19,67
1	4	8,02	6676,29	53552,08	0,01	20,72	3691,07	20,72	20,72	3691,07	6,22
Total			63712,09	9540281,99	1,00	3691,07					

Tabel 2. Proporsi Pembagian Gaya Geser Dasar

Parameter	V_x (kN)	V_y (kN)
Gaya Geser Struktur	1107,32	3691,07
Gaya Geser <i>RC-Wall</i>	1029,64	3432,32
Gaya Geser Rangka	77,68	258,75
Persentase <i>RC-Wall</i>	92,98%	92,98%
Persentase Rangka	7,01%	7,01%

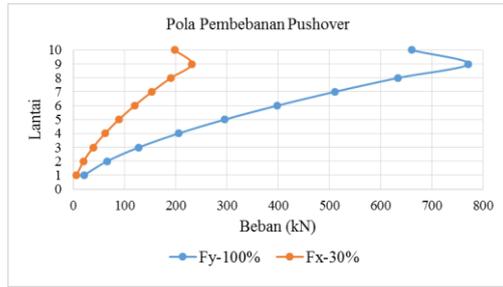
Agar beton tidak mengalami retak yang mengakibatkan kehancuran saat menerima gaya tarik, maka diperlukan penulangan pada beton. Dari hasil analisis gaya-gaya dalam didapat bahwa nilai gaya aksial terbesar pada kolom sesuai SNI 2847-2013 adalah -2936,91 kN dan momen terbesar pada balok adalah -171,93 kNm. Hasil dari perhitungan tulangan untuk balok digunakan 4D19. Sedangkan untuk tulangan pada kolom menggunakan 16D19.

Analisis Statik Nonlinier dan Identifikasi Kolom Kritis

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui bagian dari elemen struktur yang kritis, dengan pola pembebanan *pushover* yaitu akibat pengaruh gempa rencana. Adapun tahapan dalam analisis statik nonlinier ini adalah sebagai berikut.

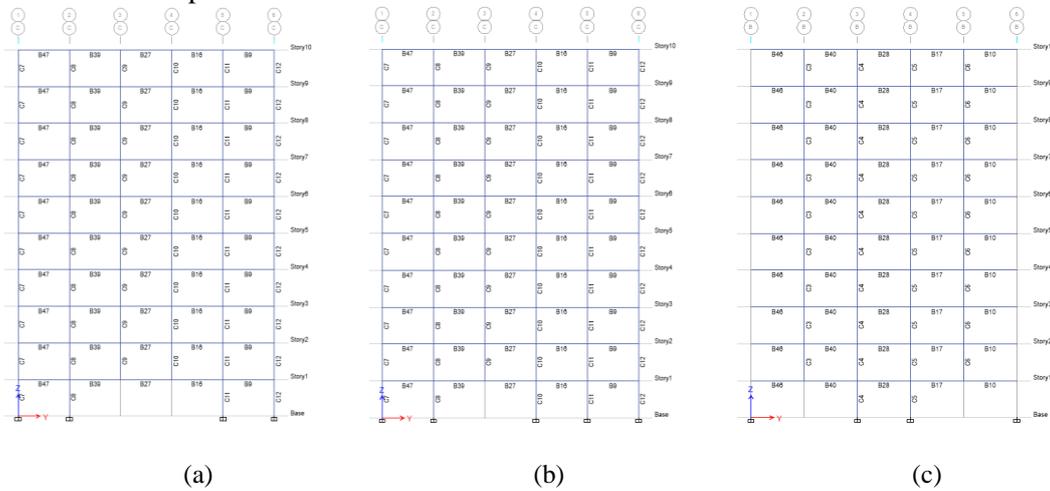
1. Menentukan pola pembebanan lateral, yaitu pola pembebanan *pushover* yang

menggunakan pembebanan statik ekivalen yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pola pembebanan pushover

2. Mendefinisikan beban lateral pushover dan pemodelan sendi plastis.



Gambar 4. (a) Penghapusan kolom pada rangka C untuk kasus 1, (b) Penghapusan kolom pada rangka C untuk kasus 2, (c) Penghapusan kolom pada rangka B untuk kasus 3

Analisis Keruntuhan Progresif

Untuk mengetahui keruntuhan progresif dilakukan perhitungan nilai kapasitas rasio, apabila nilai DCR tersebut ≥ 2 maka terjadi keruntuhan progresif pada elemen struktur. Selain itu, indikator lain yang harus diperhitungkan adalah nilai momen lentur (*bending moment ratio*) dan ketahanan batas (*robustness indicator*).

PEMBAHASAN

Analisis Statik Nonlinier

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sendi plastis yang terbentuk. Pada kasus beban gravitasi tidak terbentuk sendi plastis, namun ketika dilakukan *pushover* pada tahap I sudah mulai terbentuk sendi plastis dengan kondisi B-IO dalam kondisi elastis. Distribusi sendi plastis

3. Menjalankan analisis *pushover*
4. Kurva kapasitas. Hasil dari analisis *pushover* berupa kurva kapasitas dan distribusi sendi plastis.

Hasil analisis statik nonlinier tidak bisa mengidentifikasi bagian kolom kritis karena hasil analisis menunjukkan bahwa bagian yang kritis adalah balok. Sehingga untuk penentuan kasus penghapusan kolom digunakan metode GSA 2003 dengan lokasi kolom yang dihapus adalah kolom bagian tengah, kolom bagian dalam, dan kolom bagian sudut dilantai 1 seperti yang terlihat pada Gambar 4.

terus meningkat, hingga pada tahap *collapse*. Berdasarkan distribusi sendi plastis yang terbentuk, mekanisme keruntuhan yang terjadi pada struktur gedung beraturan sistem ganda ini yaitu mekanisme keruntuhan balok, dan memenuhi konsep desain *strong column weak beam*.

Bending Moment Ratio Akibat Beban Gravitasi

a. Kombinasi Beban GSA 2003

Pada kasus 1, kasus 2 maupun kasus 3 ini terjadi peningkatan *bending moment ratio* pada kolom dan balok dibandingkan dengan momen pada kolom dan balok pada struktur eksisting. Seperti yang terlihat pada Gambar 5(a). kasus 1 kolom C11 pada lantai 2 mengalami peningkatan rasio momen sebesar 7497,8 kali dan balok B16 pada lantai 2 mengalami peningkatan

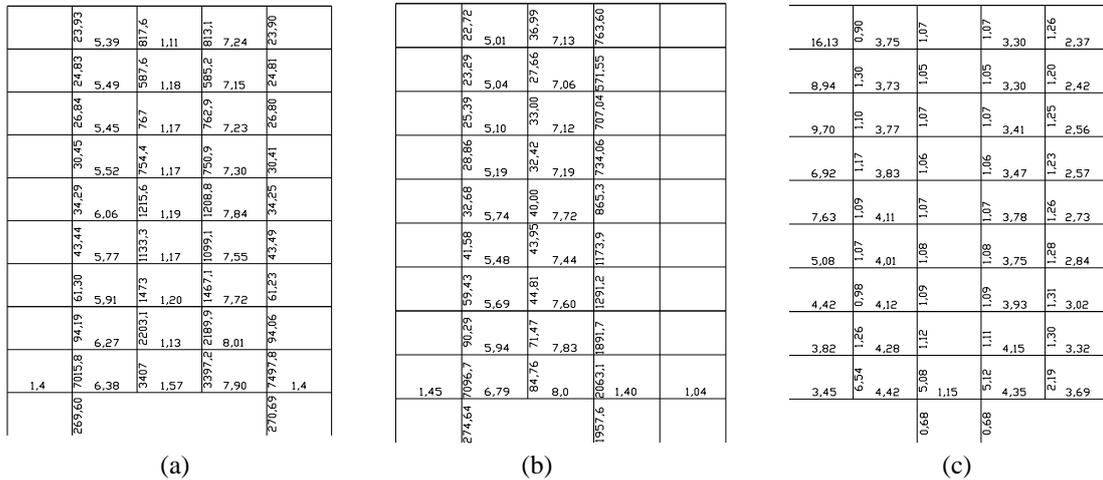
dengan rasio momen sebesar 8,01 kali. Pada kasus 2 (Gambar 5(b)) peningkatan rasio momen kolom C9 pada lantai 2 adalah sebesar 7096,7 kali dan balok B27 pada lantai 1 mengalami peningkatan rasio momen sebesar 8 kali. Pada kasus 3 (Gambar 5(c)) peningkatan rasio momen kolom C3 lantai 2 adalah sebesar 6,54 kali dan balok B46 pada lantai 10 mengalami peningkatan rasio momen sebesar 16,13 kali. Pada kasus 3 ini, terdapat beberapa kolom yang mengalami penurunan nilai rasio momen, seperti pada kolom C3 pada lantai 4 dan 10, kolom C4 dan C5 pada lantai 1. Untuk kombinasi gravitasi dan kombinasi gempa SNI 2847-2013 dengan tiga kasus seperti pada kombinasi gravitasi GSA 2003, rata-rata mengalami peningkatan momen lentur baik pa-

da kolom maupun balok. Nilai momen pada balok maupun kolom dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

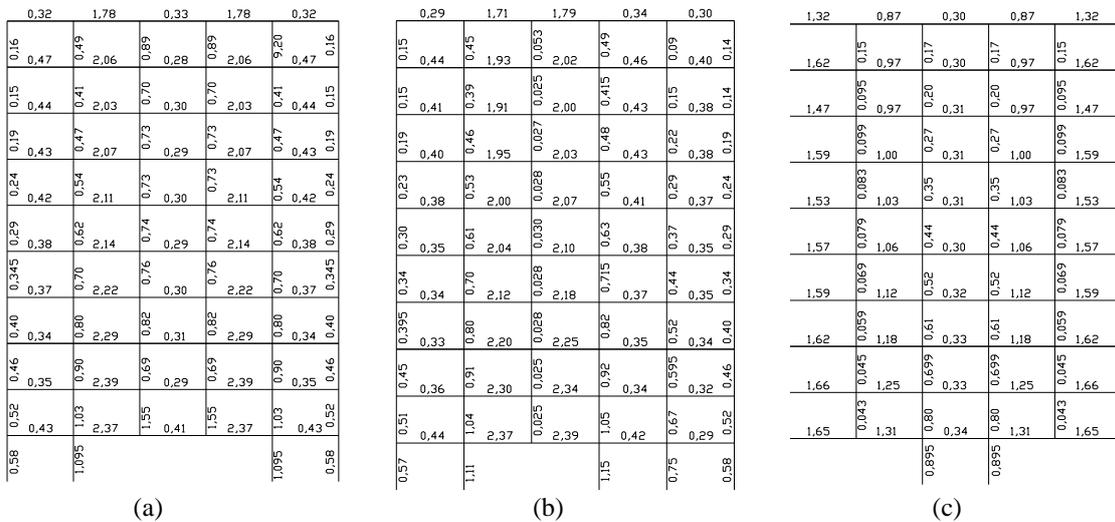
Demand Capacity Ratio Beban Gravitasi

a. Kombinasi Beban GSA 2003

Pada kasus 1, 2 dan 3 tidak terjadi keruntuhan progresif pada kolom. Pada kasus 1 Gambar 6 (a). balok B16 dan B39 pada lantai 2 terjadi keruntuhan progresif dengan nilai DCR sebesar 2,39. Pada kasus 2 Gambar 6 (b). terjadi keruntuhan progresif dengan nilai DCR terbesar 2,39 pada lantai 1 B27. Pada kasus 3 Gambar 6 (c). tidak terjadi keruntuhan progresif pada balok.



Gambar 5. (a) *Bending Moment Ratio* rangka C Kasus, (b) *Bending Moment Ratio* rangka C Kasus 2, (c) *Bending Moment Ratio* rangka B Kasus 3



Gambar 6. Nilai DCR (a) Kasus 1 rangka C, (b) Kasus 2 rangka C, (c) Kasus 3 rangka B
Tabel 3. Peningkatan Nilai *Bending Moment* pada Balok

Tabel 3. *Bending Moment Ratio* Akibat Beban Gravitasi

Kasus	Lantai	Balok	M3 saat elemen utuh (kN-m)	M3 saat elemen tidak utuh (kN-m)	Kriteria	Rasio
1	2	B16	-60,92	-488,34	GSA 2003	8,01
2	1	B27	-60,82	-486,96	GSA 2003	8,00
3	9	B46	-9,96	160,76	GSA 2003	16,13
1	5	B16	-33,31	-303,29	SNI Gravitasi	9,10
2	5	B27	-33,34	-297,32	SNI Gravitasi	8,91
3	9	B46	-6,57	114,63	SNI Gravitasi	17,43
1	1	B39	-38,17	-337,26	SNI Gempa	8,84
2	1	B39	-38,37,22	-336,37	SNI Gempa	8,77
3	1	B17	-38,162	-198,5	SNI Gempa	5,20

Tabel 4. Peningkatan Nilai *Bending Moment* pada Kolom

Kasus	Lantai	Kolom	Momen	Momen struktur eksisting (kN-m)	Momen saat elemen tidak utuh (kN-m)	Kriteria	Rasio
1	2	C11	M2	-0,04	294,67	GSA 2003	7497,89
2	2	C8	M2	0,04	-298,06	GSA 2003	7096,67
3	2	C3	M3	-7,23	-47,28	GSA 2003	6,54
1	2	C9	M3	-0,08	-332,52	SNI Gravitasi	4193,22
2	3	C8	M2	0,06	-210,89	SNI Gravitasi	3732,56
3	2	C5	M3	0,07	-0,17	SNI Gravitasi	2,62
1	2	C10	M3	11,14	-297,53	SNI Gempa	26,72
2	4	C10	M2	38,01	242,01	SNI Gempa	6,37
3	2	C6	M3	-2,02	-10,02	SNI Gempa	4,97

Dengan meningkatnya nilai momen pada balok maupun kolom, maka akan memicu terjadinya kerusakan berat, kegagalan hingga keruntuhan pada elemen struktur gedung tersebut. Untuk mengetahui terjadinya keruntuhan progresif pada elemen struktur balok ataupun kolom.

Ketahanan Batas (*Robustness Indicator*)

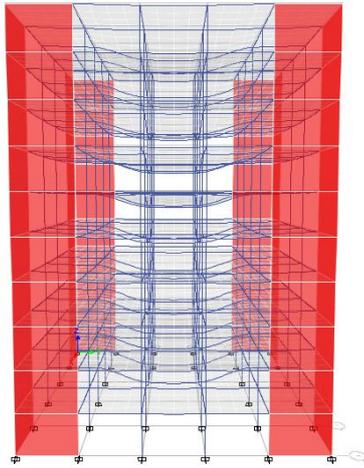
Tabel 5. *Robustness Indicator*

Kasus	Penghapusan Kolom	V_{intact} (kN)	$V_{damaged}$ (kN)	R
1	Middle	3691,072	3691,0719	0,99
2	Inner	3691,072	3691,0721	1,00
3	Corner	3691,072	3691,0722	1,00

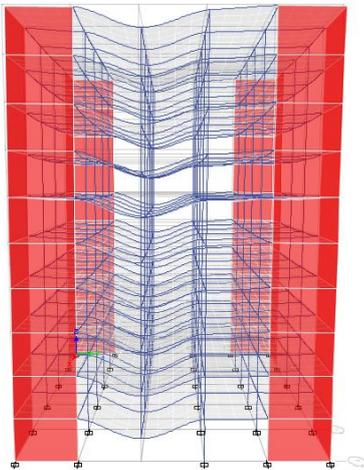
Dari Tabel 5. di atas, didapat bahwa nilai *robustness indicator* hampir sama dengan 1, maka struktur mamou memberikan alternatif penyaluran beban sehingga berjalan normal apabila struktur rusak.

Analisis Tipe Keruntuhan Progresif Gedung

Untuk mengetahui tipe keruntuhan progresif pada kasus 1 dan kasus 2 dilakukan analisis dengan memanfaatkan fitur *concrete design* pada *software* elemen hingga yang mengacu pada *code* ACI 318-11 *Building Code Requirements for Structural Concrete* (kode ini digunakan karena SNI 2847-2013 mengacu pada ACI 318-11). Dari deformasi yang terjadi (Gambar 7 dan Gambar 8) pada struktur gedung dapat diketahui bahwa tipe keruntuhan progresif adalah tipe *pancake*.



Gambar 7. Tipe Keruntuhan *Pancake* pada Kasus 1



Gambar 8. Tipe Keruntuhan *Pancake* pada Kasus 2

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, maka beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil distribusi sendi plastis yang terbentuk dari analisis *pushover*, mekanisme keruntuhan struktur yang terjadi adalah tipe keruntuhan balok (*beam sway mechanism*). Hal ini berarti struktur sudah memenuhi konsep desain *strong column weak beam*.
2. Ketika diberikan beban gravitasi dan beban gempa tanpa dihilangkan beberapa elemen kolom, struktur gedung beraturan sistem ganda ini sangat kecil kemungkinan mengalami keruntuhan progresif. Struktur sistem ganda mampu menahan beban lateral (gempa) atau gaya geser dasar yang terjadi.

3. Dari ketiga kasus didapat bahwa yang paling memungkinkan mengalami keruntuhan progresif adalah pada kasus 1 dan kasus 2 ketika kolom dibagian tengah dan bagian dalam dihilangkan.
4. Nilai *robustness indicator* yang didapat hampir sama dengan 1, maka struktur mampu memberikan jalur beban alternatif sehingga berjalan normal apabila struktur rusak.
5. Tipe keruntuhan progresif pada pemodelan gedung beraturan sistem ganda ini adalah tipe keruntuhan *pancake* yang dapat dilihat dari deformasi yang terjadi.

Saran

Saran yang mungkin dapat dipergunakan untuk penelitian lanjutan,

1. Analisis struktur dapat dilakukan dengan mencoba menghilangkan kolom di daerah lain, seperti pada lantai 2 atau yang berada di atasnya atau kolom di daerah bentang panjang atau bentang pendek.
2. Dapat melakukan analisis lanjutan terhadap struktur yang menggunakan *dampner* atau *base isolator* untuk melihat bagaimana proses keruntuhan progresif elemen struktur gedung.
3. Dapat melakukan analisis lebih lanjut dengan variasi jenis bangunan, variasi kondisi tanah dan variasi wilayah gempanya.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 318-11M. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete*
- Elvira. (2011). Simulasi Numerik Penomena *Progressive Collapse Pada Pada Struktur Beton Bertulang Akibat Beban Ledakan Bom*.
- General Services Administraton (GSA). (2003). *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines*.
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2010). *Peta Hazard Gempa 2010 Sebagai Acuan Dasar Perencanaan dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa*. Jakarta: Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.

- Parulian, P. (2016). *Kinerja Struktur Gedung Beraturan Dual System (Concrete Rangka – Rc Wall Structures) Menggunakan Metode Direct Displacement Based Design Dan Capacity Spectrum Method*.
- Puskim.pu.go.id. (2011). Nilai Spektral Gempa Kota Pekanbaru.
- Rakhshith, dan Radhakrishna. (2013). *Progressive Collapse Analysis Of Reinforced Concrete Rangkad Structure*, 2, 36–40.
- SNI-1726. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur. Bangunan Gedung Dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-2847. (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-1727. (2013). *Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Starossek, U., (2009). *Progressive Collapse Of Structures*, Thomas Telford Publishing.
- Sunamy, S.L., Binu, P., Girija, K., (2014). *Progressive Collapse Analysis Of A Reinforced Concrete Rangka Building*, 93–98.
- Tsai, M.-H., dan Lin, B.-H. (2008). *Investigation Of Progressive Collapse Resistance And Inelastic Response For An Earthquake-Resistant Rc Building Subjected To Column Failure*. *Engineering Structures*, 30(12), 3619-3628