

KERUNTUHAN PROGRESIF GEDUNG BERATURAN SISTEM GANDA

Dhika Fazrian¹⁾, Zulfikar Djauhari²⁾, Ridwan²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, ²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil
Program Studi Teknik Sipil S1, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Jl.HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : dhika.fazrian@student.unri.ac.id

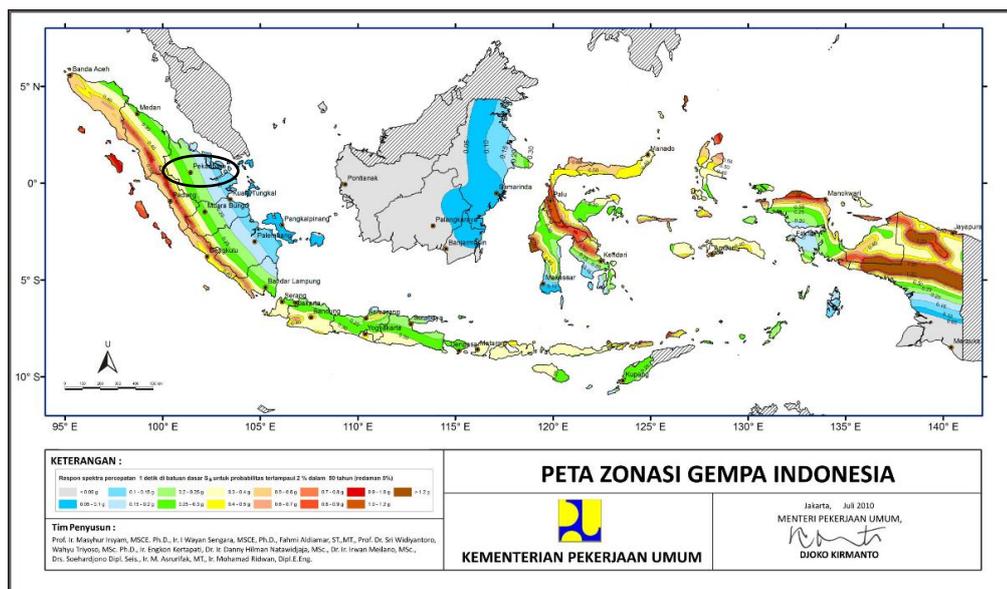
Abstract

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 analysed 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 Capcaity Ratio, Bending Moment Ratio And Robustness Indicator.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang



Gambar 1. Peta Zonasi Gempa Indonesia
(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum, 2010)

Indonesia adalah wilayah yang rawan bencana gempa bumi karena posisi geografisnya terletak di daerah lempeng tektonik aktif. Gambar 1. memperlihatkan posisi Indonesia terletak di antara tiga lempeng besar dunia (lempeng Indo-Australia, Eurasia, lempeng Pasifik) dan sembilan lempeng lainnya. Dalam konteks terhadap ruang kerja teknik sipil khususnya aspek perencanaan, maka perlu diperhatikan beban-beban yang bekerja terhadap struktur bangunan. Beban-beban yang diterima oleh struktur antara lain adalah beban hidup, beban mati, beban angin, dan beban gempa. Dengan adanya beban-beban tambahan akibat aktivitas perbaikan gedung dan perubahan dimensi struktur, maka potensi keruntuhan progresif pada elemen struktur seperti kolom atau balok akan terjadi apabila struktur tersebut tidak dianalisis dengan tepat dan akurat.

Keruntuhan progresif 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. 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. Lendutan 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). Manfaat utama dari penelitian ini adalah untuk

mengetahui urutan runtuhnya suatu komponen struktur.

1.2 Tinjauan Pustaka

Keruntuhan progresif (*progressive collapse*) merupakan suatu keruntuhan yang disebabkan oleh kegagalan 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 secara tidak proporsional (Rakshith K G & Rahdakrishna, 2013).

Menurut Sunamy S L et al. (2008), 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.

Contohnya adalah keruntuhan Apartemen Ronan Point di East London, Inggris tahun 1968 yang disebabkan oleh ledakan gas. Akibat dari ledakan gas ini menghancurkan sambungan antara dinding dengan lantai, dinding-dinding cor terpecah membuat 4 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.

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. Namun memiliki potensi menyelamatkan jiwa manusia lebih banyak dibandingkan dengan *pancake*.

3. Tipe keruntuhan campuran *Pancake* - Domino

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

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 yang ada pada

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,

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

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 diijinkan 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

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

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).

1.3 Perumusan Masalah

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. Pada penelitian ini dilakukan analisa keruntuhan struktur gedung untuk mengetahui karakteristik keruntuhan progresif suatu struktur bangunan gedung bertingkat akibat penambahan beban gravitasi dan akibat beban lateral gempa dengan cara menghilangkan salah satu elemen atau lebih dari struktur bangunan tersebut.

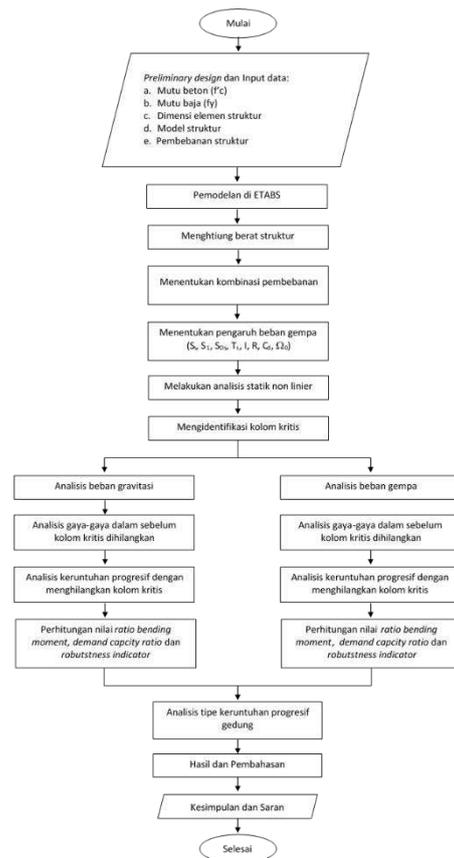
1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini untuk mengidentifikasi perilaku keruntuhan progresif struktur bangunan beton bertulang sistem ganda. Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pola kegagalan pada struktur sistem ganda.
2. Memberikan informasi agar perencana bangunan dapat memprediksi karakteristik keruntuhan komponen struktur.
3. Memberikan solusi permasalahan bila terjadi kasus pembongkaran struktur bangunan sistem ganda.
4. Memberikan kontribusi sebagai bahan referensi tentang karakteristik keruntuhan progresif struktur bangunan beton bertulang sistem ganda.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian



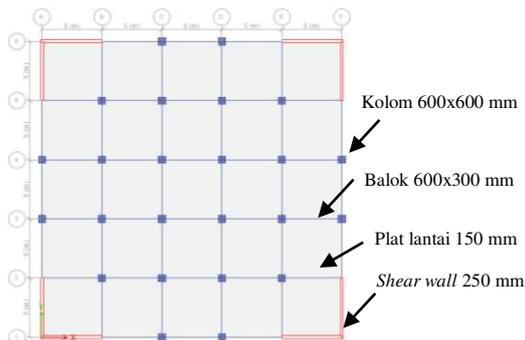
Gambar 2. Bagan alir penelitian

Prosedur analisis dalam tugas akhir ini secara keseluruhan dapat dilihat pada diagram alir Gambar 2. Bagan alir penelitian ini menggambarkan proses perencanaan mulai dari pemilihan material dan data-data struktur serta perhitungan beban hingga analisis struktur bangunan menggunakan *software ETABS*. Analisis keruntuhan progresif dilakukan pada pembebanan gravitasi dan gempa. Untuk mengetahui bagian kolom kritis dilakukan analisis nonlinier dengan melakukan analisa *pushover*. Kemudian bagian kolom kritis dihilangkan secara instan untuk mendapatkan nilai *bending moment ratio*, *demand capacity ratio* dan *robustness indicator*.

2.2 Data Struktur Gedung dan Pembebanan Struktur

Struktur gedung yang ditinjau pada penelitian ini merupakan struktur

gedung beraturan 10 lantai yang memiliki tinggi antar lantai 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 3. Mutu beton yang digunakan ada K-350 dengan kuat tekan $f_c' = 29,05$ MPa, tegangan leleh tulangan utama $f_{yc} = 400$ Mpa, tegangan leleh geser $f_{ys} = 240$ MPa.

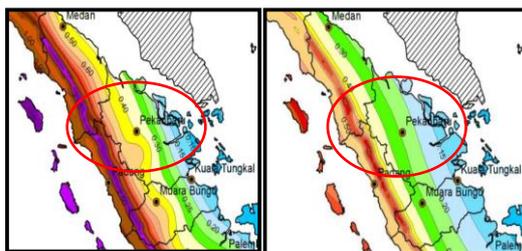


Gambar 3. Denah lantai gedung

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 $0,96 \text{ kN/m}^2$.

2.3 Beban Gempa

Lokasi pemodelan gedung adalah kota Pekanbaru, gedung wilayah perkantoran dengan jenis tanah sedang. Tipe struktur yang didesain adalah Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan risiko gempa rendah seperti yang terlihat pada Gambar 4. Dengan data lainnya yang mengacu pada SNI 1726-2012.



Gambar 4. Nilai respons spektra kota Pekanbaru

Beban gempa statik ekuivalen merupakan ragam pertama dari beban gempa respons spektrum sehingga gaya geser dasar gempa statik ekuivalen sebagai pematas untuk minimal gaya geser dasar gempa respons spektrum. Untuk nilai gaya geser gempa statik ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 1.

2.4 Pengecekan Sistem Ganda

Struktur ini dikatakan sebagai sistem ganda apabila sistem rangka struktur mampu menahan paling setidaknya 25% dari gaya gempa yang ditetapkan. Gaya geser dasar diperoleh dengan menjumlahkan seluruh gaya horizontal pada bagian dasar struktur akibat beban gempa yang diberikan.

Tabel 2. Proporsi Pembagian Gaya Geser Dasar

Parameter	Vx (kN)	Vy (kN)
Gaya Geser Struktur	1107,32	3691,07
Gaya Geser RC-Wall	1029,64	3432,32
Gaya Geser Rangka	77,68	258,75
Persentase RC-Wall	92,98%	92,98%
Persentase Rangka	7,01%	7,01%

Menurut Asneindra (2011) yang dikutip dari (Parulian, 2016), ditinjau dari gaya geser dasarnya, Tabel 2. terlihat bahwa proporsi gaya geser yang ditahan oleh sistem rangka belum mencapai 25% oleh karena itu, kapasitas portal harus dicek apakah mampu 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 mengacu pada *code ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete* (Code ini digunakan karena SNI 2847-2013 mengacu pada ACI 318-11). Dari hasil pengecekan didapat bahwa tidak ada elemen yang mengalami *overstress* (OS) sehingga sistem struktur dianggap sebagai sistem ganda.

Tabel 1. Distribusi Gaya Gempa Statik

Lantai	h_x (m)	h_x^3	W_x (kN)	$W_x h_x^3$ (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					

2.5 Perhitungan Tulangan

Agar beton tidak mengalami retak yang mengakibatkan kehancuran akibat 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 kN.m. Hasil dari perhitungan tulangan adalah untuk balok digunakan 4D19. Sedangkan untuk menghitung tulangan pada kolom menggunakan *software* bantuan berupa *SpColumn* dengan tulangan yang digunakan adalah 16D19.

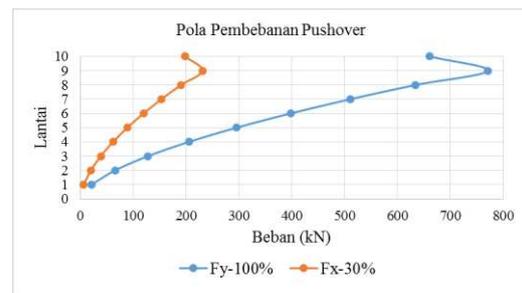
2.6 Analisis Statik Nonlinier Dan Identifikasi Kolom Kritis

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 ekuivalen seperti pada Gambar 5.
2. Mendefinisikan beban lateral *pushover* dan pemodelan sendi plastis.

3. Menjalankan analisis *pushover*

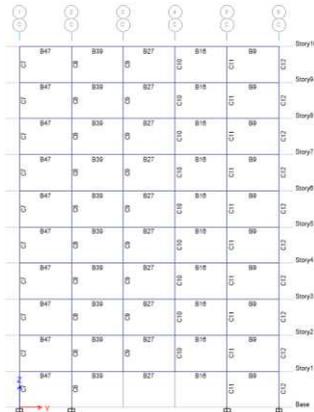
4. Kurva kapasitas. Hasil dari analisis *pushover* berupa kurva kapasitas dan distribusi sendi plastis.



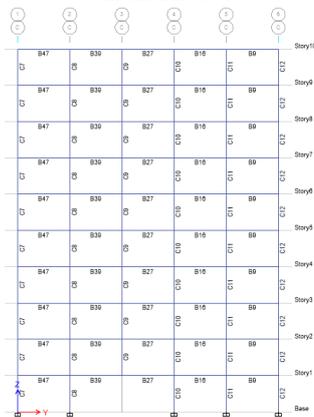
Gambar 5. Pola pembebanan *Pushover*

Hasil analisis statik nonlinier tidak bisa mengidentifikasi bagian kolom kritis karena bagian yang kritis adalah balok, sehingga untuk penentuan kasus penghapusan kolom digunakan metode GSA 2003 dengan lokasi kolom yang dihapuskan adalah kolom bagian tengah pada lantai 1 C9, C10, C15, C16, kolom bagian dalam pada lantai 1 C1, C4, C9, C15, C20, C23 1 baris, dan kolom bagian sudut pada lantai 1 C3, C6, C19, C22 seperti yang terlihat pada Gambar 6, 7 dan 8. Pemilihan penghapusan kolom pada lantai 1 karena dianggap daerah yang paling kritis, dilakukan analisis dengan memanfaatkan fitur *concrete design* pada *software* elemen

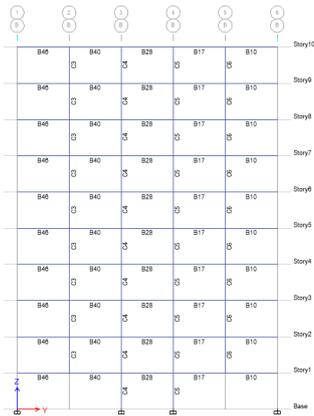
hingga *code ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete*.



Gambar 6. Penghapusan kolom pada rangka C untuk kasus 1



Gambar 7. Penghapusan kolom pada rangka C untuk kasus 2



Gambar 8. Penghapusan kolom pada rangka B untuk kasus 3

2.7 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*).

III. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Statik Nonlinier

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sendi plastis yang terbentuk. Pada beban gravitasi tidak terbentuk sendi plastis, namun ketika dilakukan analisis *pushover* pada tahap I sudah mulai terbentuk sendi plastis dengan kondisi B-IO berwarna merah muda yang menunjukkan kondisi elastis. Distribusi sendi plastis terus meningkat seiring bertambahnya beban lateral, sehingga pada tahap ke 4 hingga tahap ke 5 terbentuk kondisi C-D berwarna kuning yang berarti *collapse*. Mulai dari tahap 4 hingga 5 terbentuk sendi plastis pada beberapa elemen kolom namun menunjukkan kondisi IO-LS yaitu warna biru tua yang merupakan kondisi *immediate occupancy*. Berdasarkan distribusi 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*.

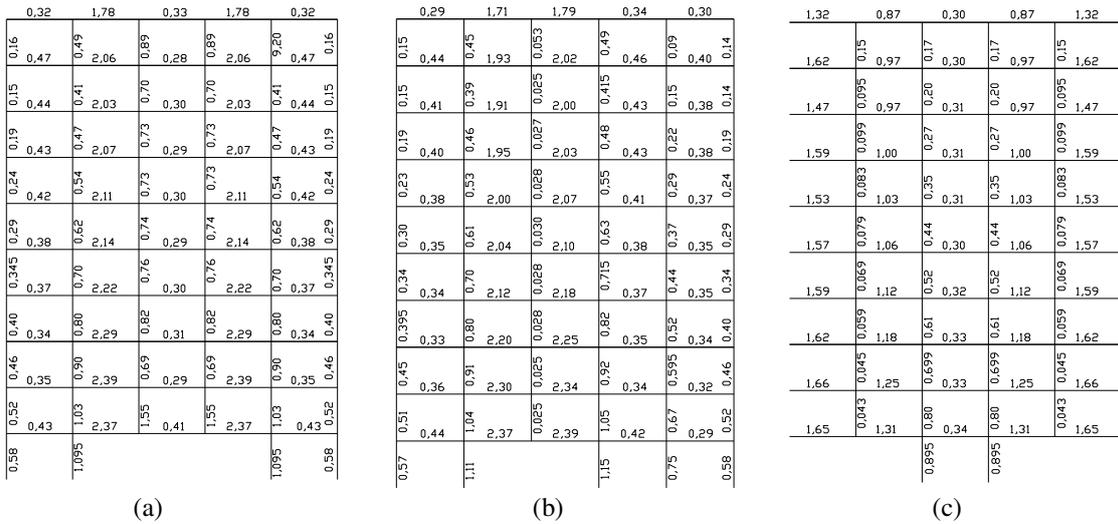
3.2 Perbandingan Momen Lentur (*Bending Moment Ratio*)

Pada bagian ini ditampilkan *bending moment ratio* untuk struktur yang masih utuh (*existing structure*) dan struktur yang telah dihilangkan beberapa komponen kolomnya. Baik kolom maupun balok mengalami peningkatan momen yang bervariasi.

3.2.1 *Bending Moment Ratio* Akibat Beban Gravitasi

- Kombinasi Beban GSA 2003

Pada kasus 1, kasus 2 maupun kasus 3 ini terjadi peningkatan *bending moment ratio* pada kolom dan balok



Gambar 12. 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

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

3.4 Ketahanan Batas (*Robustness Indicator*)

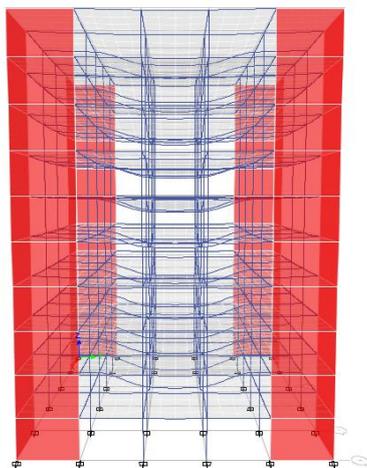
Tabel 5. *Robustness Indicator*

Kasus	Penghapusan Kolom	V_{intact} (kN)	$V_{damaged}$ (kN)	R
1	Middle	3691,0,72	3691,0719	0,99
2	Inner	3691,072	3691,0721	1,00
3	Corner	3691,072	3691,0722	1,00

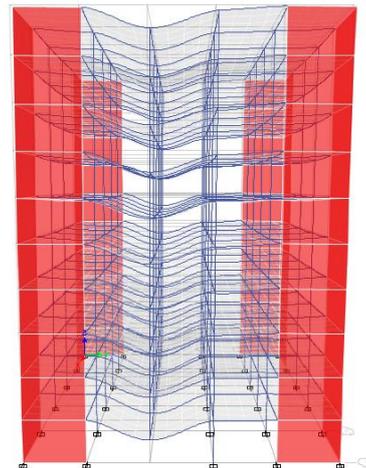
Dari Tabel 5. di atas, didapat bahwa nilai *robustness indicator* hampir sama dengan 1, maka struktur mampu memberikan alternatif penyaluran beban sehingga berjalan normal apabila struktur rusak.

3.5 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 13 dan Gambar 14) pada struktur gedung dapat diketahui bahwa tipe keruntuhan progresif adalah tipe *pancake*.



Gambar 13. Tipe Keruntuhan *Pancake* pada Kasus 1



Gambar 14. Tipe Keruntuhan *Pancake* pada Kasus 2

IV. 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 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 *dampers* 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.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Elvira. (2011). Simulasi Numerik Penomena *Progressive Collapse* Pada Pada Struktur Beton Bertulang Akibat Beban Ledakan Bom.
- General Services Administrator (GSA). (2003). *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines*.
- Kementrian 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*.
- PPURG. (1987). *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah Dan Gedung*. Jakarta: Kementrian Pekerjaan Umum.
- Puskim.pu.go.id. (2011). Nilai Spektral Gempa Kota Pekanbaru. Retrieved January 9, 2017, http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/
- Rakhshith K G & 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.
- Sunamy, S.L., Binu, P., Girija, K., (2014). *Progressive Collapse Analysis Of A Reinforced Concrete Rangka Building*, 93–98.
- Tsai, M.-H., & 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.