

Analisis Keruntuhan Bertahap (*Progressive Collapse*) pada Gedung Akademik 7 Lantai di Yogyakarta

Progressive Collapse Analysis at the Yogyakarta 7th Floor Academic Building

Alwan Wisnu Pamungkas, Taufiq Ilham Maulana

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Perancangan struktur bangunan tahan gempa dengan simulasi penempatan dinding geser merupakan hal yang penting di Indonesia khususnya di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta, untuk mengurangi kerawanan apabila terjadi keruntuhan bangunan yang didahului oleh kolom di lantai bagian paling bawah maka harus digunakan peraturan-peraturan yang berlaku. Oleh sebab itu penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja, karakteristik struktur bangunan dan tipe keruntuhan progresif berdasarkan *General Services Administrations (GSA) 2013*. GSA adalah suatu administrasi layanan umum yang memberikan pedoman untuk keruntuhan progresif pada struktur bangunan. Tujuan dari GSA untuk mengurangi potensi terjadinya keruntuhan progresif dengan memberikan simulasi skenario penghapusan kolom. Keruntuhan progresif merupakan tingkat kerusakan atau kehancuran yang tidak proporsional dengan besarnya suatu kejadian setelah dilakukan penghapusan beberapa kolom berdasarkan acuan GSA 2013. Penelitian ini menggunakan *software* SAP2000 versi 21. Skenario penghapusan kolom disimbolkan dengan kasus 1 (penghapusan kolom di bagian sudut), kasus 2 (penghapusan kolom tengah di bagian sisi pendek), dan kasus 3 (penghapusan kolom tengah di bagian sisi panjang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur bangunan merupakan strong coloum weak beam. Semua kolom pada struktur bangunan yang di simbolkan kasus 1, kasus 2, dan kasus 3 tidak ada yang mengalami keruntuhan progresif, akan tetapi sebagian besar elemen balok mengalami keruntuhan progresif dan *collapse*. Dari ketiga variasi penempatan dinding geser, struktur bangunan dengan menggunakan dinding geser bagian tengah dan samping ini mampu menahan gaya gravitasi, gaya gempa lateral, dan mempunyai kemungkinan mengalami keruntuhan progresif yang jauh lebih kecil dibandingkan variasi penempatan dinding geser yang lainnya. Berdasarkan deformasi dan nilai DCR yang terjadi pada struktur bangunan, dapat disimpulkan bahwa semua struktur bangunan termasuk ke dalam tipe keruntuhan domino, tipe keruntuhan *zipper* dan tipe keruntuhan *instability*.

Kata kunci: Keruntuhan progresif, GSA 2013, DCR, *Shear wall*, SAP2000

Abstract. The design of earthquake resistant building structures by simulating the placement of shear wall is important in Indonesia, especially in the Special Region of Yogyakarta, to reduce vulnerability in the event of a building collapse which is preceded by a column at the bottom of the floor. Therefore this research was carried out to analyze the performance, structural characteristics and type of progressive collapse based on the *General Services Administrations (GSA) 2013*. The GSA is a public service administration that provides guidance for progressive collapse in building structures. The aim of GSA is to reduce the potential for progressive collapse by providing a simulation of column deletion scenarios. Progressive collapse is a level of damage or destruction that is not proportional to the magnitude of an event after deletion of several columns based on the GSA 2013 reference. This study uses SAP2000 version 21 software. The columns removal scenario are symbolized by case 1 (removal of corner coloum), case 2 (removal of the middle column on short side), and case 3 (removal of middle column on long side). The results showed that the building structure was a strong coloum weak beam. All columns in the building structure symbolized case 1, case 2, and case 3 have no progressive collapse, but most beam elements experience progressive collapse and collapse. Of the three variations of the placement of shear wall, the structure of the building using the central and side shear wall is able to withstand gravitational forces, lateral earthquake forces, and has the possibility of experiencing progressive collapse which is much smaller than the variations in the placement of other shear wall. Based on the deformation and DCR values that occur in the structure of the building, it can be concluded that all building structures are included in the domino collapse type, zipper collapse type and instability collapse type.

Keywords: Progressive collapse, GSA 2013, DCR, *Shear wall*, SAP2000

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang dilewati oleh daerah Lingkaran Api Pasifik (*Ring of Fire*), oleh sebab itu negara Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar akan terjadinya bencana alam gempa. Sebagai negara yang rawan terhadap bencana alam gempa, struktur bangunan yang berada di Indonesia khususnya di Daerah Istimewa Yogyakarta harus dirancang agar bangunan mampu menahan bencana gempa bumi tersebut. Bencana gempa bumi ini salah satunya menyebabkan keruntuhan pada struktur bangunan, yang didahului oleh kegagalan kolom. Kolom dibagian mana yang mengalami kegagalan dan menyebabkan keruntuhan pada saat terjadinya gempa bumi belum bisa diprediksi, sehingga perlu dilakukan simulasi penghapusan kolom yang beracuan pada GSA 2013.

Astuti (2014) penelitian ini dilakukan 3 macam modifikasi perletakan dinding geser untuk mengetahui pengaruh penambahan dinding geser terhadap waktu getar alami struktur. Penampang dinding geser berbentuk I, dan U. Dinding geser diletakkan dibagian sudut bangunan dan di bagian tangga darurat. Effendi dkk. (2017) semua konfigurasi dinding geser dianalisis dengan *software* ETABS. Pemasangan dinding geser pada struktur gedung ini berbagai model variasi tata letak dinding geser yang berbeda-beda seperti dibagian sudut gedung, dibagian tengah, dan dibagian samping gedung. Nurcahyo dkk. (2016) penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dampak ketidakaturan struktur terhadap eksentrisitas struktur bangunan dan efektivitas berbagai konfigurasi dinding geser untuk menahan beban gempa. Bangunan yang akan dianalisis adalah gedung Rumah Sakit Aulia 9 lantai dengan sejarah waktu muat gempa. Andalas dkk. (2016) penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penempatan posisi dinding geser pada suatu model struktur bangunan menggunakan analisis *statik non-linear (pushover)* menggunakan *software* SAP2000. Penampang dinding geser hanya berbentuk I saja, dengan penempatan dinding geser dibagian tengah pada bagian sisi pendek dan sisi panjang struktur gedung. Jumlah dinding geser 4 buah dengan ketebalan 40 cm.

Riantoby dkk. (2014) penelitian ini tentang evaluasi kinerja struktur dengan analisis *pushover* menggunakan bantuan program ETABS. Hasil penelitian ditunjukkan perpindahan pada gedung dibawah batas yang diizinkan. Bangunan mengalami kerusakan kecil yang diakibatkan kekakuan struktur, bangunan termasuk ke dalam level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Nugroho (2015) juga dilakukan penelitian tentang evaluasi kinerja bangunan. Metode analisis yang digunakan analisis *pushover*. Hasil penelitian ditunjukkan model bangunan B2 tidak ada yang melewati *Life Safety (LS)* sehingga kinerja dari struktur disimpulkan baik. Aribisma dkk. (2015) juga dilakukan penelitian tentang evaluasi gedung MNC Tower menggunakan SNI 03-1726-2012 dengan metode analisis *pushover*. Penelitian ini digunakan bantuan *software* SAP2000. Hasil penelitian ditunjukkan bahwa kinerja bangunan MNC Tower masih mampu memenuhi syarat di SNI 03-1726-2012 dan setelah dilakukan *running* SAP2000 kinerja yang ditunjukkan dari gedung ini tergolong dalam kondisi baik karena masih dalam kinerja level warna hijau.

(GSA, 2013) keruntuhan progresif didefinisikan sebagai tingkat kerusakan atau kehancuran yang tidak proporsional dengan besarnya suatu kejadian. Tiga lokasi penghapusan kolom yang disarankan menurut GSA 2013 sebagai berikut.

- 1) Penghapusan pertama : Kondisi kolom sudut
- 2) Penghapusan kedua : Kondisi kolom sisi panjang
- 3) Penghapusan ketiga : Kondisi kolom sisi pendek

Singh dkk. (2015) keruntuhan progresif adalah reaksi berantai atau berkelanjutan dari kegagalan yang merambat baik di seluruh atau sebagian struktur tidak proporsional dengan kegagalan lokal aslinya. Fazrian dkk. (2017) keruntuhan progresif merupakan keruntuhan dikarenakan kegagalan satu/lebih elemen struktur bangunan yang mengakibatkan keruntuhan berkelanjutan pada elemen lainnya. Adapun tipe-tipe keruntuhan progresif sebagai berikut.

- 1) Tipe keruntuhan *pancake*
- 2) Tipe keruntuhan domino
- 3) Tipe keruntuhan campuran *pancake-domino*
- 4) Tipe keruntuhan *zipper*
- 5) Tipe keruntuhan *instability*

Yolanda dkk. (2017) penelitian ini bertujuan untuk menguji runtuhnya progresif struktur bangunan teratur dan tidak teratur. Penelitian menggunakan bantuan *software* SAP2000. Struktur bangunan memiliki jumlah lantai sebanyak 10 lantai tanpa menggunakan dinding geser. Analisis dilakukan dengan dihapus satu atau lebih kolom kritis dengan mengacu panduan *General Services Administration* (GSA). Dari hasil analisis struktur beraturan dan tidak beraturan tersebut mempunyai tipe keruntuhan progresif yaitu tipe keruntuhan domino. Bao dan Kunnath (2010) dalam penelitian ini model dinding geser yang disederhanakan dikembangkan untuk disimulasikan perilaku inelastis dari sistem dinding geser bertingkat karena kehilangan bagian signifikan dari dinding geser di lantai 1. Bangunan gedung menggunakan dinding geser berbentuk siku dan I yang di tempatkan pada sisi tengah bagian samping dan dibagian sudut. Ren dkk. (2014) penelitian ini tentang runtuhnya progresif struktur bangunan pada beton dan rangka baja struktur. Hasil menunjukkan bahwa ada perbedaan kinerja pencegahan keruntuhan progresif untuk berbeda *layout* struktural. Hasil penelitian ini diberikan referensi untuk desain pencegahan keruntuhan progresif bertingkat tinggi struktur beton bertulang dengan dinding geser. Arshian dan Morgenthal (2017) penelitian ini tentang respon dinamis *nonlinier* 3D dari struktur beton bertulang skenario penghapusan kolom berurutan. Hasil analisis ditunjukkan bahwa penguatan balok dengan baja ikatan eksternal pelat secara signifikan meningkatkan keuletan rotasi pada bagian balok dan memungkinkan kerusakan struktur untuk mengakomodasi deformasi yang lebih besar. Weng dkk. (2017) analisis keruntuhan progresif beton bertulang 2D pada skenario penghapusan kolom tunggal atau ganda. Untuk melacak urutan runtuhnya struktur, algoritma penghapusan kolom didasarkan pada tindakan gabungan kegagalan lentur, geser, dan aksial. Amiri dkk. (2018)

penelitian ini tentang penilaian kerentanan bangunan terhadap keruntuhan progresif menggunakan *Nonlinear Dynamic* analisis ini memiliki akurasi lebih besar dibandingkan dengan metode lain. Salah satu kelebihan dari formula yang diusulkan adalah kemungkinan memprediksi tegangan dan deformasi pada anggota struktur beton bertulang setelah pemindahan kolom.

2. Landasan Teori

Pembebanan Gravitasi

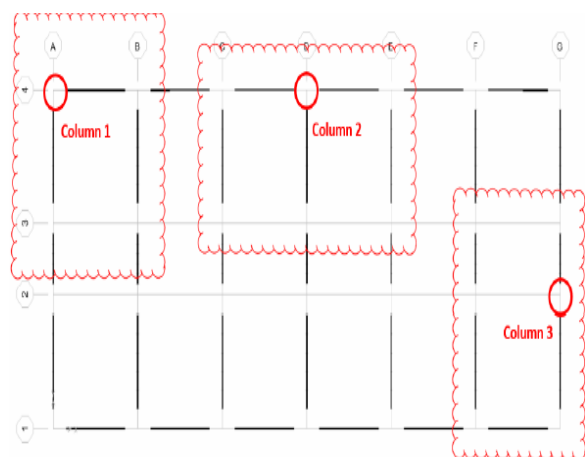
Pada perencanaan sebuah gedung, baik bertingkat ataupun tidak perlu memperhatikan segi kekuatan gedung, kenyamanan, ekonomis, dan pengaruh terhadap lingkungan. Salah satu aspek yang harus terpenuhi adalah dalam hal pembebanan yang telah diatur dalam SNI 03-1727-2013 mengenai beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain.

Analisis Gempa Berdasarkan SNI 1726:2012

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 dalam merencanakan suatu bangunan struktur harus memerlukan penentuan nilai respons spektral pada percepatan getaran perioda pendek (F_a) yaitu 0,2 detik dan percepatan yang mewakili getaran perioda 1 detik (F_v). Nilai tersebut dapat dilihat pada SNI 03-1726-2012 atau pada situs Kementerian Pekerjaan Umum bagian Pusat Pengembangan dan Penelitian Permukiman.

Analisis Progressive Collapse

Skenario penghapusan kolom berdasarkan GSA 2013 dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Lokasi penghapusan kolom

Suatu struktur dikatakan mengalami keruntuhan progresif apabila nilai *Demand Capacity Ratio* (DCR) berdasarkan GSA 2013 sebagai berikut.

- 1) $DCR > 2,0$ untuk konfigurasi struktur bangunan yang beraturan
- 2) $DCR > 1,5$ untuk konfigurasi struktur bangunan yang tidak beraturan

DCR (*Demand Capacity Ratio*) yaitu perbandingan antara momen maksimum suatu elemen pada struktur bangunan terhadap kuat nominal suatu elemen.

3. Metode Penelitian

Tahapan Penelitian

Penelitian harus dilaksanakan secara sistematis dengan menggunakan tahapan yang teratur dan jelas, sehingga akan mendapatkan hasil yang sesuai diharapkan. Oleh sebab itu, pelaksanaan penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap, sebagai berikut.

- 1) Tahap Pengumpulan Data

Data yang didapatkan oleh penulis sewaktu melakukan kerja praktik pada semester 6 lalu, data tersebut meliputi gambar rencana proyek (denah, potongan, tampak bangunan, detail balok, kolom dan penampang elemen struktur), data pengujian tanah dan beberapa informasi yang diperoleh berdasarkan komunikasi pada saat melakukan kerja praktik.

- 2) Tahap Studi Literatur

Pada tahap ini perlu dilakukan studi literatur untuk menambah ilmu yang berkaitan dengan penelitian.

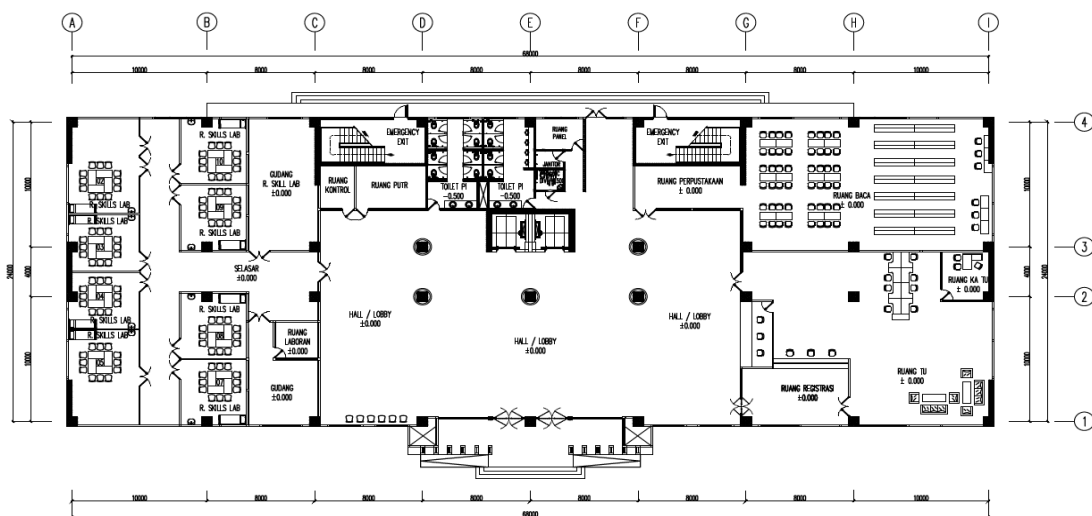
- 3) Pemodelan dan Pembebanan

Dari gambar kerja yang telah diberikan oleh pihak proyek, penulis memodelkan gambar kerja tersebut menggunakan *software* SAP2000 versi 21 sesuai aturan SNI yang berlaku.

- 4) Perbandingan Hasil Output dan Penulisan Laporan.

Data Teknis Bangunan

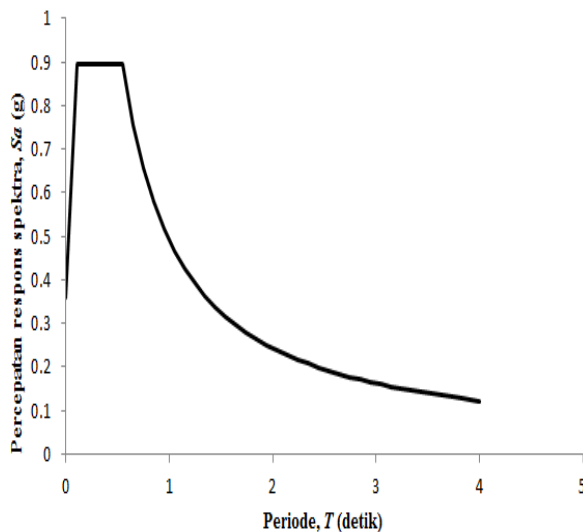
Penelitian ini dilakukan pada proyek Gedung Akademik 7 Lantai Yogyakarta yang terletak di Jalan *Ringroad* Selatan, Tamanan, Banguntapan, Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta. Gedung ini mempunyai fungsi sebagai gedung akademik perkuliahan di wilayah Yogyakarta dengan struktur beton bertulang dimana struktur gedung ini mempunyai jumlah 7 lantai dengan atap berupa dak beton. Data-data yang digunakan pada penelitian ini data sekunder, yaitu data yang diperoleh dari pihak proyek pada saat penulis melakukan kerja praktik. Mutu rencana beton sebesar 30 Mpa, mutu baja tulangan yang digunakan sebesar 400 Mpa. Dimensi balok induk 600×800 mm, balok anak 1 350×650 mm, balok anak 2 300×600 mm balok bordes 200×400 mm, dan balok sloof sebesar 600×800 mm. Untuk dimensi kolom K1, K2, K3, K4 sebesar 1000×1000 mm dan kolom KS sebesar 800×800 mm. Dimensi plat lantai S1, S2, S3 sebesar 150 mm, plat lantai S2 125 mm, plat lantai S4 140 mm untuk elemen *shear wall* sebesar 250 mm. Denah rencana bangunan dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2 Denah rencana bangunan

Pembebanan

Pembebanan berdasarkan SNI 03-1726-2012 “Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung” SNI 03-2847-2013 “Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung”, dan SNI 03-1727-2013 “Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain”. Bangunan Perkuliahan Gedung Akademik Yogyakarta yang terletak di Jalan Ringroad Selatan, Tamanan, Banguntapan, Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan jenis tanah berupa tanah sedang, maka kelas situsnya adalah tanah sedang (SD). Untuk mencari nilai S_s dan S_l bisa didapatkan pada SNI 1726:2012 atau situs Kementerian Pekerjaan Umum bagian Pusat Pengembangan dan Penelitian Permukiman. Beban gempa respons spektrum didapatkan dari analisis desain spektral wilayah Yogyakarta dengan nilai S_s sebesar 1,344 dan nilai S_l sebesar 0,483. Setelah semua parameter percepatan respons spektrum dan percepatan spektrum desain telah didapatkan langkah selanjutnya yaitu membuat grafik respons spektrum seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik respons spektrum (SNI 03-1726-2012)

Tahapan selanjutnya setelah analisis pembebanan struktur bangunan yaitu dimasukkan hasil analisis ke dalam *software* SAP2000 versi 21 kemudian *running* program lalu dibandingkan hasil *output* sebelum dilakukan skenario keruntuhan progresif dan sesudah dilakukan skenario keruntuhan progresif sesuai acuan GSA 2013.

4. Hasil dan Pembahasan

Analisis Progressive Collapse

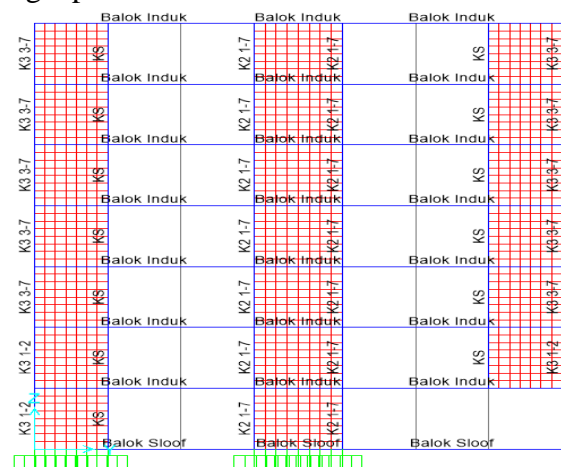
Dari ketiga kondisi dilakukan perhitungan berdasarkan kriteria *General Services Administrations* (GSA, 2013) dengan melakukan tiga variasi penempatan dinding geser selanjutnya dibandingkan ketiga hasil analisis progresif tersebut dengan analisis statis linier digunakan kombinasi pembebanan $2(DL + 0,25LL)$ dimana DL merupakan beban mati pada struktur bangunan dan LL merupakan beban hidup pada struktur bangunan.

Kapasitas Rasio (Demand Capacity Ratio)

DCR (*Demand Capacity Ratio*) yaitu perbandingan antara momen maksimum suatu elemen pada struktur bangunan terhadap kuat nominal suatu elemen. Dari kriteria penghapusan kolom menurut GSA 2013 di atas penulis mengkonfigurasi bangunan struktur menjadi.

- 1) Struktur bangunan menggunakan dinding geser bagian samping (Bangunan A)
- 2) Struktur bangunan menggunakan dinding geser bagian tengah (Bangunan B)
- 3) Struktur bangunan menggunakan dinding geser bagian samping dan tengah (Bangunan C)

Setiap struktur bangunan dilakukan analisis keruntuhan progresif dengan dilakukan penghapusan kolom sesuai acuan GSA 2013 yang disimbolkan Kasus 1 (kondisi kolom sudut), Kasus 2 (kondisi kolom tengah sisi pendek), dan Kasus 3 (kondisi kolom tengah sisi panjang). Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 berikut merupakan contoh skenario penghapusan kolom berdasarkan GSA 2013.



Gambar 4 Penghapusan kolom sudut

Berdasarkan Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3, dengan kombinasi pembebanan untuk GSA 2013 sebesar $2(DL+0,25LL)$, SNI Gravitasi sebesar $1,2DL+1,6LL$, dan SNI Gempa sebesar $1,38DL+1,3Qe+1LL$ dapat disimpulkan bahwa struktur bangunan A beberapa elemen balok mengalami keruntuhan dan *progressive collapse*, hanya elemen balok anak 2 30×60 dalam kategori “Aman” pada pembebanan SNI Gravitasi dan SNI Gempa untuk kasus 2. Untuk struktur bangunan B dapat dilihat pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 4 DCR balok bangunan B kasus 1

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	1,71	4,028	Progresif
Induk	GSA 2013	2,35	4,258	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,74	1,937	Runtuh
Anak 2	GSA 2013	1,09	1,099	Runtuh
Sloof	SNI Gravitasi	1,49	2,935	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,14	3,020	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	1,58	1,488	Runtuh
Anak 2	SNI Gravitasi	1,09	0,926	Aman
Sloof	SNI Gempa	1,60	3,039	Progresif
Induk	SNI Gempa	1,46	3,665	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,79	1,628	Runtuh
Anak 2	SNI Gempa	1,04	0,953	Aman

Tabel 5 DCR balok bangunan B kasus 2

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	1,98	4,652	Progresif
Induk	GSA 2013	2,65	4,802	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,80	2,007	Progresif
Anak 2	GSA 2013	1,29	1,293	Runtuh
Sloof	SNI Gravitasi	1,74	3,433	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,46	3,468	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	1,68	1,584	Runtuh
Anak 2	SNI Gravitasi	1,23	1,043	Runtuh
Sloof	SNI Gempa	1,85	3,531	Progresif
Induk	SNI Gempa	1,88	4,729	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,76	1,599	Runtuh
Anak 2	SNI Gempa	1,17	1,071	Runtuh

Tabel 6 DCR balok bangunan B kasus 3

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	2,99	7,023	Progresif
Induk	GSA 2013	3,11	5,635	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,00	1,116	Runtuh
Anak 2	GSA 2013	1,94	1,953	Runtuh
Sloof	SNI Gravitasi	2,64	5,207	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,82	3,975	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	0,99	0,934	Aman
Anak 2	SNI Gravitasi	1,70	1,438	Runtuh
Sloof	SNI Gempa	2,80	5,343	Progresif
Induk	SNI Gempa	1,85	4,668	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,00	0,912	Aman
Anak 2	SNI Gempa	2,00	1,834	Runtuh

Berdasarkan Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6, dapat disimpulkan bahwa hanya balok anak 30×60 (kasus 2) dan balok 30×65 (kasus 3) elemen struktur bangunan B yang dalam kategori “Aman” pada pembebanan SNI Gravitasi dan SNI Gempa, selain itu semua elemen balok mengalami keruntuhan atau *collapse* ($DCR > 1$) dan keruntuhan progresif atau mengalami *progressive collapse* ($DCR > 2$). Untuk struktur bangunan C dapat dilihat pada Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9 sebagai berikut.

Tabel 7 DCR balok bangunan C kasus 1

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	1,86	4,028	Progresif
Induk	GSA 2013	3,01	5,445	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,05	1,807	Runtuh
Anak 2	GSA 2013	1,15	1,077	Runtuh
Sloof	SNI Gravitasi	1,61	2,935	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,77	3,771	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	0,99	1,372	Runtuh
Anak 2	SNI Gravitasi	1,01	0,879	Aman
Sloof	SNI Gempa	1,73	3,039	Progresif
Induk	SNI Gempa	1,90	4,483	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,11	1,695	Runtuh
Anak 2	SNI Gempa	1,05	0,968	Aman

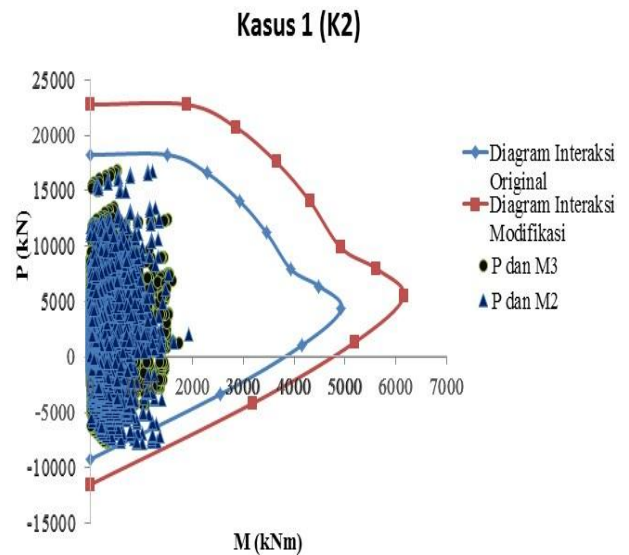
Tabel 8 DCR balok bangunan C kasus 2

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	1,50	3,241	Progresif
Induk	GSA 2013	2,45	4,432	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,08	1,858	Runtuh
Anak 2	GSA 2013	1,03	0,968	Aman
Sloof	SNI Gravitasi	1,32	2,390	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,29	3,124	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	1,06	1,474	Runtuh
Anak 2	SNI Gravitasi	1,02	0,893	Aman
Sloof	SNI Gempa	1,40	2,460	Progresif
Induk	SNI Gempa	2,37	5,599	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,06	1,620	Runtuh
Anak 2	SNI Gempa	1,01	0,931	Aman

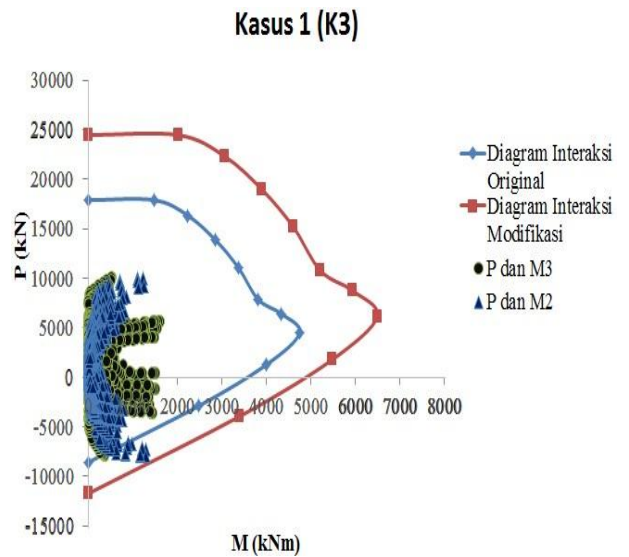
Tabel 9 DCR balok bangunan C kasus 3

Balok	Kriteria	Rasio	DCR ($M_u/\phi M_n$)	Kategori
Sloof	GSA 2013	3,25	7,022	Progresif
Induk	GSA 2013	3,12	5,644	Progresif
Anak 1	GSA 2013	1,01	1,748	Runtuh
Anak 2	GSA 2013	2,07	1,938	Runtuh
Sloof	SNI Gravitasi	2,86	5,207	Progresif
Induk	SNI Gravitasi	2,92	3,981	Progresif
Anak 1	SNI Gravitasi	1,01	1,404	Runtuh
Anak 2	SNI Gravitasi	1,64	1,429	Runtuh
Sloof	SNI Gempa	3,05	5,343	Progresif
Induk	SNI Gempa	1,93	4,540	Progresif
Anak 1	SNI Gempa	1,01	1,545	Runtuh
Anak 2	SNI Gempa	1,93	1,788	Runtuh

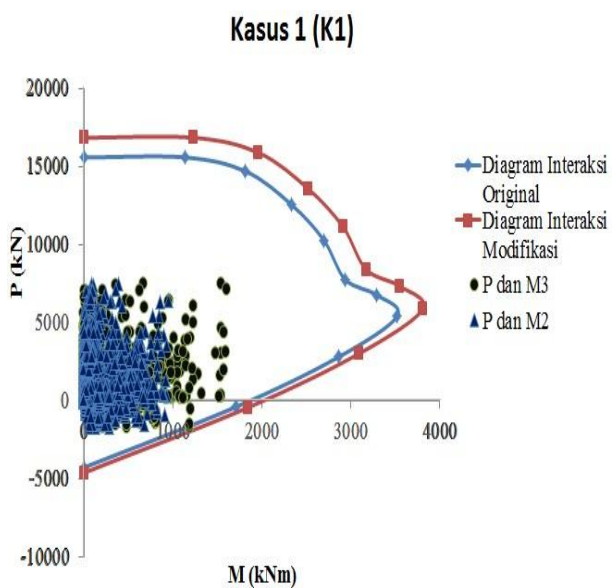
Berdasarkan Tabel 7, Tabel 8, dan Tabel 9, dapat disimpulkan bahwa hanya elemen balok anak 30×60 (kasus 1 dan kasus 2) struktur bangunan C (Struktur bangunan hanya dengan menggunakan dinding geser bagian tengah) dalam kategori “Aman” selain itu semua elemen balok lainnya mengalami keruntuhan dan *progressive collapse*. Untuk mengetahui nilai DCR pada elemen kolom salah satunya dengan cara menggunakan analisis diagram interaksi seperti pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 20 merupakan contoh hasil analisis untuk struktur bangunan C. Gambar ini didapatkan dengan cara memasukkan nilai hubungan P dengan M_2 (disimbolkan segitiga) dan nilai hubungan P dengan M_3 (disimbolkan lingkaran) sebelum dan sesudah dilakukan penghapusan kolom ke dalam diagram interaksi. Untuk diagram interaksi yang berwarna biru merupakan diagram interaksi sebelum dilakukan analisis keruntuhan progresif sedangkan diagram interaksi yang berwarna merah merupakan diagram interaksi modifikasi sesudah dilakukan analisis keruntuhan progresif yang diperoleh dari *output* SAP2000 versi 21. Kemudian untuk kasus 1, kasus 2, dan kasus 3 data dibandingkan sesuai plot P, M_2 , dan M_3 dengan diagram interaksi sebelum dan sesudah dilakukan penghapusan kolom. *Demand Capacity Ratio* (DCR) kolom merupakan selisih dari diagram interaksi sebelum dan sesudah dilakukan penghapusan kolom.



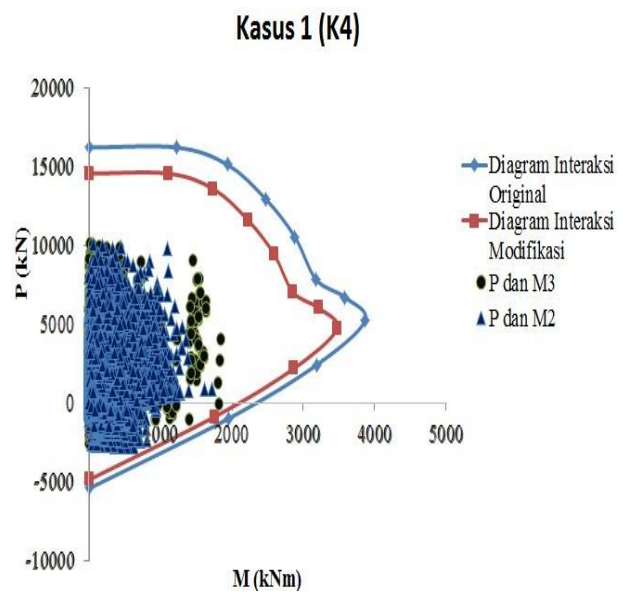
Gambar 8 K2 kasus 1



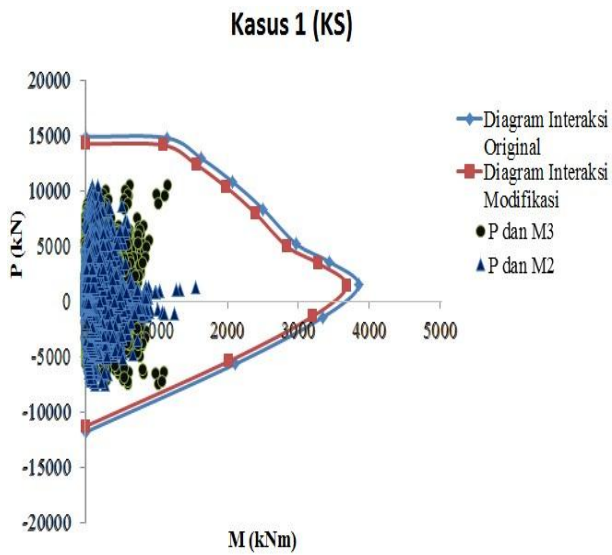
Gambar 9 K3 kasus 1



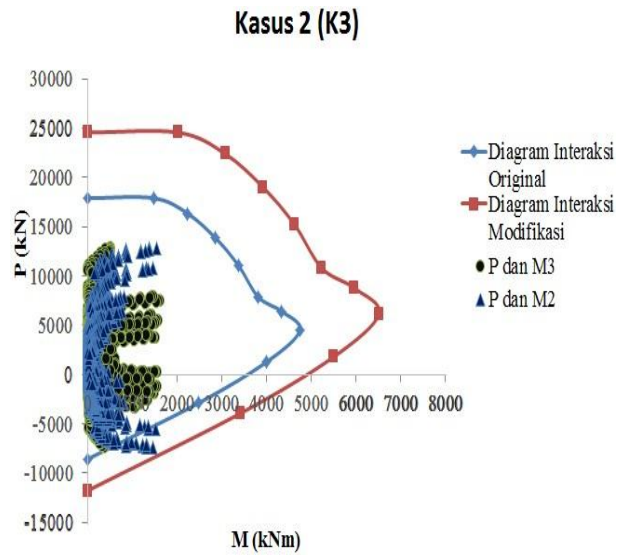
Gambar 7 K1 kasus 1



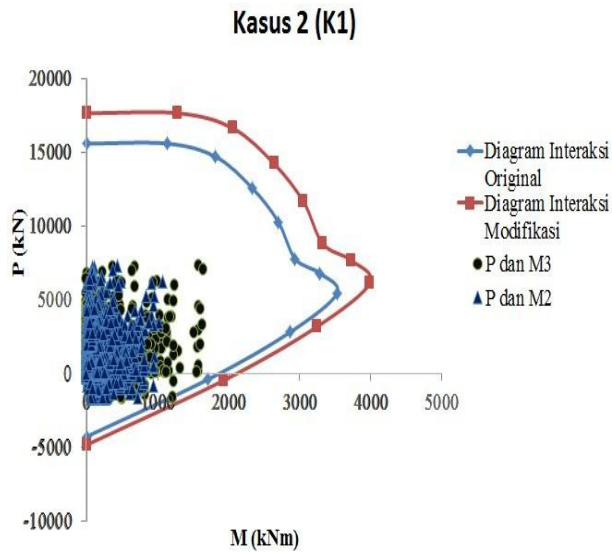
Gambar 10 K4 kasus 1



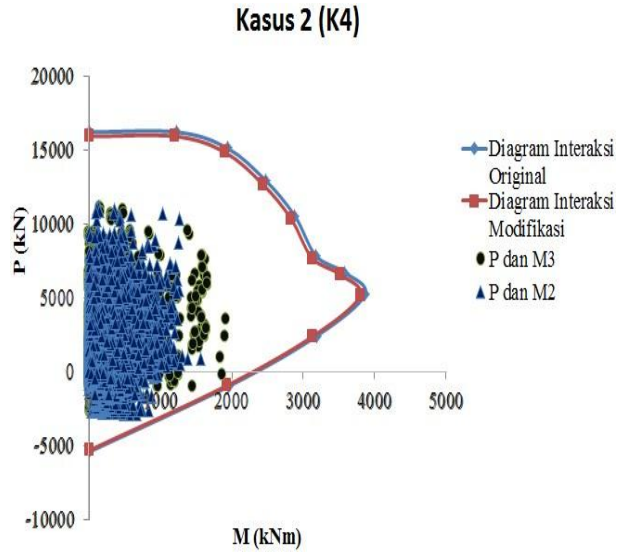
Gambar 11 KS kasus 1



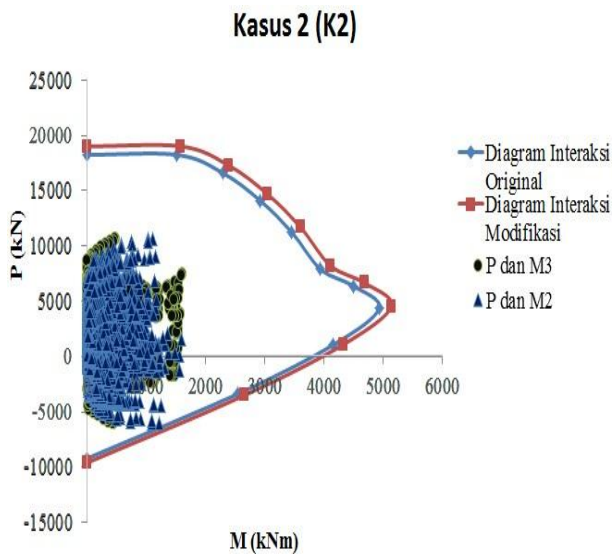
Gambar 14 K3 kasus 2



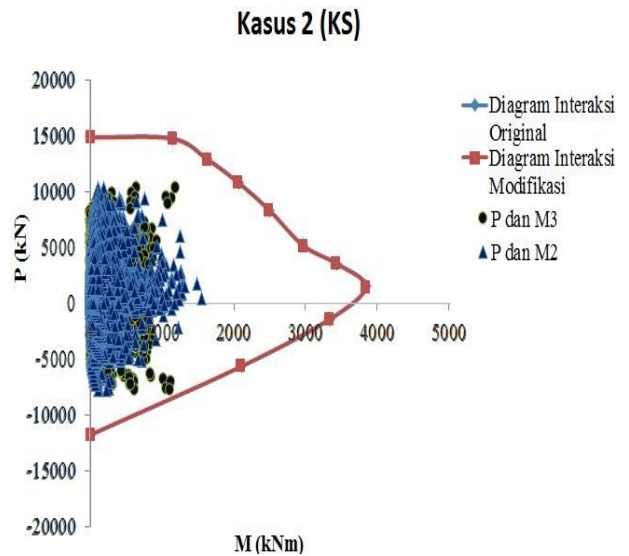
Gambar 12 K1 kasus 2



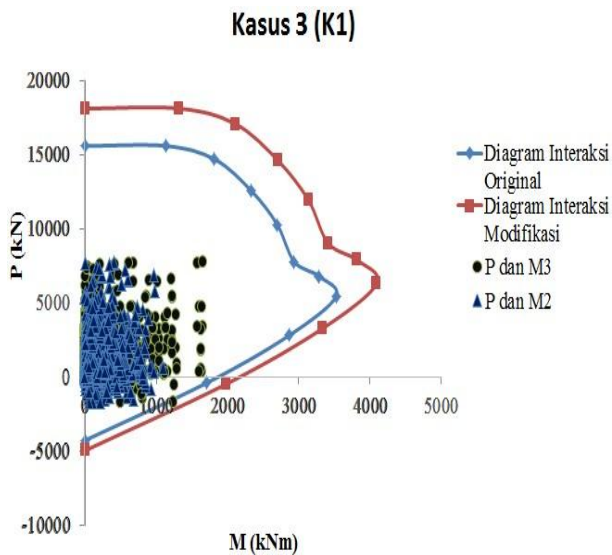
Gambar 15 K4 kasus 2



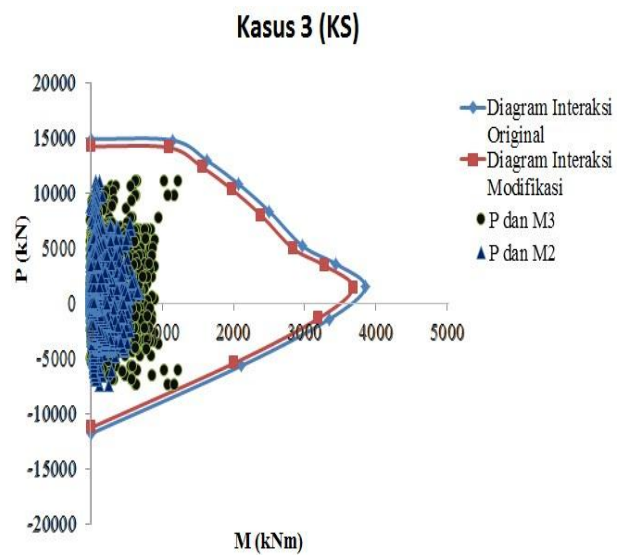
Gambar 13 K2 kasus 2



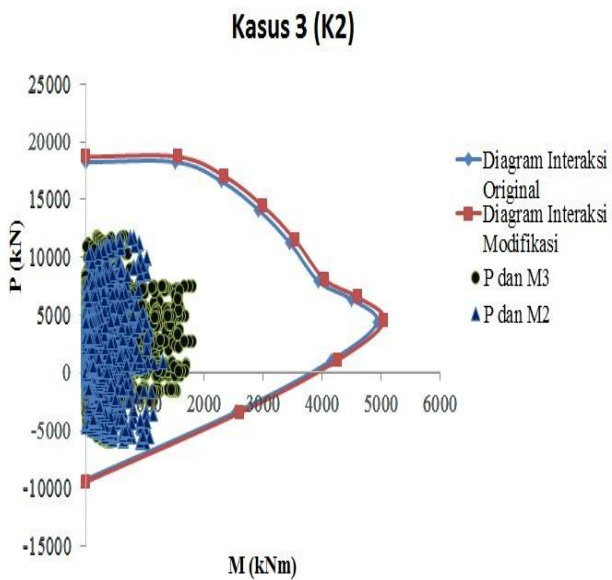
Gambar 16 KS kasus 2



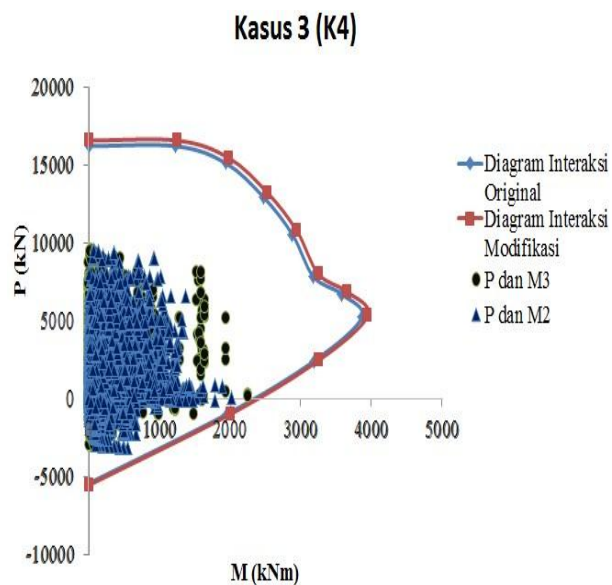
Gambar 17 K1 kasus 3



Gambar 20 KS kasus 3



Gambar 18 K2 kasus 3



Gambar 19 K4 kasus 3

Dari diagram interaksi kolom di atas, untuk memudahkan dalam menganalisis nilai DCR pada kolom struktur bangunan maka dapat dilihat pada Tabel 10, Tabel 11, Tabel 12 dan pada Gambar 21 sampai dengan Gambar 29 sebagai berikut.

Tabel 10 DCR pada kolom bangunan A

Bangunan menggunakan dinding geser bagian samping			
Kolom	DCR (Kasus 1)	DCR (Kasus 2)	DCR (Kasus 3)
K1	1,045	1,132	1,225
K2	1,396	0,855	1,115
K3	1,495	1,475	1,124
K4	0,898	0,915	1,795
KS	0,695	0,765	0,575

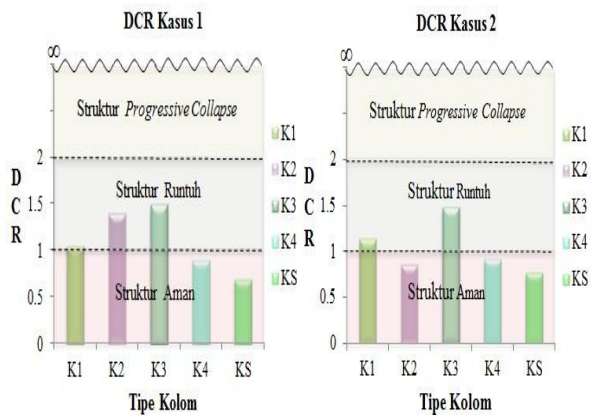
Tabel 11 DCR pada kolom bangunan B

Bangunan menggunakan dinding geser bagian tengah			
Kolom	DCR (Kasus 1)	DCR (Kasus 2)	DCR (Kasus 3)
K1	1,142	1,156	1,162
K2	1,248	1,265	1,202
K3	0,475	0,768	0,482
K4	1,275	1,284	1,195
KS	0,875	0,896	0,836

Tabel 12 DCR pada kolom bangunan C

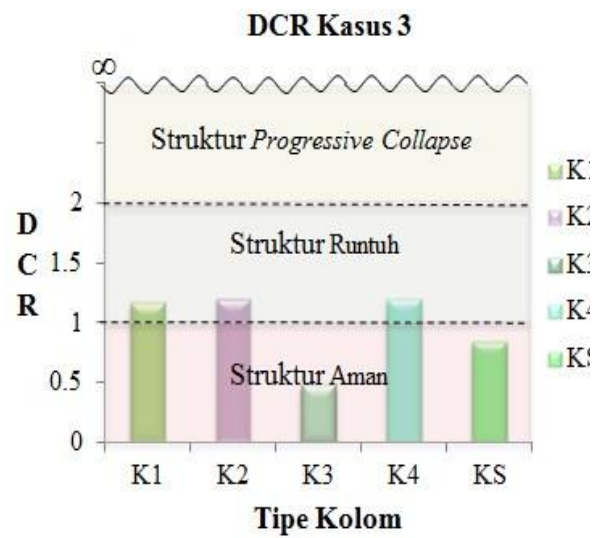
Bangunan menggunakan dinding geser bagian tengah dan samping			
Kolom	DCR (Kasus 1)	DCR (Kasus 2)	DCR (Kasus 3)
K1	1,081	1,132	1,162
K2	1,248	1,042	1,025
K3	1,367	1,372	1,015
K4	0,898	0,982	1,022
KS	0,956	0,996	0,955

1). Struktur bangunan hanya menggunakan dinding geser bagian samping



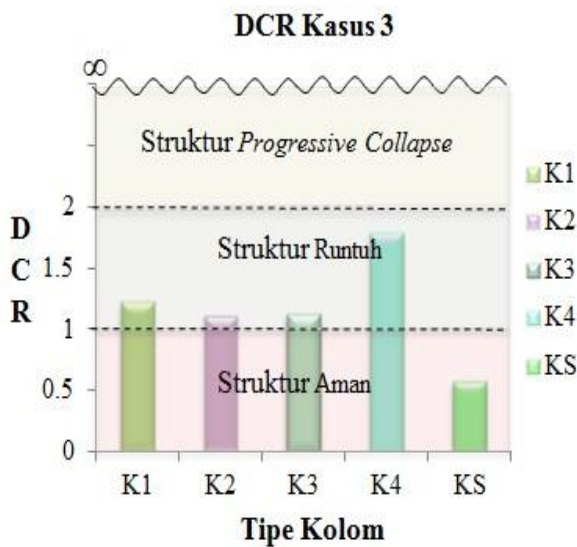
Gambar 21 DCR kolom kasus 1

Gambar 22 DCR kolom kasus 2

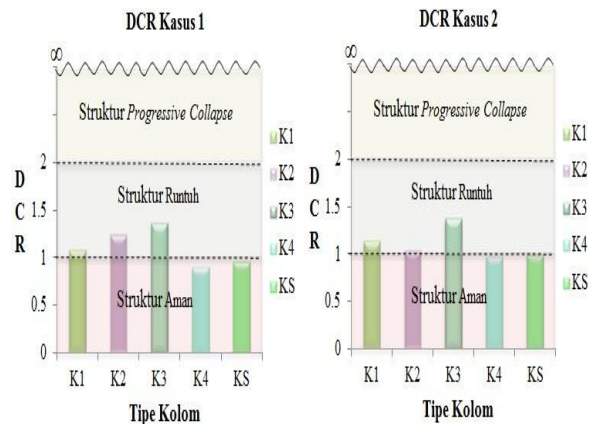


Gambar 26 DCR kolom kasus 3

3). Struktur bangunan menggunakan dinding geser bagian samping dan tengah



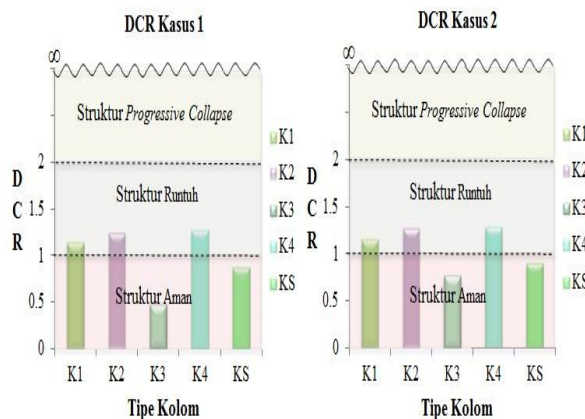
Gambar 23 DCR kolom kasus 3



Gambar 27 DCR kolom kasus 1

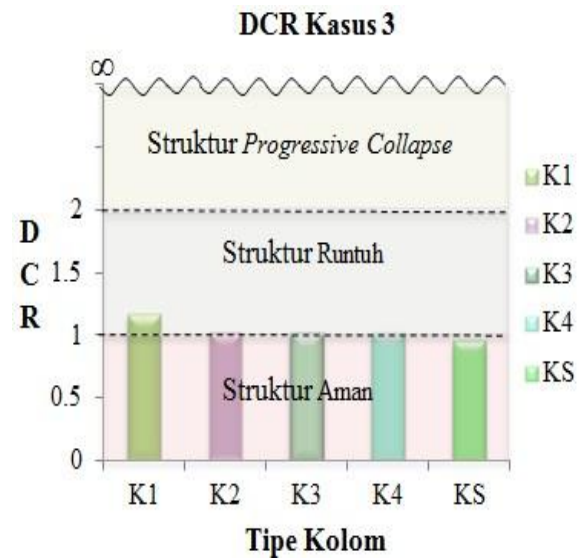
Gambar 28 DCR kolom kasus 2

2). Struktur bangunan hanya menggunakan dinding geser bagian tengah



Gambar 24 DCR kolom kasus 1

Gambar 25 DCR kolom kasus 2

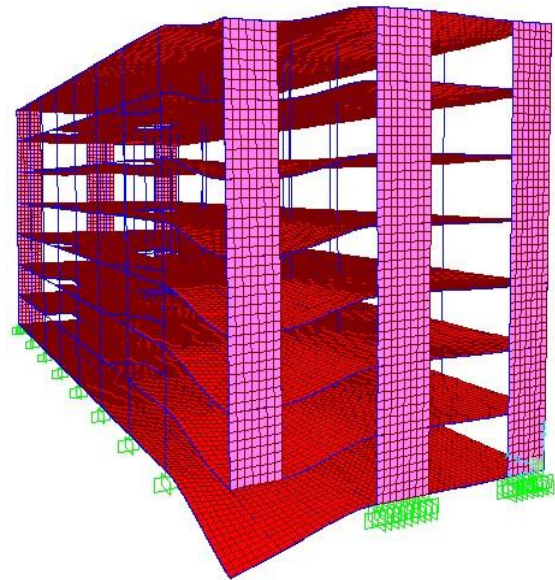


Gambar 29 DCR kolom kasus 3

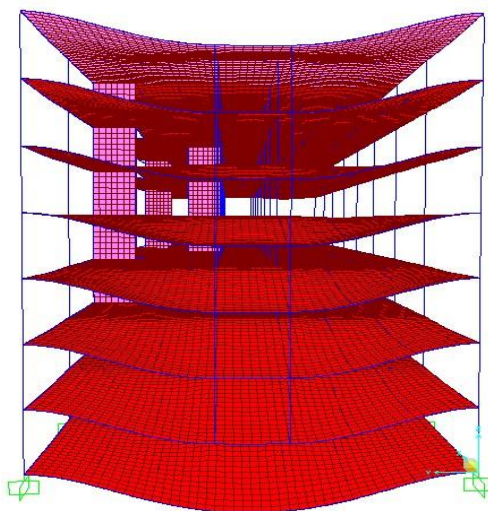
Berdasarkan Tabel dan Gambar diagram interaksi kolom di atas maka dapat disimpulkan bahwa pada struktur bangunan A (hanya dengan menggunakan dinding geser bagian samping) untuk kasus 1, kasus 2, dan kasus 3 pada kolom KS nilai $DCR < 1$ "Aman", kolom K4 pada kasus 1 dan kasus 2 nilai $DCR < 1$ "Aman", dan Kolom K2 pada kasus 2 nilai $DCR < 1$ "Aman", selain kolom tersebut untuk beberapa kolom lainnya mengalami keruntuhan. Struktur bangunan B (hanya dengan menggunakan dinding geser bagian tengah) untuk kasus 1, kasus 2, dan kasus 3 pada kolom KS dan kolom K3 nilai $DCR < 1$ "Aman", untuk kolom K1, kolom K2, dan kolom K4 nilai $DCR > 1$ "Collapse". Struktur bangunan C (dengan menggunakan dinding geser bagian tengah dan samping untuk kasus) 1, kasus 2, dan kasus 3 pada kolom KS $DCR < 1$ "Aman", untuk kolom K4 pada kasus 1 dan kasus 2 $DCR < 1$ "Aman". Kolom K1, kolom K2, dan kolom K3 nilai $DCR > 1$ "Collapse".

Tipe Keruntuhan Struktur Bangunan

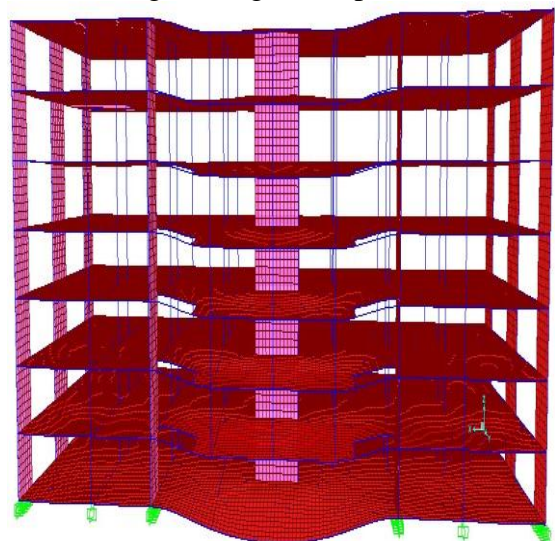
Setelah melakukan analisis *progressive collapse* dengan menggunakan program SAP2000 versi 21, didapatkan nilai *Demand Capacity Ratio* (DCR) dengan memanfaatkan fitur *concrete design* pada SAP2000 versi 21 yang mengacu *Concrete Frame Design Preferences for ACI 318-11*, kode ini berdasarkan pada SNI 03-2847-2013 "Tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung". Berdasarkan deformasi dan nilai DCR yang terjadi pada struktur bangunan yang ditunjukkan pada Gambar 30, Gambar 31, dan Gambar 32, Tabel 10, Tabel 11 dan Tabel 12 dapat disimpulkan bahwa semua struktur bangunan termasuk ke dalam tipe keruntuhan domino, tipe keruntuhan *zipper* dan tipe keruntuhan *instability* karena semua elemen struktur bangunan ini setelah dilakukan analisis keruntuhan progresif semua elemen akan mendistribusikan gaya ke elemen lain, pada struktur bangunan ini apabila salah satu penampang kolom dihapus maka penampang-penampang kolom yang berada di wilayahnya juga mengalami kegagalan struktur.



Gambar 30 Bangunan A penghapusan bagian kolom sudut



Gambar 31 Bangunan B penghapusan kolom bagian tengah sisi pendek



Gambar 32 Bangunan C penghapusan kolom bagian tengah sisi panjang

5. Kesimpulan

- a) Berdasarkan nilai *Demand Capacity Ratio* (DCR) yang terjadi pada balok dan kolom struktur bangunan merupakan *strong coloum weak beam*, dimana pada saat dilakukan analisis keruntuhan progresif dengan bantuan program *software* SAP2000 elemen atau *frame* balok lebih dahulu mengalami *collapse*.
- b) Setelah dilakukan analisis keruntuhan progresif Gedung Akademik 7 Lantai di Yogyakarta tergolong dalam tipe keruntuhan domino, tipe keruntuhan *zipper* dan tipe keruntuhan *instability*. karena pada struktur bangunan ini apabila salah satu *frame* kolom dihapus maka *frame-frame* kolom yang berada di wilayahnya juga mengalami kegagalan struktur.
- c) Dari ketiga variasi penempatan dinding geser, struktur bangunan dengan menggunakan dinding geser bagian tengah dan samping ini mampu menahan gaya gravitasi, gaya gempa lateral, dan mempunyai kemungkinan mengalami keruntuhan progresif yang jauh lebih kecil dibandingkan variasi penempatan dinding geser yang lainnya.

6. Daftar Pustaka

- ACI, 2011, 318-11: *Building Code Requirements for Stuctural Concrete*, ACI Internasional, United States of America.
- Amiri, S., Saffari, H. dan Mashhadi, J., 2018, *Assessment Of Dynamic Increase Factor For Progressive Collapse Analysis Of RC Structures*, *Engineering Failure Analysis*, 84, 300-310.
- Andalas, G., Suryadi. dan Husni, H.R., 2016, *Analisis Layout Shearwall Terhadap Perilaku Struktur Gedung*, *Jurnal Teknik Sipil*, 1, 491-502.
- Aribisma, F., Raka, I.G.P. dan Tavio, 2015, *Evaluasi Gedung MNC Tower Menggunakan SNI 03-1726-2012 dengan Metode Pushover Analysis*, *Jurnal Teknik Sipil*, 4(1), 2301-9271.
- Arshian, A.H. dan Morgenthal, G., 2017, *Three-Dimensional Progressive Collapse Analysis Of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected To Sequential Column Removal*, *Engineering Structures*, 132, 87-97.
- Astuti, P., 2016, *Pengaruh Penambahan Dinding Geser (Shear Wall) pada Waku Getar Alami Fundamental Struktur Gedung*, *Jurnal Semesta Teknika*, 18 (2), 140-146.
- Bao, Y. dan Kunnath, S.K., 2010, *Simplified progressive collapse simulation of RC frame-wall structures*, *Engineering Structures*, 32 (10), 3153-3162.
- BSN, 2012, SNI 1726:2012: *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2013, SNI 1727:2013: *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2013, SNI 2847:2013: *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Effendi, F., Wesli., Candra, Y. dan Akbar, S.J., 2017, *Studi Penempatan Dinding Geser Terhadap Waktu Getar Alami Fundamental Struktur Gedung*, *Jurnal Teknik Sipil*, 7 (2), 274-283.
- Fazrian, D., Djauhari, Z. dan Ridwan., 2017, *Keruntuhan Progresif Gedung Beraturan Sistem Ganda*, *Jurnal Teknik Sipil*, 4 (2), 1-11.
- General Services Administration (GSA), 2013, *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*.
- Nugroho, F. 2015, *Evaluasi Kinerja Bangunan Rencana Gedung A.N.S dengan Dilatasi (Model B2) di Daerah Rawan Gempa*, *Jurnal Momentum*, 17(2), 89-98.
- Nurchahyo, H., Suryanita, R. dan Kurniawandy, A., 2016, *Kajian Posisi Shear wall pada Gedung Tidak Beraturan dengan Analisis Riwayat Waktu Beban Gempa*, *Jurnal Teknik Sipil*, 3 (1), 1-13.
- Ren, P., Li, Y., Guan, H. dan Lu, X., 2014, *Progressive Collapse Resistance Of*

- Two Typical High-Rise RC Frame Shear Wall Structures, Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1, 1-20.
- Riantoby, I.K., Budi, A.S. dan Purwanto, E., 2014, Evaluasi Kinerja Struktur pada Gedung Bertingkat dengan Analisis *Pushover* Menggunakan Software ETABS (Studi Kasus: Hotel Di Wilayah Karanganyar), *Matriks Teknik Sipil*, 2(1), 116.
- Starossek, U., 2009. *Progressive Collapse Of Structure*, Thomas Telford Publishing.
- Weng, J., Tan, K.H. dan Lee, C.K., 2017, *Modeling Progressive Collapse Of 2D Reinforced Concrete Frames Subject To Column Removal Scenario*, *Engineering Structures*, 141, 126-143.
- Yolanda, A., Djauhari, Z. dan Ridwan., 2017, Keruntuhan Progresif Gedung Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan, *Jurnal Teknik Sipil*, 4 (2), 1-13.