

Research Article

## ANALISIS KINERJA SEISMIK GEDUNG DENGAN *PUSHOVER ANALYSIS* (STUDI KASUS: GEDUNG PERKANTORAN TIGA TINGKAT YANG RUNTUH AKIBAT GEMPA PALU 2018)

Syafri Wardi<sup>1\*)</sup> dan Utari Ramadhani<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institut Teknologi Padang, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

Received: 5 March 2023, Accepted: 22 May 2023, Published: 22 August 2023

### Abstract

Indonesia is an earthquake-prone country. The 2018 earthquake in Palu, Sulawesi, caused significant damage or collapse of the buildings. This research is aimed to evaluate the seismic performance of a three-story office building at Tadulako University and to evaluate what caused the collapse of the building. Evaluation of seismic performance was conducted using the default plastic hinge in SAP2000. The analysis results showed that the plastic hinge occurred first at the end of the beam, followed by the plastic hinge at the end of the column. The performance point from the intersection of the capacity curve and capacity spectrum based on ATC-40 indicated that the performance level of the building was damage control, which means that the building can resist seismic force and has a low risk of human death. These results did not represent the post-earthquake condition in which the building collapsed due to failure of the beam-column joint because the shear reinforcement was not installed in the beam-column joints. Further studies are necessary in order to develop an analysis model, including the failure model of the beam-column joint.

**Key Words:** earthquake damage, plastic hinge, seismic performance.

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang memiliki resiko yang tinggi terhadap bencana gempa bumi karena berada di antara empat lempeng, yaitu lempeng Indo-Australia, Pasifik, Eurasia, dan Filipina. Beberapa peristiwa gempa bumi besar telah terjadi di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir, salah satunya pada Jumat, 28 September 2018 di Kabupaten Donggala, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Gempa tersebut telah menyebabkan kerusakan atau keruntuhan pada banyak gedung dan juga menyebabkan banyak korban jiwa.

Salah satu bangunan yang runtuh akibat gempa yaitu bangunan perkantoran tiga tingkat di Universitas Tadulako yang merupakan bangunan tiga lantai, dimana terjadi keruntuhan pada lantai dasar seperti terlihat pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan bahwa terjadi kegagalan pada hubungan balok-kolom karena tidak adanya tulangan sengkang pada hubungan balok-kolom. Kegagalan hubungan balok-kolom seperti ini sering ditemukan pada kerusakan bangunan pasca gempa di Indonesia (Li dkk., 2017; Wardi dkk., 2020). Detailing tulangan hubungan balok-kolom yang tidak memenuhi standar ketahanan gempa ini juga

masih ditemukan pada bangunan yang baru dibangun (Wardi dkk., 2018a; Wardi dkk., 2018b.).



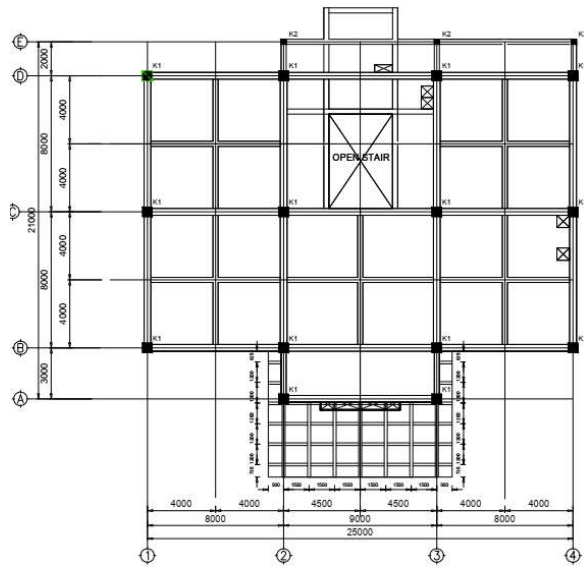
Gambar 1. Keruntuhan gedung perkantoran tiga tingkat di Universitas Tadulako (sumber: foto oleh Syafri Wardi)

Gedung tersebut telah dianalisis kapasitas seismiknya pada studi sebelumnya oleh Nugroho (2019). Namun, penelitian tersebut menggunakan metode indeks kapasitas seismik berdasarkan

standar Jepang (JBDPA, 2005). Pada penelitian ini, dilakukan analisis kapasitas seismik dengan analisis pushover menggunakan software SAP2000. Dari hasil analisis pushover akan diperoleh tingkat kinerja suatu bangunan terhadap beban gempa dan pola keruntuhan bangunan, sehingga diharapkan dapat mengkonfirmasi penyebab terjadinya keruntuhan pada gedung yang ditinjau. Metoda analisis pushover sudah banyak digunakan oleh peneliti terdahulu (Afandi, 2010; Dewobroto, 2006; Pranata, 2006; Seputro, 2009) untuk analisis kapasitas seismik gedung eksisting, namun masih sangat jarang digunakan untuk menganalisis penyebab keruntuhan gedung eksisting akibat gempa.

## 2. METODOLOGI

Obyek penelitian ini adalah gedung perkantoran tiga tingkat di Universitas Tadulako yang berlokasi di Jalan Soekarno Hatta No.KM. 9, Tondo, Kec.Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Denah kolom, detail kolom, denah balok, dan detail balok disajikan pada Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

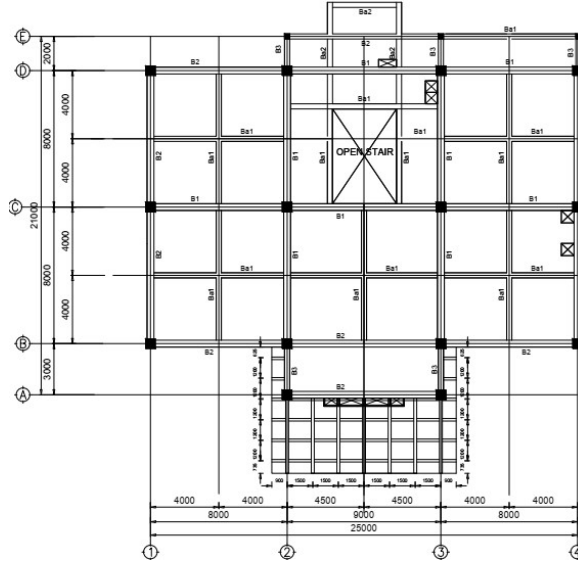


Gambar 2. Denah kolom tipikal (sumber: gambar struktur gedung)

UKURAN KOLOM	DESKRIPSI		
	BAWAH	TENGAH	ATAS
TYPE KOLOM K1 500 X 500			
Tulangan	12 D 22	12 D 22	12 D 22
Sengkang	d10 - 100	d10 - 150	d10 - 100

UKURAN KOLOM	DESKRIPSI		
	BAWAH	TENGAH	ATAS
TYPE KOLOM K2 300 X 300			
Tulangan	8 D 19	8 D 19	8 D 19
Sengkang	d10 - 100	d10 - 150	d10 - 100

Gambar 3. Detail penampang kolom (sumber: gambar struktur gedung)



Gambar 4. Denah balok tipikal (sumber: gambar struktur gedung)

UKURAN BALOK	DESKRIPSI		
	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
400 X 700			
Type Balok B 1			
Tulangan Utama Atas	6 D 22	3 D 22	6 D 22
Tulangan Utama Bawah	3 D 22	4 D 22	3 D 22
Sengkang	d10 - 100	d10 - 150	d10 - 100
Tulangan Pinggang	2 D13	2 D13	2 D13
UKURAN BALOK	DESKRIPSI		
	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
300 X 600			
Type Balok B 2			
Tulangan Utama Atas	4 D 19	2 D 19	4 D 19
Tulangan Utama Bawah	2 D 19	3 D 13	2 D 19
Sengkang	d10 - 100	d10 - 150	d10 - 100
Tulangan Pinggang	2 D13	2 D13	2 D13

Gambar 5. Detail penampang kolom (sumber: gambar struktur gedung)

Dalam penelitian ini, digunakan data sekunder berupa gambar rencana. Data gedung yang ditinjau yaitu sebagai berikut.

- Struktur bangunan : beton bertulang
- Fungsi bangunan : perkantoran
- Tinggi bangunan : 12,45 m
- Jumlah lantai : 3 lantai
- Tinggi lantai 1 : 4,50 m

- Tinggi lantai 2 : 4,00 m
- Tinggi lantai 3 : 3,95 m

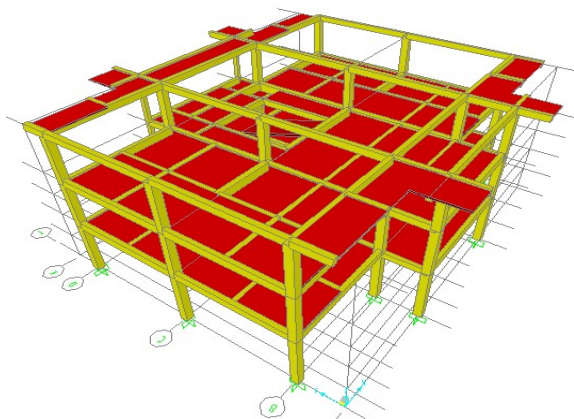
Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 1. Pengumpulan data

Pada penelitian ini data digunakan data sekunder berupa gambar struktur gedung yang ditinjau. Data tersebut digunakan untuk pemodelan struktur.

#### 2. Pemodelan struktur

Pemodelan struktur dibuat dengan *software* SAP2000. Pemodelan bangunan berupa portal 3D *frame* dengan plat lantai, seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan 3D struktur gedung

#### 3. Pembebanan

Beban-beban yang bekerja pada struktur berupa beban mati dan beban hidup yang di-input sebagai beban statis dan beban gempa di-input sebagai beban dorong *pushover* pada kedua arah sumbu utama bangunan (arah x dan arah y). Beban mati dan beban hidup dihitung berdasarkan SNI 1727-2020.

#### 4. Pemodelan sendi plastis

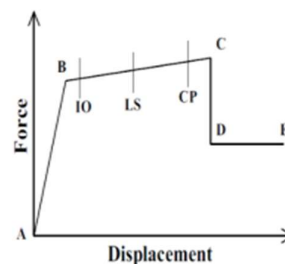
Pemodelan sendi plastis digunakan untuk mendefinisikan perilaku *non-linear* berupa hubungan momen-rotasi pada ujung elemen struktur balok dan kolom. Dalam analisis elemen balok menggunakan tipe sendi default-M3, elemen kolom menggunakan tipe sendi default-PMM berdasarkan FEMA 356 Hubungan balok-kolom diasumsikan secara *default* pada SAP 2000 sebagai *rigid zone*.

Karakteristik sendi plastis berupa hubungan antara gaya dan perpindahan pada elemen struktur seperti pada Gambar 7. Pada grafik tersebut, titik A menunjukkan kondisi awal, titik B menunjukkan kondisi leleh pertama, titik C menunjukkan kondisi Ketika tercapai kekuatan batas (*ultimate strength*), titik D menunjukkan kekuatan sisa (*residual strength*), dan titik E menunjukkan telah terjadi keruntuhan (*failure*). Level kinerja elemen struktur dalam kondisi *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP) terletak

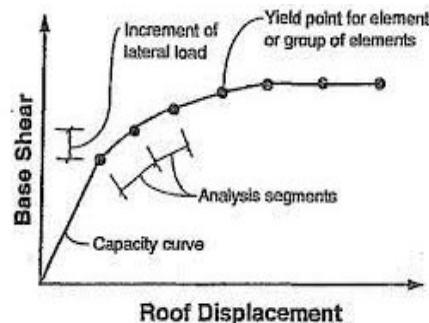
di antara titik saat terjadi leleh pertama (titik B) dan titik saat terjadi kondisi *ultimate* (titik C). Dalam SAP 2000, kondisi sendi plastis tersebut ditunjukkan dengan kode warna, seperti ditunjukkan pada bagian bawah Gambar 7.

#### 5. Analisis statik *pushover*

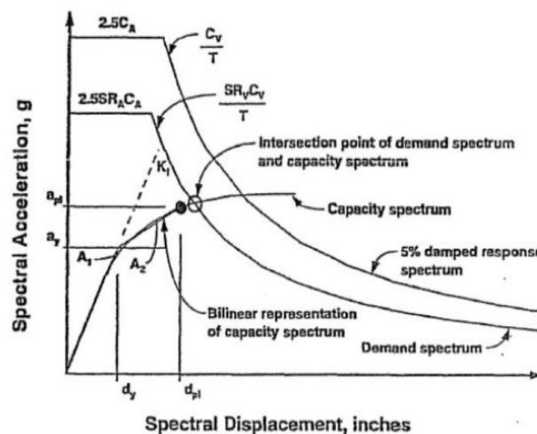
Analisis statik *pushover* dilakukan dengan langkah-langkah yang berpedoman pada ATC-40 *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Hasil dari analisis statik ekuivalen adalah kurva kapasitas, yaitu kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan simpangan atap (*roof displacement*) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Kurva hubungan gaya dan perpindahan serta level kinerja sendi plastis (Sumber: CSI, 2016)



Gambar 8. Kurva kapasitas (Sumber: ATC-40)



Gambar 9. Penentuan *performance point* (Sumber: ATC-40)

Kurva kapasitas ini kemudian digabungkan dengan *capacity spectrum*. *Capacity spectrum* yang digunakan pada penelitian ini adalah respon spektrum berdasarkan SNI 1726-2019 yang dikonversi menjadi kurva format ADRS menurut ATC-40. Perpotongan antara kurva kapasitas dengan *capacity spectrum* ini disebut *performance point*, seperti diilustrasikan pada Gambar 9. *Performance point* ini digunakan untuk menentukan level kinerja dari struktur gedung yang dianalisis.

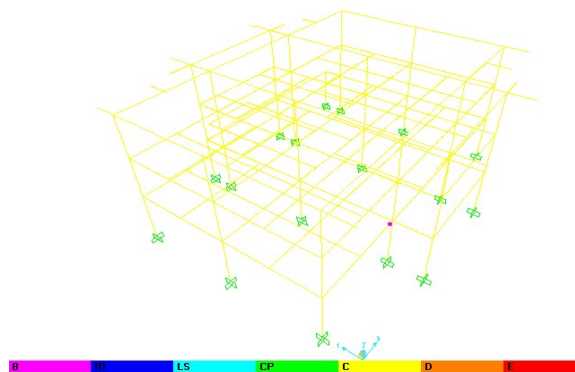
6. Membuat kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan.

Membuat kesimpulan terkait pola keruntuhan berdasarkan pembentukan sendi plastis dan level kinerja stuktur gedung.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

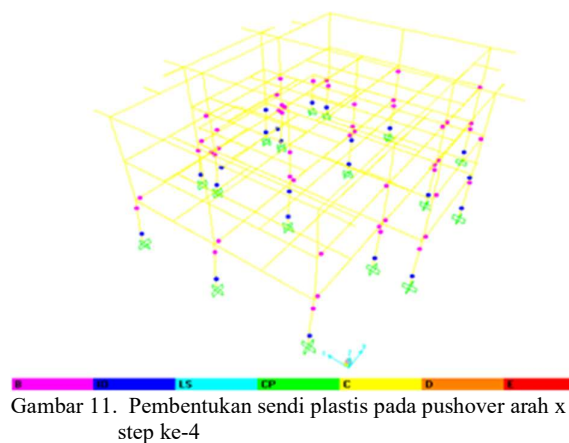
#### Mekanisme Keruntuhan Struktur

Dari hasil analisis pushover pada arah x step ke-1 nilai gaya geser ( $V$ ) = 187904,68 N *displacement* pada lantai atap ( $\delta$ ) = 19,454203 mm terjadi pelelehan sendi plastis pertama pada balok pada lantai 1 ditandai dengan munculnya satu titik berwarna ungu yang menunjukkan level kerusakan B (batas linear), seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pembentukan sendi plastis pada pushover arah x step ke-1

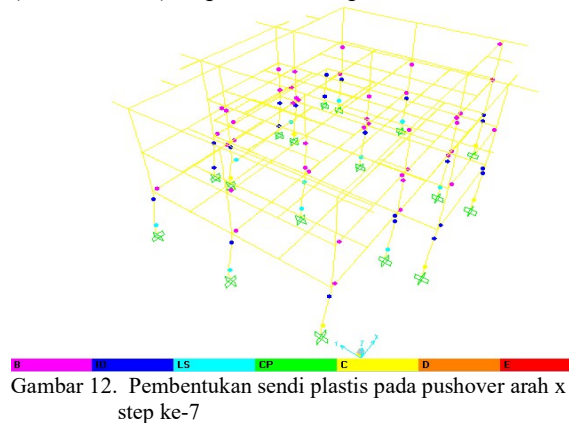
Berikutnya pada arah x step ke-4 (nilai  $V$  = 4505600,02 N,  $\delta$  = 95,641979 mm) beberapa titik pada struktur balok-kolom yang bagian lantai 1 sudah muncul sendi plasti bewarna biru tua yang menunjukkan level kerusakan IO (*Immediate Occupancy*), seperti terlihat pada Gambar 11.



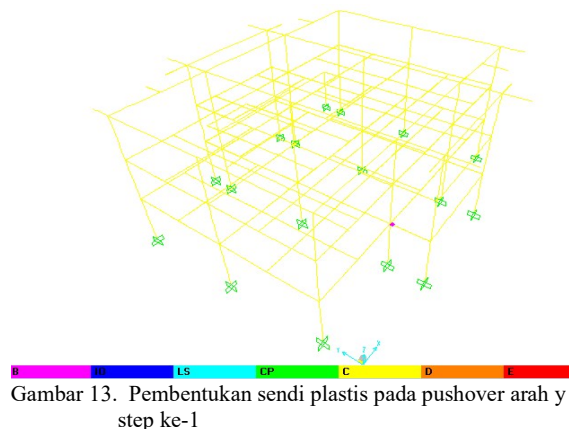
Gambar 11. Pembentukan sendi plastis pada pushover arah x step ke-4

Kemudian pada arah x step ke-7 (step terakhir) dengan nilai  $V$  = 5142131,86 N dan  $\delta$  = 155,748968 mm, pada bagian atas kolom lantai 1 berada pada level kerusakan pada level LS (*Life Safety*), seperti terlihat pada Gambar 12.

Dari hasil analisis pushover pada arah y step ke-1 (nilai  $V$  = 1476884,40 N,  $\delta$  = 13,833444 mm) terjadi pelelehan sendi plastis pertama pada balok yg bagian lantai 1 ditandai dengan munculnya satu titik berwarna ungu yang menunjukkan level kerusakan B (Batas Linear), seperti terlihat pada Gambar 13.

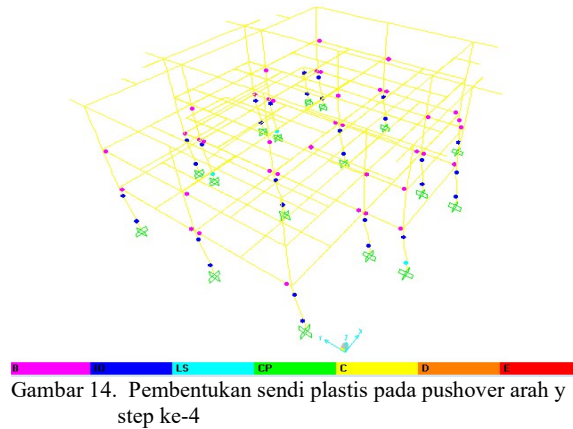


Gambar 12. Pembentukan sendi plastis pada pushover arah x step ke-7

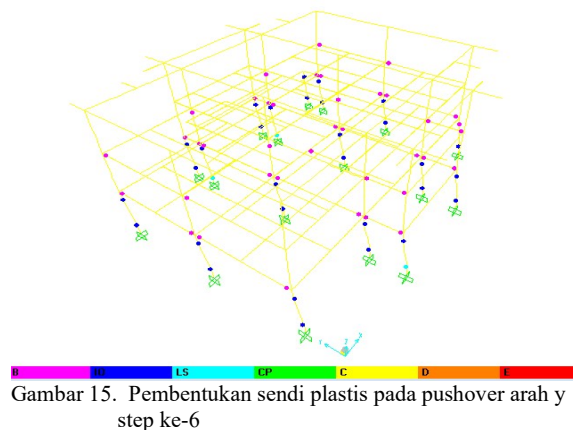


Gambar 13. Pembentukan sendi plastis pada pushover arah y step ke-1

Selanjutnya pada arah y step ke-4 nilai ( $V = 4732646,30 \text{ N}$ ,  $\delta = 91,883053 \text{ mm}$ ) beberapa titik pada struktur balok-kolom yang bagian lantai 1 sudah muncul ditandai dengan bewarna biru tua yang menunjukkan level kerusakan IO (*Immediate Occupancy*), seperti terlihat pada Gambar 14.

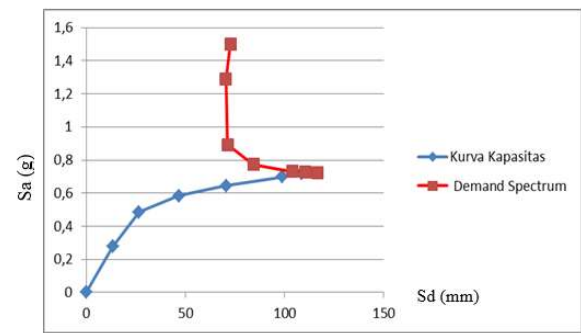


Kemudian pada step y ke-6 (step terakhir) dengan nilai  $V = 5273182,11 \text{ N}$  dan  $\delta = 127,218154 \text{ mm}$  pada bagian atas kolom lantai 1 berada pada level kerusakan maksimum pada level LS, seperti terlihat pada Gambar 15.

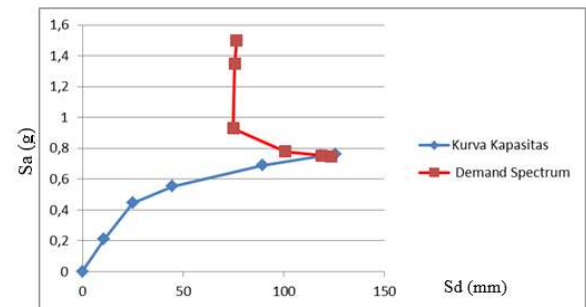


### Kurva Kapasitas dan Level Kinerja

Dari hasil analisis pushover pada arah x dan arah y, didapatkan kurva kapasitas dan *demand spectrum* berdasarkan ATC-40 seperti pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Kurva kapasitas dan demand spectrum hasil analisis pushover arah x



Gambar 17. Kurva kapasitas dan demand spectrum hasil analisis pushover arah y

Berdasarkan kurva diatas, didapatkan *performance point* yang merupakan perpotongan kurva kapasitas dan *demand spectrum*. Dari *performance point*, kemudian dihitung simpangan total maksimum dan simpangan inelastis maksimum untuk menentukan level kinerja gedung.

- Simpangan total maksimum

$$\text{Arah x-x} = Dt/H_{\text{total}} = (150,62/12450) \text{ mm} = 0.012$$

Berdasarkan ATC-40, nilai maximum total drift ratio  $> 0,01-0,02$  masuk kedalam kategori tingkat kinerja struktur *Damage Control* (DC). *Damage Control* artinya bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, risiko korban jiwa manusia sangat kecil.

$$\text{Arah y-y} = Dt/H_{\text{total}} = (121,57/1250) \text{ mm} = 0.0098 \sim (0,01)$$

Berdasarkan ATC-40, nilai total *drift ratio* 0,01-0,02 termasuk kedalam kategori tingkat kinerja struktur *Damage Control* (DC).

- Simpangan inelastis maksimum

$$\text{Arah x-x} = (Dt-D1)/H_{\text{total}} = ((150,62-19,45)/12450) \text{ mm} = 0.0082$$

Berdasarkan ATC-40, nilai total *drift ratio* 0,005-0,015 termasuk dalam kategori tingkat kinerja struktur *Damage Control* (DC).

$$\text{Arah y-y} = (Dt-D1)/H_{\text{total}} = ((121,57-13,83)/12450) \text{ mm} = 0.0086 \text{ (damage control)}$$

Berdasarkan ATC-40, nilai maximum total drift ratio 0,005-0,015 y termasuk dalam kategori tingkat kinerja struktur *Damage Control* (DC).

Maka, dapat disimpulkan bahwa berdasarkan ATC-40, struktur tersebut memiliki level kinerja *Damage Control* (DC), artinya bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, risiko korban jiwa manusia sangat kecil.

### Pembahasan

Berdasarkan kerusakan gedung akibat gempa Palu 2018 setelah terjadi gempa berarti gedung mengalami keruntuhan (*collapse*) karena pada struktur tersebut terjadi kegagalan pada hubungan balok kolom disebabkan oleh tidak adanya sengkang di hubungan balok-kolom seperti terlihat pada Gambar 1. Dalam SAP 2000, elemen kolom dan balok diasumsikan sebagai elemen-elemen linier dengan sendi plastis nonlinier pada ujung elemen, sedangkan hubungan balok kolom diasumsikan kaku (*rigid*). Pola keruntuhan gedung dengan asumsi pemodelan seperti ini hanya bisa memprediksi kerusakan pada sendi plastis di ujung elemen balok dan kolom seperti terlihat pada Gambar 10-15. Model ini tidak bisa memprediksi kegagalan pada hubungan balok-kolom.

### 4. KESIMPULAN

Hasil analisis pushover pada gedung yang ditinjau pada penelitian ini menunjukkan sendi plastis menunjukkan bahwa sendi plastis pertama terjadi pada ujung elemen balok, kemudian diikuti oleh sendi plastis pada ujung kolom. Berdasarkan nilai *performance point* dari perpotongan kurva kapasitas dan *demand spectrum* berdasarkan ATC-40, gedung tersebut memiliki kinerja *damage control*. Namun, hasil analisis ini tidak sesuai dengan kondisi struktur tersebut pasca gempa dimana gedung tersebut runtuh (*collapse*). Keruntuhan tersebut terjadi karena kegagalan pada hubungan balok-kolom akibat tidak adanya sengkang pada hubungan balok-kolom. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan dengan mengaplikasikan model keruntuhan geser pada hubungan balok-kolom.

### REFERENSI

Afandi, N. (2010). Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP 2000. *Skripsi*. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

ASCE. (2000). *FEMA 356 - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.

ATC. (1996). *ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: ATC.

BSN. (2019). *SNI 1726:2019 - Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

BSN. (2020). *SNI 1727-2020 - Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

CSI. (2016). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE*. California: CSI.

Dewobroto, W. (2006). Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000, *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1), 7-24.

JBDPA. (2005). *Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001: Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001; Technical Manual for Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, 2001: English Version*. Japan: JBDPA.

Li, Y., & Sanada, Y. (2017). Seismic Strengthening of Existing RC Beam-Column Joints by Wing Walls, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46, 1987-2008. <https://doi.org/10.1002/eqe.2890>

Nugroho, F. (2019). Seismic capacity evaluation of the damaged reinforced concrete building during Palu earthquake 2018. *The 4th International Conference on Earthquake Engineering & Disaster Mitigation (ICEEDM) 2019*, Padang, 26-27 September 2019.

Pranata, Y. A. (2006). Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000, *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1). 41-52.

Septuro, D. (2009). Analisa Struktur Beton Gedung Bertingkat dengan metode Statik Beban Dorong (*Pushover Analysis*). *Skripsi*. Universitas Mataram, Mataram.

Wardi, S., Sanada, Y., Kita, M., Tanjung, J., & Maidiawati. (2018a). Seismic Strengthening of Existing RC Beam-Column Joints by Wing Walls, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(2), 418-425. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.2.4207>

Wardi, S., Sanada, Y., Kita, M., Tanjung, J., & Maidiawati. (2018b). Investigation on Implementation of Seismic Detailing of Reinforced Concrete Buildings in West Sumatra Indonesia. *The 7th Asia Conference on Earthquake Engineering (7ACEE)*, Bangkok, 22-25 November 2018.

Wardi, S., Sanada, Y., Saha, N., & Takahashi, S.. (2020). Improving Integrity of RC Beam-column Joints with Deficient Beam Rebar Anchorage, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(3), 234-260. <https://doi.org/10.1002/eqe.3229>