

EVALUASI SEISMİK GEDUNG PERKULIAHAN 3 DAN 6 LANTAI EKSISTING DI KOTA YOGYAKARTA

Isnaini Heriawati¹, Inggar Septia Irawati^{1,*}, Angga Fajar Setiawan¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No.2 Yogyakarta

*Corresponding authors: inggar_septhia@ugm.ac.id

Abstract: The three-story reinforced concrete building as a college building was built in the city of Yogyakarta in 2011. The building was originally designed to have 6 floors using SNI 1726-2002 and SNI 2847-2002. With the development of construction standards in Indonesia, both regulations have been updated to SNI 1726-2019 and SNI 2847-2019. As a consequence of the updated regulations, re-evaluation of building structures against earthquake loads is important to do. This study aims to evaluate the performance of the existing building structure. The buildings are analyzed under two scenarios: the existing three-story condition and the planned six-story construction according to the Detailed Engineering Design (DED). The analysis employs a nonlinear static procedure based on ASCE 41-17 standards, with seismic load distribution derived from the Indonesian Earthquake Hazard Deaggregation Map. The seismic loading considers two levels of seismic hazard: BSE-1E and BSE-2E. Results indicate that both the three-story and six-story buildings fail to meet the performance criteria stipulated in ASCE 41-17. The evaluation results show that neither the three-story nor the six-story building achieves the Immediate Occupancy (IO) performance level under design earthquake BSE-1E, nor do they meet the Life Safety (LS) performance level under earthquake BSE-2E. Additionally, neither structure meets the maximum allowable horizontal displacement requirements.

Keywords: Nonlinear static procedur, seismic evaluation, educational building

Abstrak: Suatu bangunan gedung beton bertulang 3 lantai yang berfungsi sebagai ruang kuliah didirikan di kota Yogyakarta pada tahun 2011. Gedung tersebut pada awalnya dirancang memiliki 6 lantai menggunakan SNI 1726-2002 dan SNI 2847-2002. Seiring dengan perkembangan standar konstruksi di Indonesia, kedua peraturan tersebut telah diperbarui menjadi SNI 1726-2019 dan SNI 2847-2019. Sebagai konsekuensi dari perbaruan peraturan, evaluasi ulang struktur bangunan terhadap beban gempa penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung eksisting. Gedung dianalisis dalam dua skenario, yaitu kondisi eksisting tiga lantai dan rencana pembangunan enam lantai sesuai Detailed Engineering Design (DED). Analisis dilakukan dengan metode *nonlinear static procedure* berdasarkan standar ASCE 41-17, dengan distribusi beban gempa diambil dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia. Pembebanan gempa yang dilakukan mencakup dua tingkat bahaya seismik, yaitu BSE-1E dan BSE-2E. Hasil menunjukkan bahwa struktur Gedung 3 lantai dan 6 lantai tidak mampu memenuhi kriteria kinerja yang disyaratkan dalam standar ASCE 41-17. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa baik gedung tiga lantai maupun enam lantai tidak memenuhi tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO) pada gempa desain BSE-1E dan tidak memenuhi kriteria tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada gempa BSE-2E. Selain itu, struktur gedung tiga lantai dan enam lantai juga tidak memenuhi persyaratan simpangan horizontal maksimum yang diizinkan.

Kata kunci: : *Nonlinear static procedur*, evaluasi seismik, gedung pendidikan

1. LATAR BELAKANG

Suatu bangunan gedung beton bertulang yang berfungsi sebagai ruang kuliah didirikan di kota Yogyakarta pada tahun 2011. Gedung tersebut semula didesain 6 lantai. Namun, karena keterbatasan anggaran, maka pembangunan

gedung hanya sampai pada lantai 3. Akibat semakin bertambahnya jumlah mahasiswa, maka pengelola gedung berencana menaikkan jumlah lantai sesuai dengan rencana, yaitu 6 lantai. Berdasarkan hasil observasi dokumen perencanaan, gedung tersebut didesain dengan

menggunakan standar pembebanan gempa SNI 1726-2002 dan standar perencanaan beton struktural SNI 2847-2002. Saat ini, kedua standar tersebut telah diperbarui. SNI 1726-2002 diperbarui menjadi SNI 1726-2019 dan SNI 2847-2002 telah diperbaharui menjadi SNI 2847-2019.

Perubahan revisi SNI 1726-2002 ke SNI 1726-2019 menuntut perlunya evaluasi struktural bangunan karena adanya perubahan peta bahaya seismik yang menyebabkan sebagian besar wilayah di Indonesia perlu didesain untuk beban gempa yang jauh lebih tinggi (Nugroho et al., 2022). Evaluasi struktur terhadap beban gempa sangat penting dilakukan pada bangunan di Indonesia. Hal ini disebabkan karena Indonesia terletak pada zona tektonik teraktif yang rawan terhadap aktivitas seismik (Masum dan Ali Akbar, 2019).

Gempa yang terjadi di Indonesia menyebabkan banyak bangunan mengalami kerusakan. Gempa Yogyakarta, yang terjadi pada tahun 2006 dengan besar magnitude 6,3, menyebabkan sekitar 240.396 bangunan perumahan roboh (Saputra et al., 2017). Gempa di Kabupaten Pidie Jaya, Aceh, tahun 2016 dengan besar magnitudo 6,5, menyebabkan kerusakan pada 3000 bangunan (Idris et al. 2022). Gempa Lombok, yang terjadi tahun 2018 dengan besar magnitude 7 memicu longsor dan kerusakan bangunan (Zhao et al., 2021). Pada tahun 2018 terjadi juga gempa di Palu, dengan magnitudo 7,5 yang menyebabkan tsunami serta likuifaksi tanah, menghancurkan sekitar 70.000 rumah dan hampir 3000 sekolah (Maidiawati et al., 2020).

Analisis nonlinier dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung terhadap beban gempa. Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan beton bertulang menggunakan metode *nonlinear static procedure (pushover)* (Prince et al., 2023; Erdem dan Karal, 2022; Çavdar, 2022; Allahvirdizadeh dan Gholipour, 2017; Halder dan Paul, 2016). El-Betar (2016) mengevaluasi kerentanan seismik gedung sekolah di Egipt menggunakan *nonlinear static procedure* sesuai dengan standar ASCE 41-13. (Aguayo et al., 2024) melakukan evaluasi pada struktur yang dibangun menggunakan beton bertulang dan dirancang sebagai residensial menggunakan analisis pushover sesuai ASCE 41-17. Evaluasi seismik pada gedung rumah sakit Vaszary Kolos menggunakan analisis

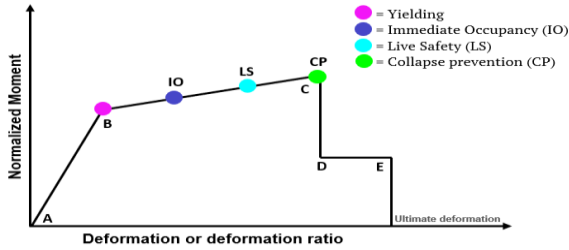
pushover sesuai ATC-40 dan FEMA-356 (Kuria dan Kegyes-Brassai, 2023). Evaluasi pushover berdasarkan FEMA-356 dilakukan pada struktur bangunan residensial yang terletak di Turki (Inel et al., 2018). Erdem dan Karal (2022) melakukan evaluasi pada gedung beton bertulang eksisting dan dengan perkuatan menggunakan standar TBEC-2018 dan ASCE 41-17.

Berdasarkan latar belakang tersebut dan dengan mempertimbangkan bahwa gedung perkuliahan akan dilanjutkan kembali pembangunannya menjadi 6 lantai maka evaluasi seismik terhadap dokumen perencanaan gedung perkuliahan 6 lantai yang didesain menggunakan peraturan lama sangat penting dilakukan. Walaupun demikian, evaluasi terhadap kondisi gedung eksisting 3 lantai tetap dilakukan. Tujuan evaluasi ini adalah untuk mengetahui kinerja struktur Gedung Perkuliahan pada kondisi eksisting 3 lantai dan kondisi sesuai DED 6 Lantai terhadap beban gempa. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan analisis *nonlinear static procedure (pushover)* berdasarkan ASCE 41-17. Beban gempa diambil mengacu pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia.

2. KINERJA DASAR BANGUNAN

Menurut ASCE 41-17, kinerja dasar bangunan ditentukan berdasarkan kategori risiko dan *seismic hazard level (Asce/SEI 41-17 2017)*. Kategori risiko struktur bangunan dikelompokkan berdasarkan fungsi bangunan. Berdasarkan fungsinya, gedung perkuliahan masuk pada kategori risiko bangunan IV (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Mempertimbangkan bangunan Gedung perkuliahan didesain dengan menggunakan SNI 1726-2002 dan dibangun pada tahun 2011 maka bangunan ini harus memenuhi persyaratan *Basic Performance Objective for Existing Buildings (BPOE)*.

Berdasarkan ASCE 41-17 Pasal 2.2.1, terdapat 2 *seismic hazard level* pada persyaratan kinerja dasar bangunan (BPOE), yaitu BSE-1E dan BSE-2E. Pada *seismic hazard level* BES-1E, elemen struktural Gedung tersebut harus memenuhi *building performance Immediate Occupancy (IO)*. Namun ketika dievaluasi terhadap *seismic hazard level* BSE-2E, elemen struktur gedung harus memenuhi *building performance Live safety (LS)*. Adapun pengertian *performance IO* yaitu struktur dapat



Gambar 1. Kurva gaya deformasi beton
Sumber: ASCE 41-17, 2017

mempertahankan kekuatan serta kekakuan dan tetap aman untuk ditempati langsung setelah gempa terjadi. Parameter *performance* LS yaitu komponen struktur mengalami kerusakan, tetapi keseluruhan struktur masih tetap memiliki batasan keamanan terhadap potensi keruntuhan sebagian atau total.

Performance level IO dan LS pada suatu elemen balok dan kolom dapat dilihat dari hubungan gaya dan perpindahan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada material beton bertulang, pembentukan kurva setiap titiknya (Gambar 1) tergantung dari tipe elemen, *material properties*, penggunaan tulangan longitudinal, dan tulangan sengkang, serta gaya aksial yang bekerja. Hubungan kurva beban dan deformasi yang digeneralisir ditunjukkan pada Gambar 1. Parameter nilai A,B,C,D,E dan kriteria IO, LS, CP pada Gambar 1 dihitung berdasarkan tabel parameter pemodelan yang dijelaskan pada ASCE 41-17 Pasal 10. Pada kurva Gambar 1, garis A ke B merupakan tahap elastis dimana nilai A mewakili kondisi tanpa beban dan B merupakan nilai kuat leleh. Kemiringan kurva dari titik B ke C merupakan zona *strengthening* yang nilainya diambil antara 0 sampai 10% dari kemiringan awal, titik C mewakili nilai ketahanan yang sama dengan kekuatan nominal. Garis C ke D menunjukkan penurunan atau kegagalan kekuatan dari elemen. Garis D ke E merupakan kekuatan sisa dari elemen, nilainya sebesar 0,2 didefinisikan pada ASCE 41-17.

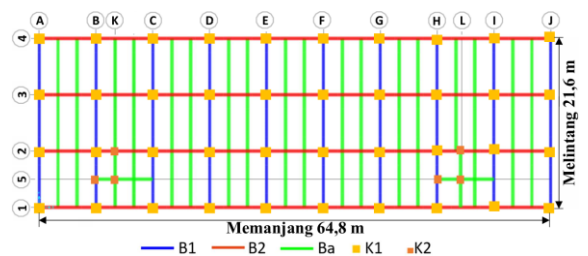
3. NONLINEAR STATIC PROCEDURE

Analisis *nonlinear static prosedur* telah banyak diterapkan untuk mengetahui respon nonlinier struktur. Penggunaannya telah direkomendasikan dalam berbagai kode diantaranya, ASCE 41-17, FEMA440, dan ATC 40. Analisis *nonlinear static prosedur* dilakukan dengan memberikan beban yang meningkat secara bertahap. Beban lateral ini mensimulasikan gaya inersia yang akan dialami

oleh struktur saat terkena beban seismik (Elgammal et al., 2023). Beberapa sumber mengusulkan berbagai pola distribusi beban lateral untuk diadopsi dalam analisis *nonlinear static prosedur*, seperti *first-mode vibration distribution*, *uniform distribution*, *inverted triangular distribution* (Kuria dan Kegyes-Brassai, 2024; Qu dan Zhou, 2020). Analisis gedung perkuliahan ini dilakukan menggunakan *inverted triangular distribution* yang didapatkan dari *vertical distribution proportional* dari *equivalent lateral force procedure* sebagai beban dorongnya.

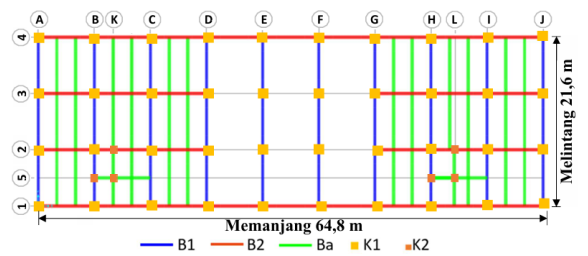
4. DESKRIPSI GEDUNG

Gedung perkuliahan berlokasi di Yogyakarta. Gedung tersebut menggunakan struktur beton bertulang sebagai struktur rangka pemikul momen. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, evaluasi gedung tersebut dievaluasi pada gedung kondisi eksisting dan kondisi sesuai dengan DED. Pada kondisi eksisting gedung terdiri dari 3 lantai dan 1 semi basement. Pada desain DED, gedung direncanakan terdiri dari 6 lantai dan 1 semi basement. Gedung memiliki susunan denah balok dan kolom lantai 1 sampai lantai 6 yang sama pada setiap lantai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Jarak antar kolom pada arah memanjang dan melintang seragam yaitu 7,2 m. Denah balok lantai atap



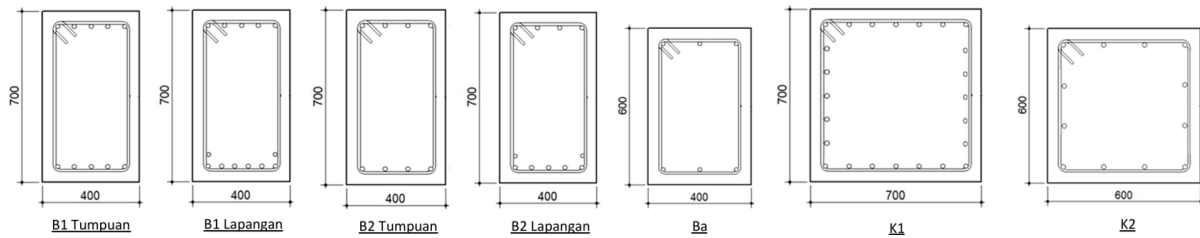
Gambar 2. Tipikal denah balok dan kolom lantai 1-6

Sumber: DED Struktur Pembangunan Gedung



Gambar 3. Tipikal denah balok dan kolom lantai atap

Sumber: DED Struktur Pembangunan Gedung



Gambar 4. Dimensi balok dan kolom

Tabel 1. Dimensi dan konfigurasi tulangan

Balok dan Kolom	Dimension		Longitudinal Reinforcement	Tulangan Sengkang
	Tinggi (m)	Lebar (m)		
Balok (B1) Tumpuan	700	400	5-D22 (top) + 5-D22 (bottom)	4 Φ 10-100
Balok (B1) Lapangan	700	400	5-D22 (top) + 8-D22 (bottom)	2 Φ 10-300
Balok (B2) Tumpuan	700	400	4-D22 (top) + 4-D22 (bottom)	4 Φ 10-100
Balok (B2) Lapangan	700	400	4-D22 (top) + 7-D22 (bottom)	2 Φ 10-300
Balok Skunder (Ba) Tumpuan	600	400	3-D19 (top) + 3-D19 (bottom)	2 Φ 8-100
Balok Skunder (Ba) Lapangan	600	400	3-D19 (top) + 3-D19 (bottom)	2 Φ 8-200
Kolom (K1) Tumpuan	700	700	24-D22	4 Φ 10-100
Kolom (K1) Lapangan	700	700	24-D23	3 Φ 10-100
Kolom (K2) Tumpuan	600	600	12-D22	2 Φ 10-100
Kolom (K2) Lapangan	600	600	12-D22	2 Φ 10-100

Tabel 2. Mutu beton dan baja

Lantai	Parameter	Nilai
Lantai 1	Mutu Beton Eksisting (Balok dan plat)	19,4 MPa
Lantai 2		17,91 MPa
Lantai 3		21,02 MPa
Lantai 4		20,52 MPa
Lantai 5	Mutu Beton Rencana (Balok dan plat)	30 MPa
Lantai 1	Mutu Beton Eksisting (Kolom)	27,84 MPa
Lantai 2		18,84 MPa
Lantai 3		19,93 MPa
Lantai 4	Mutu Beton Rencana (Kolom)	30 MPa
Lantai 5		30 MPa
Lantai 6		30 MPa
Lantai 1-6	Mutu Baja	420 MPa

dapat dilihat pada Gambar 3. Dinding penahan tanah semi basement struktur dinding beton bertulang.

Dimensi dan konfigurasi tulangan penampang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4. Seluruh dimensi balok dan kolom struktur sama dari lantai basement sampai lantai

6. Balok mempunyai lebar 400 mm dan tinggi 700 mm. Kolom mempunyai dimensi 700 mm \times 700 mm. Tebal plat lantai 12 cm. Dinding semi basement tebalnya 15 cm.

Mutu beton dan baja pada bangunan eksisting ditentukan berdasarkan data sekunder hasil pengujian *core drill* dan *hardnes test*. Mutu beton dan baja lantai tambahan ditentukan sesuai dengan DED. Mutu beton dan baja secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.

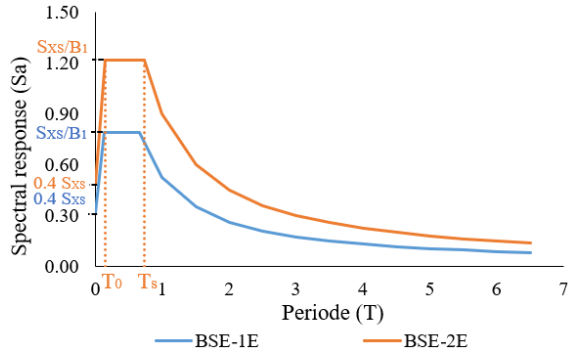
5. PEMODELAN STRUKTUR

Struktur gedung dimodelkan sebagai *open frame 3D model* dengan menggunakan *software SAP2000*. Elemen kolom dan balok dimodelkan menggunakan *section designer feature*. Hal ini agar dapat memasukan *detailing* tulangan kondisi asli. Plat lantai tidak dimodelkan. Beban-beban yang bekerja pada plat lantai di *assign* pada balok-balok induk. Tumpuan struktur dimodelkan sebagai jepit. Hal ini dengan mempertimbangkan bahwa pondasi pada gedung eksisting berupa pondasi dalam.

Beban yang diaplikasikan pada struktur terdiri dari beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban mati dihitung secara otomatis

Tabel 3. Parameter spectral respon gedung

Seismic Hazard level	S _s	S ₁	F _a	F _v	S _{Xs}	S _{X1}	T ₀	T _s
BSE-1E	0,60	0,25	1,32	2,10	0,792	0,525	0,133	0,663
BSE-2E	1,20	0,50	1,02	1,80	1,224	0,90	0,147	0,735



Gambar 5. Spectral respon

oleh *software* SAP2000. Besar beban hidup ditentukan dengan mempertimbangkan fungsi lantai tersebut. Besar beban hidup ditentukan berdasarkan SNI 1727-2020. Beban gempa ditentukan berdasarkan ASCE 41-17 dan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa. Beban gempa yang dihitung berdasarkan lokasi, fungsi gedung, dan kelas situs tanah.

Seperti disebutkan sebelumnya, evaluasi gedung ini meninjau beban gempa pada *seismic hazard level* BSE-1E dan BSE-2E. Parameter respon spektra percepatan untuk tingkat bahaya seismik BSE-1E merupakan nilai percepatan spektrum respon untuk probabilitas beban gempa terlampaui 20% dalam 50 tahun. Parameter respon spektra percepatan untuk tingkat bahaya seismik BSE-2E merupakan nilai percepatan spectrum respon untuk probabilitas beban gempa terlampaui 5% dalam 50 tahun.

Penentuan ringkasan parameter situs seismik disajikan pada Tabel 3, dengan klasifikasi situs tanah berdasakan hasil evaluasi penyelidikan tanah yang menunjukkan kelas SD (tanah sedang). S_s dan S₁ merupakan *spectral acceleration* 0,2 detik dan 1 detik, F_a dan F_v merupakan koefisien situs. Nilai S_s dan S₁ ditentukan berdasarkan peta percepatan puncak dan spektrum respon untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun dan 5% dalam 50 tahun. Nilai F_a dan F_v ditentukan berdasarkan SNI 1726:2019. S_{Xs} dan S_{X1} masing-masing adalah desain periode pendek dan periode 1 detik yang ditentukan dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2. T₀ dan

T_s pada Tabel 3 diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3 dan 4. Dengan menggunakan Tabel 3, respon spektrum yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada Gambar 5. Grafik respon spektrum tersebut kemudian didefinisikan pada *software* SAP2000 untuk memperoleh beban gempa rencana yang nantinya digunakan untuk menilai performa bangunan.

$$S_{XS} = F_a \times S_s \tag{1}$$

$$S_{X1} = F_v \times S_1 \tag{2}$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{3}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{4}$$

Beban lateral pushover pada analisis nonlinier di-assign pada model 3D dengan menerapkan beban lateral pada masing-masing lantai diafragma. Lokasi beban diletakkan pada joint kolom yang dekat dengan pusat massa masing-masing lantai diafragma. Distribusi beban lateral *nonlinear static* yang di-assign pada masing-masing lantai mengikuti distribusi beban lateral gempa statik ekuivalen. Distribusi tersebut dihitung menggunakan Persamaan 5 dan 6.

$$F_x = C_{vx} \times V \tag{5}$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \tag{6}$$

C_{vx} merupakan *vertical distribution factor*. V merupakan gaya lateral pseudo. w_i dan w_x merupakan *portion of the effective seismic weight* masing-masing pada lantai ke-i dan ke-w. h_i and h_x adalah the *height from the base to level i* atau x. k adalah exponent tergantung nilai periode struktur (T). Jika T ≥ 2,5 detik maka nilai k = 2. Jika T ≤ 0,5 detik maka nilai k=1,0. Jika nilai 0,5<T<2,5 maka nilai k diperoleh dengan cara interpolasi untuk memperoleh nilai diantara 1 dan 2. Pembebanan lateral *nonlinear static procedur* diterapkan setelah beban gravitasi bekerja pada model 3D.

Analisis nonlinier statik yang dilakukan dengan menggunakan *displacement control*. Lateral *displacement* dari *nodal control* ditetapkan sampai 150% perpindahan target (δ_i).

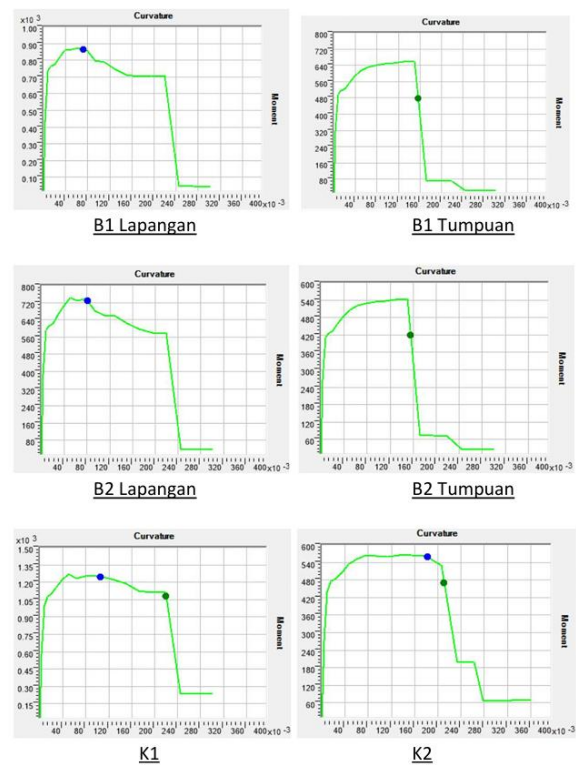
Perpindahan target untuk persyaratan kriteria dasar bangunan BSE-1E dan BSE-2E pada kategori risiko bangunan IV masing-masing adalah 0,01h dan 0,02h. h adalah tinggi bangunan. *Nodal control* dilokasikan pada *joint* kolom lantai teratas dekat dengan pusat massa.

Pemodelan nonlinier material beton pada *software* SAP2000 menggunakan Mander model (Mander et al., 1989). Pemodelan nonlinier beton tersebut dengan mempertimbangkan *confinement* baik pada penampang balok maupun kolom. Untuk merepresentasikan perilaku penampang retak pada balok dan kolom, nilai kekakuan efektif diaplikasikan pada elemen structural. Nilai kekakuan efektif balok *flexural rigidity* dan balok *shear rigidity* masing-masing adalah $0,3E_cI_g$ dan $0,4E_cI_g$. Nilai kekakuan efektif kolom *flexural rigidity* dan kolom *shear rigidity* masing-masing adalah $0,7E_cI_g$ dan $0,4 E_cI_g$ (Asce/SEI 41-17, 2017).

Pemodelan nonlinier material baja pada *software* SAP2000 dilakukan dengan mendefinisikan minimum *yield strength*, minimum *tensile strength*, *expected yield strength*, dan *expected tensile strength*. Nilai *expected yield* dan *tensile strength* ditentukan berdasarkan ASCE 41-17.

Pemodelan nonlinier penampang dalam struktur dilakukan dengan mendefinisikan momen-kurvatur penampang kolom dan balok. Proses ini dilakukan dengan mendefinisikan penampang balok dan kolom, diantaranya adalah dimensi penampang, tulangan longitudinal, dan tulangan sengkang. Pendefinisian penampang tersebut pada SAP2000 dengan menggunakan *feature section designer*. Dengan menggunakan *feature* tersebut, SAP2000 akan menghitung momen-kurvatur penampang balok dan kolom, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Pemodelan nonlinier elemen dilakukan dengan mendefinisikan *plastic hinges* melalui hubungan momen-rotasi (*backbone*) pada setiap elemen. *Hinges properties* yang digunakan pada balok merupakan *deformation control moment M₃* sedangkan *hinges properties* yang digunakan pada kolom merupakan *deformation control interacting P-M₂-M₃*. *Modeling displacement control parameters backbone* untuk nonlinier *reinforced concrete* balok dan kolom masing-masing ditentukan berdasarkan Tabel 10-7 dan Table 10-8 ASCE 41-17. *Plastic hinges* yang telah didefinisikan tersebut kemudian di-*assign* pada bagian kedua tumpuan balok dan kolom. *Plastic hinges* balok dan kolom diletakkan .



Gambar 6. Momen kurvatur balok dan kolom

masing-masing pada 0,5 dari tinggi balok dan 0,5 dari tinggi kolom

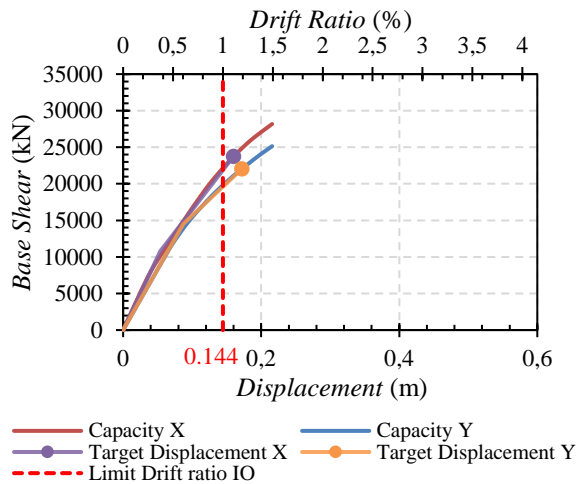
6. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis nonlinier statik yang dicermati pada paper ini meliputi hubungan gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan (*displacement*) struktur akibat gempa desain BSE-1E dan BSE-2E untuk bangunan 3 lantai dan 6 lantai. Selain itu ditampilkan simpangan horizontal maksimum yang diijinkan, hasil rotasi plastis dan persebaran sendi plastis.

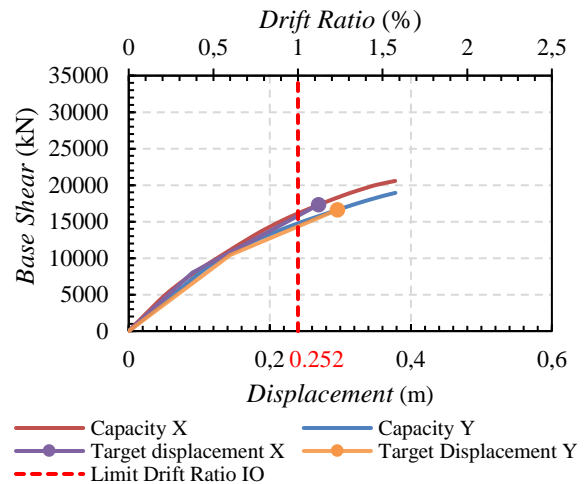
6.1 Target Perpindahan

Target perpindahan gempa desain BSE-1E arah X dan Y untuk struktur 3 lantai dapat dilihat pada Gambar 7. Target perpindahan BSE-1E arah X diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 23758 kN yaitu 0,16 m. Target perpindahan BSE-1E arah Y diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 22038 kN yaitu 0,172 m.

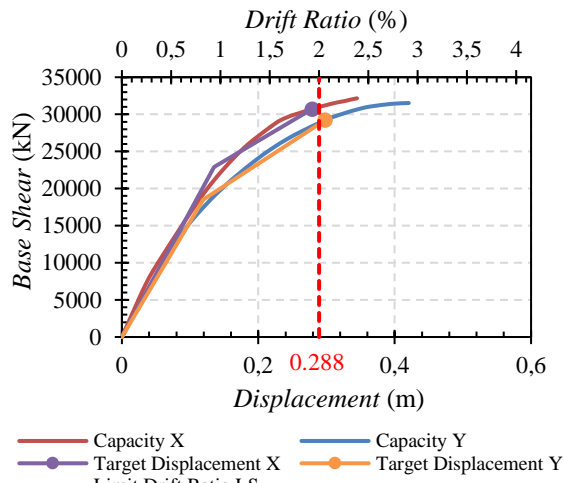
Kurva kapasitas dan target perpindahan BSE-2E struktur 3 lantai yang dapat dilihat pada Gambar 8. Target perpindahan gempa desain BSE-2E arah X struktur 3 lantai diperoleh saat gedung menerima *base shear* 30725 kN, yaitu sebesar 0,279 m. Target perpindahan gempa



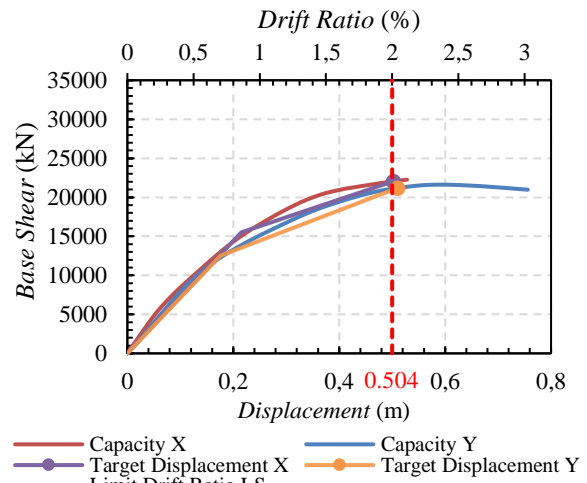
Gambar 7. Kurva pushover 3 lantai (BSE-1E)



Gambar 9. Kurva pushover 6 lantai (BSE-1E)



Gambar 8. Kurva pushover 3 lantai (BSE-2E)



Gambar 10. Kurva pushover 6 lantai (BSE-2E)

desain BSE-2E arah Y saat gedung menerima *base shear* sebesar 29219 kN sebesar 0,298 m.

Kurva kapasitas dan target perpindahan BSE-1E untuk struktur 6 lantai arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 9. Target perpindahan gempa desain arah X diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 17299 kN yaitu sebesar 0,269 m. Target perpindahan gempa desain arah Y diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 16616 kN sebesar 0,296 m.

Kurva kapasitas dan target perpindahan BSE-2E untuk struktur 6 lantai arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 10. Target perpindahan gempa desain arah X diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 22047 kN yaitu sebesar 0,502 m. Target perpindahan gempa desain arah Y diperoleh saat gedung menerima *base shear* sebesar 21187 kN sebesar 0,510 m.

Berdasarkan Gambar 7 sampai Gambar 10, struktur 3 lantai dan struktur 6 lantai telah mencapai nilai target displacemen baik beban

gempa rencana BSE-1E arah X, BSE-1E arah Y, BSE-2E arah X, dan BSE-2E arah Y.

6.2 Simpangan Horizontal Maksimum yang diijinkan

Kriteria penerimaan secara global ditentukan berdasarkan nilai *drift ratio*. Mengacu pada ASCE 7-22, *drift ratio* didapatkan dari pembagian simpangan antar tingkat yang terjadi pada struktur akibat pengaruh seismik terhadap tinggi tingkat. Pada penelitian ini, batasan yang digunakan sebagai kriteria penerimaan *drift* maksimum untuk level kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* ditentukan berdasarkan FEMA 356 (2000) dan ATC-40 (1996). Hal tersebut dikarenakan batasan nilai *drift ratio* tidak diatur secara eksplisit pada ASCE 41-17. Kriteria penerimaan *drift ratio* tersebut yaitu sebesar 1% dan 2% masing-masing untuk level kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*.

Tinggi total bangunan 3 lantai dan 6 lantai termasuk basement masing-masing sebesar 14,4 m dan 25,2 m. Simpangan horizontal maksimal bangunan 3 lantai yang diijinkan untuk *drift ratio* 1% dan 2% masing-masing adalah 0,144 m dan 0,288 m. Simpangan horizontal maksimal bangunan 6 lantai yang diijinkan untuk *drift ratio* 1% dan 2% masing-masing adalah 0,252 m dan 0,504 m. Berdasarkan Gambar 5 sampai Gambar 8 dapat diketahui bahwa target perpindahan baik bangunan 3 lantai maupun 6 lantai melebihi simpangan maksimal horisontal yang diijinkan. Oleh karena itu, kedua tipe bangunan tersebut tidak memenuhi persyaratan simpangan maksimum untuk kategori performa gedung *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* ketika bangunan menerima beban gempa rencana baik arah X maupun arah Y.

6.3 Rotasi Plastis

Evaluasi kriteria penerimaan *deformation-controlled action* pada komponen balok dan kolom masing-masing dilakukan berdasarkan ke-

tentuan Tabel 10-7 dan Table 10-8 ASCE 41-17. Hasil perhitungan dengan menggunakan kedua tabel tersebut akan diperoleh nilai kondisi batas *plastic rotation angle* elemen balok dan kolom untuk masing-masing target level kinerja.

Evaluasi kriteria penerimaan rotasi plastis balok untuk struktur 3 lantai baik terhadap gempa desain BSE-1E dan BSE-2E dapat dilihat pada Tabel 4.

Hasil *plastic rotation* menunjukkan bahwa beberapa elemen balok tidak memenuhi kriteria penerimaan IO untuk beban gempa BSE-1E dan beberapa elemen balok tidak memenuhi kriteria penerimaan LS untuk beban gempa BSE-2E.

Plastic rotation elemen kolom struktur 3 lantai dapat dilihat pada Tabel 5. Rotasi plastis kolom K1 akibat beban gempa desain BSE-1E memenuhi kriteria penerimaan IO pada seluruh lantai sedangkan rotasi plastis kolom K2 tidak memenuhi kriteria IO untuk lantai 1 sampai 3. Akibat beban gempa BSE-2E, rotasi plastis seluruh elemen kolom memenuhi kriteria penerimaan LS.

Tabel 4. Rotasi plastis balok 3 lantai

Balok	BSE-1E (<i>Immediate Occupancy, IO</i>)			BSE-2E (<i>Live Safety, LS</i>)		
	Rotasi Plastis (Rad)	Limit IO	Ket.	Rotasi Plastis (Rad)	Limit LS	Ket.
B1 Lantai 1	0,009	0,005	Not Ok	0,016	0,02	Ok
B1 Lantai 2	0,014	0,005	Not Ok	0,029	0,02	Not Ok
B1 Lantai 3	0,010	0,005	Not Ok	0,020	0,02	Ok
B1 Lantai 4	0,003	0,005	Ok	0,009	0,02	Ok
B2 Lantai 1	0,010	0,005	Not Ok	0,014	0,02	Ok
B2 Lantai 2	0,015	0,005	Not Ok	0,033	0,02	Not Ok
B2 Lantai 3	0,012	0,005	Not Ok	0,020	0,02	Not Ok
B2 Lantai 4	0,004	0,005	Ok	0,011	0,02	Ok
Bbase	0,000	0,005	Ok	0,000	0,02	Ok

Tabel 5. Rotasi plastis kolom 3 lantai

Kolom	BSE-1E (<i>Immediate Occupancy, IO</i>)			BSE-2E (<i>Live Safety, LS</i>)		
	Rotasi Plastis (Rad)	Limit IO	Ket.	Rotasi Plastis (Rad)	Limit LS	Ket.
K1 base	0,000	0,005	Ok	0,004	0,045	Ok
K1 Lantai 1	0,006	0,005	Not Ok	0,020	0,045	Ok
K1 Lantai 2	0,001	0,005	Ok	0,008	0,045	Ok
K1 Lantai 3	0,000	0,005	Ok	0,004	0,045	Ok
K2 base	0,001	0,005	Ok	0,004	0,045	Ok
K2 Lantai 1	0,008	0,005	Not Ok	0,021	0,045	Ok
K2 Lantai 2	0,003	0,005	Ok	0,012	0,045	Ok
K2 Lantai 3	0,002	0,005	Ok	0,009	0,045	Ok

Tabel 6. Rotasi plastis balok 6 lantai

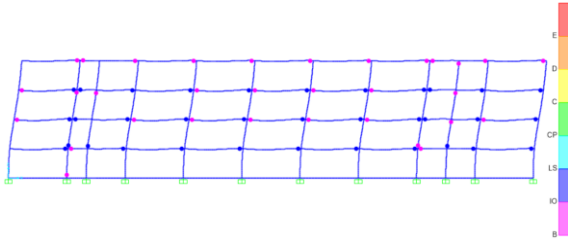
Balok	BSE-1E (<i>Immadiate Occupancy, IO</i>)			BSE-2E (<i>Live Safety, LS</i>)		
	Rotasi Plastis (Rad)	Limit IO	Ket.	Rotasi Plastis (Rad)	Limit LS	Ket.
B1 Lantai 1	0,007	0,005	Not Ok	0,014	0,02	Ok
B1 Lantai 2	0,014	0,005	Not Ok	0,032	0,02	Not Ok
B1 Lantai 3	0,016	0,005	Not Ok	0,034	0,02	Not Ok
B1 Lantai 4	0,012	0,005	Not Ok	0,024	0,02	Not Ok
B1 Lantai 5	0,007	0,005	Not Ok	0,015	0,02	Ok
B1 Lantai 6	0,001	0,005	Ok	0,006	0,02	Ok
B1 Roof	0,000	0,005	Ok	0,000	0,02	Ok
B2 Lantai 1	0,008	0,005	Not Ok	0,013	0,02	Ok
B2 Lantai 2	0,015	0,005	Not Ok	0,041	0,02	Not Ok
B2 Lantai 3	0,016	0,005	Not Ok	0,046	0,02	Not Ok
B2 Lantai 4	0,013	0,005	Not Ok	0,028	0,02	Not Ok
B2 Lantai 5	0,009	0,005	Not Ok	0,018	0,02	Ok
B2 Lantai 6	0,002	0,005	Ok	0,010	0,02	Ok
B2 Roof	0,000	0,005	Ok	0,000	0,02	Ok
B Base	0,000	0,005	Ok	0,000	0,02	Ok

Tabel 7. Rotasi plastis kolom 6 lantai

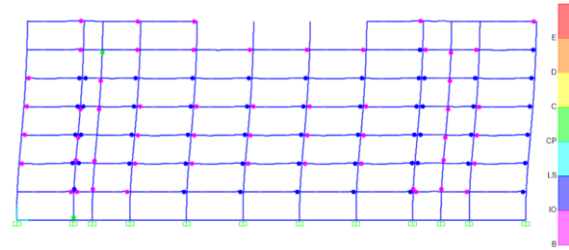
Kolom	BSE-1E (<i>Immadiate Occupancy, IO</i>)			BSE-2E (<i>Live Safety, LS</i>)		
	Rotasi Plastis (Rad)	Limit IO	Ket.	Rotasi Plastis (Rad)	Limit LS	Ket.
K1 Base	0,006	0,005	Not Ok	0,002	0,045	Ok
K1 Lantai 1	0,001	0,005	Ok	0,025	0,045	Ok
K1 Lantai 2	0,000	0,005	Ok	0,016	0,045	Ok
K1 Lantai 3	0,000	0,005	Ok	0,005	0,045	Ok
K1 Lantai 4	0,000	0,005	Ok	0,000	0,045	Ok
K1 Lantai 5	0,000	0,005	Ok	0,000	0,045	Ok
K1 Lantai 6	0,000	0,005	Ok	0,000	0,045	Ok
K2 Base	0,001	0,005	Ok	0,001	0,045	Ok
K2 Lantai 1	0,008	0,005	Not Ok	0,017	0,045	Ok
K2 Lantai 2	0,003	0,005	Ok	0,022	0,045	Ok
K2 Lantai 3	0,003	0,005	Ok	0,003	0,045	Ok
K2 Lantai 4	0,001	0,005	Ok	0,008	0,045	Ok
K2 Lantai 5	0,000	0,005	Ok	0,000	0,045	Ok
K2 Lantai 6	0,000	0,005	Ok	0,000	0,045	Ok

Tabel 8. Persebaran sendi plastis balok dan kolom

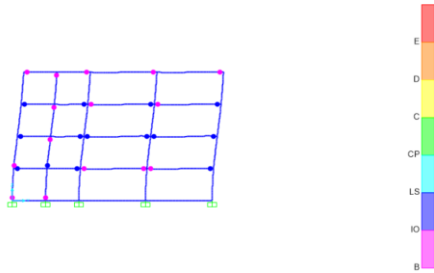
Model	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CptoC	CtoD	DtoE	>E	Total
Gedung 3 lantai arah X BSE-1E	783	126	119	0	2	0	0	0	1030
Gedung 3 lantai arah Y BSE-1E	799	111	120	0	0	0	0	0	1030
Gedung 3 lantai arah X BSE-2E	669	67	242	0	12	40	0	0	1030
Gedung 3 lantai arah Y BSE-2E	688	65	262	0	2	13	0	0	1030
Gedung 6 lantai arah X BSE-1E	1286	188	208	0	4	0	0	0	1686
Gedung 6 lantai arah Y BSE-1E	1334	140	211	0	1	0	0	0	1686
Gedung 6 lantai arah X BSE-2E	1104	123	323	0	26	110	0	0	1686
Gedung 6 lantai arah Y BSE-2E	1166	144	292	0	16	69	0	0	1686



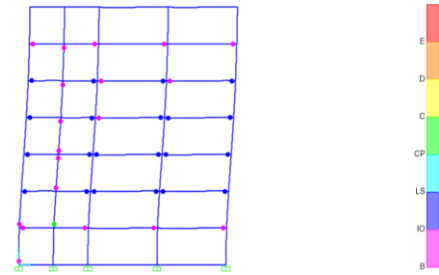
Gambar 11. Sendi plastis gedung 3 lantai arah X (BSE-1E) pada as 2 Gambar 2



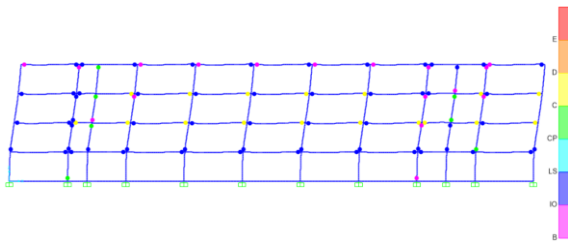
Gambar 15. Sendi plastis gedung 6 lantai arah X (BSE-1E) pada as 2 Gambar 2



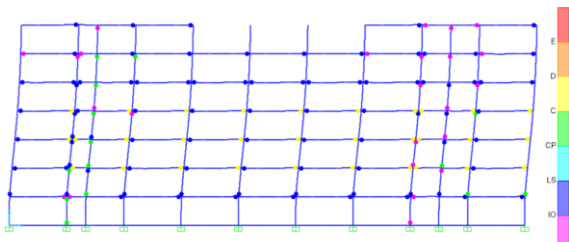
Gambar 12. Sendi plastis gedung 3 lantai arah Y (BSE-1E) pada as H Gambar 2



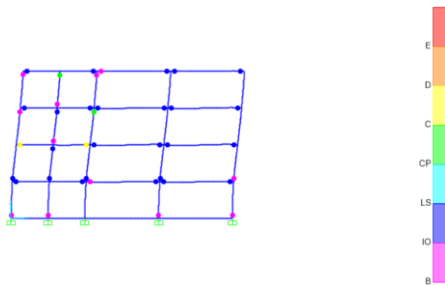
Gambar 16. Sendi plastis gedung 6 lantai arah Y (BSE-1E) pada potongan H Gambar 2



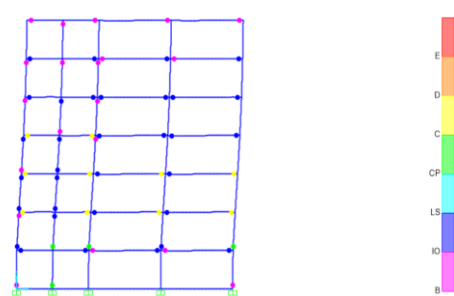
Gambar 13. Sendi plastis gedung 3 lantai arah X (BSE-2E) pada as 2 Gambar 2



Gambar 17. Sendi plastis gedung 6 lantai arah X (BSE-2E) pada as 2 Gambar 2



Gambar 14. Sendi Plastis gedung 3 lantai arah Y (BSE-2E) pada as H Gambar 2



Gambar 18. Sendi Plastis gedung 6 lantai arah Y (BSE-2E) pada as H Gambar 2

Rotasi plastis balok struktur 6 lantai dapat dilihat pada Tabel 6. Tabel tersebut menunjukkan bahwa terdapat beberapa elemen balok yang tidak memenuhi kriteria rotasi plastis IO dan LS masing-masing akibat beban gempa BSE-1E dan BSE-2E.

Rotasi plastis elemen kolom struktur 6 lantai secara rinci dapat dilihat pada Tabel 7. Hasil evaluasi rotasi plastis kolom struktur 6 lantai akibat beban gempa pada BSE-1E menunjukkan

bahwa kolom K1 memenuhi kriteria penerimaan IO pada seluruh lantai sedangkan kolom K2 tidak memenuhi IO untuk lantai 1. Evaluasi terhadap beban gempa BSE-2E menunjukkan bahwa seluruh komponen memenuhi kriteria penerimaan LS.

6.4 Persebaran Sendi Plastis

Persebaran sendi plastis pada gedung 3 lantai saat mencapai *displacement target* pada beban gempa rencana BSE-1E arah X dan arah

Y dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12. Gambar tersebut menunjukkan bahwa beberapa level kinerja struktur elemen telah melebihi IO. Berdasarkan Tabel 8, terdapat 121 dan 120 sendi plastis yang melebihi level kinerja IO masing masing akibat beban gempa rencana BSE-1E arah X dan arah Y.

Persebaran sendi plastis pada gedung 3 lantai pada beban gempa rencana BSE-2E arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14. Berdasarkan Tabel 8, terdapat 52 dan 15 sendi plastis melebihi level kinerja struktur LS masing masing akibat beban gempa rencana BSE-2E arah X dan arah Y.

Persebaran sendi plastis pada gedung 6 lantai pada beban gempa rencana BSE-1E arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16. Berdasarkan Tabel 8, terdapat 212 dan 212 sendi plastis melebihi level kinerja struktur IO untuk masing-masing akibat beban gempa rencana BSE-1E arah X dan arah Y.

Persebaran sendi plastis pada gedung 6 lantai pada beban gempa rencana BSE-2E arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 17 dan Gambar 18. Berdasarkan Tabel 8, terdapat 136 dan 84 sendi plastis melebihi level kinerja struktur LS masing masing akibat beban gempa rencana BSE-1E arah X dan arah Y.

7. KESIMPULAN

Hasil evaluasi kinerja seismik dengan analisis pushover struktur bangunan gedung perkuliahan eksisting 3 lantai dan 6 lantai dapat dilihat bahwa struktur gedung 3 lantai dan 6 lantai tidak memenuhi target perpindahan struktur berdasarkan ASCE 41-17 baik akibat beban gempa rencana BSE-1E dan BSE-2E. Gedung 3 lantai dan 6 lantai juga tidak memenuhi simpangan horizontal maksimum yang diijinkan ASCE 7-22. Selain itu, terdapat rotasi plastis yang tidak memenuhi kriteria penerimaan struktur IO untuk gempa desain BSE-1E dan kriteria penerimaan struktur LS untuk gempa desain BSE-2E. Oleh karena itu, hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur Gedung 3 lantai dan 6 lantai tidak memenuhi level kinerja seismik yang disyaratkan ASCE 41-17.

DAFTAR PUSTAKA

Aguayo, R., Carvallo, J., dan Vielma, J.C. (2024). *Evaluating Seismic Performance in Reinforced Concrete Buildings with Complex Shear Walls: A Focus on a Residential Case in Chile*. Buildings, Vol.

14, No. 3, Pp. 761
<https://doi.org/10.3390/buildings14030761>

Allahvirdizadeh, R. dan Gholipour, Y. (2017). *Reliability evaluation of predicted structural performances using nonlinear static analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15, No. 5. Pp. 2129-2148. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0062-x>

American Society of Civil Engineers, (2017). *ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. American Society of Civil Engineers, Virginia.

Applied Technology Council, (1996). *ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council, Redwood City, California.

Çavdar, Ö. (2022). *Seismic performance of a high-rise building by using linear and nonlinear methods*. Natural Hazards, Vol. 112, No. 2. Pp. 1359-1378. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05231-z>

El-Betar, S.A. (2016). *Seismic vulnerability evaluation of existing R.C. buildings*. HBRC Journal, Vol. 14, No. 2, Pp. 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.09.002>

Elgammal, A., Ali, Y., dan Seleemah, A. (2023). *Strengthening of seismically deficient moment-resisting frames with yielding metallic damper*. Delta University Scientific Journal, Vol. 6, No. 2, Pp. 231-247. DOI:10.21608/DUSJ.2023.318652

Erdem, R.T. dan Karal, K. (2022)a. *Performance assessment and strengthening proposal of an existing building*. Gradjevinar, Vol. 74, No. 1, Pp. 51-61. <https://doi.org/10.14256/JCE.3250.2021>

Erdem, R.T. dan Karal, K. (2022)b. *Performance evaluation and strengthening of reinforced concrete buildings*. Revista de la Construcción, Vol. 21, No. 1, Pp. 53-68. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.1.53>

Halder, L. dan Paul, S. (2016). *Seismic Damage*

- Evaluation of Gravity Load Designed Low Rise RC Building Using Non-linear Static Method.* Procedia Engineering, Vol. 144, Pp.1373–1380. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2016.05.167>
- Idris, Y., Cummins, P., Rusydy, I., Muksin, U., Syamsidik, Habibie, M.Y., dan Meilianda, E. (2022). *Post-Earthquake Damage Assessment after the 6.5 Mw Earthquake on December, 7th 2016 in Pidie Jaya, Indonesia.* Journal of Earthquake Engineering, Vol. 26, No. 1, Pp. 409–426. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1689868>
- Inel, M., Cayci, B.T., dan Meral, E. (2018). *Nonlinear Static and Dynamic Analyses of RC Buildings.* International Journal of Civil Engineering, Vol. 16, No. 9, Pp. 1241–1259. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0285-0>
- Kuria, K.K. dan Kegyes-Brassai, O.K. (2023). *Nonlinear Static Analysis for Seismic Evaluation of Existing RC Hospital Building.* Applied Sciences, Vol. 13, No. 21, Pp. 11626. <https://doi.org/10.3390/app132111626>
- Kuria, K.K. dan Kegyes-Brassai, O.K. (2024). *Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for Structural Assessment.* Applied Sciences (Switzerland), Vol. 14, No. 1, Pp. 151. <https://doi.org/10.3390/app14010151>
- Maidiawati, Tanjung, J., Sanada, Y., Nugroho, F., dan Wardi, S. (2020). *Seismic analysis of damaged buildings based on post-earthquake investigation of the 2018 palu earthquake.* International Journal of GEOMATE, Vol. 18, No. 70, Pp 116-122. <https://doi.org/10.21660/2020.70.9490>
- Mander, 1, M. J. N. Priestley, 2, and R. Park, 3, dan Fellow, A. (1989). *Conducted providing the stress-strain relation for the concrete and steel are- known . The moments and curvatures associated with increasing flexural deformations of the column may be computed for various column axial loads by incrementing the curvature a,* Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, Pp 1804-1826.
- Masum, M. dan Ali Akbar, M. (2019). *The Pacific Ring of Fire is Working as a Home Country of Geothermal Resources in the World.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 249, No. 1, Pp. 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012020>
- Nugroho, W.O., Sagara, A., dan Imran, I. (2022). *The evolution of Indonesian seismic and concrete building codes: From the past to the present.* Structures, Vol. 41, Pp 1092-1108. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.032>
- Prince, M.B., Mollah, M.N.I., Chowdhury, M.R.A., dan Sen, D. (2023). *Comparison of lateral behavior of an existing RC building under nonlinear static and incremental dynamic loads.* Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 7, Pp. 2155-2164. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00632-2>
- Qu, C. dan Zhou, Y. (2020). *A new lateral load pattern for pushover analysis of asymmetric-plan structures.* Journal of Vibroengineering, Vol. 22, No. 5, Pp. 1113. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.20907>
- Saputra, A., Rahardianto, T., Revindo, M.D., Delikostidis, I., Hadmoko, D.S., Sartohadi, J., dan Gomez, C. (2017). *Seismic vulnerability assessment of residential buildings using logistic regression and geographic information system (GIS) in Pleret Sub District (Yogyakarta, Indonesia).* Geoenvironmental Disasters, Vol. 4, No. 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0075-z>
- Zhao, B., Liao, H., dan Su, L. (2021). *Landslides triggered by the 2018 Lombok earthquake sequence, Indonesia.* Catena, Vol. 207, 105676. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105676>