

EVALUASI KINERJA STRUKTUR GEDUNG BERDASARKAN METODE SPEKTRUM KAPASITAS (ATC-40) DAN TARGET PERPINDAHAN MODIFIKASI (FEMA 440)

I Ketut Diartama Kubon Tubuh¹, I Gede Gegiranang Wiryadi^{1*}, I Putu Agus Putra Wirawan¹ dan Henri Meta Kondamay¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mahasaraswati Denpasar

Email: gegiranangwiryadi@unmas.ac.id

ABSTRAK: Analisis kinerja struktur merupakan metode analisis struktur pasca elastis yang mana bertujuan untuk mendapatkan besarnya gaya geser dasar dan perpindahan maksimum pada struktur bangunan. Pada paper ini ditampilkan hasil evaluasi kinerja struktur gedung yang telah dibangun dengan sistem rangka terbuka yang berfungsi sebagai rumah susun empat tingkat yang didesain berlokasi di Malang, Jawa Timur. Gedung ini didesain dengan beban gempa berdasarkan respon spektrum dari peta gempa Indonesia. Metode analisis kinerja struktur dilakukan berdasarkan metode Spektrum Kapasitas (ATC-40) dan metode Target Perpindahan Modifikasi (FEMA 440). Hasil analisis kinerja baik berdasarkan pendekatan Spektrum Kapasitas maupun Target Perpindahan Modifikasi menunjukkan tingkat atau level kinerja yang sama yaitu *Immediate Occupancy* (IO). Namun kondisi eksisting struktur pada performance point atau level kinerjanya terdapat beberapa elemen struktur mengalami sendi plastis *Collapse* (C). Hal ini menunjukkan kinerja struktur belum memenuhi kriteria ATC-40 dan FEMA 440. Sehingga perlu dilakukan perbaikan terhadap elemen struktur yang mengalami *collapse* (C) untuk mendapatkan level kinerja sesuai dengan metode ATC-40 dan FEMA 440.

Kata kunci: metode spektrum kapasitas, target perpindahan modifikasi, evaluasi kinerja struktur, sendi plastis

PERFORMANCE EVALUATION OF BUILDING STRUCTURE BASE ON CAPACITY SPECTRUM METHOD (ATC-40) AND DISPLACEMENT TARGET MODIFICATION (FEMA 440)

ABSTRACT: *Structural performance analysis is a post-elastic structure analysis method that aims to obtain the maximum base shear force and the maximum displacement of the building structure. In this paper, the results of the evaluation of the performance of the building structure that has been designed as a four-story apartment with an open frame system located in Malang, East Java. This building is designed with earthquake loads using response spectrum based on the Indonesian earthquake map. The structural performance analysis method was carried out referring to the Capacity Spectrum method (ATC-40) and the Modified Target Displacement method (FEMA 440). The results of the performance analysis based on the Capacity Spectrum approach and Modified Displacement Target both show the same level of performance, namely Immediate Occupancy (IO). However, the existing condition of the structure at the performance point or performance level there are several structural elements experiencing plastic hinges Collapse (C). This shows that the performance of the structure has not met the criteria for ATC-40 and FEMA 440. So, it is necessary to make improvements to the collapsing (C) structural elements so that the performance level is in accordance with the ATC-40 and FEMA 440 methods.*

Keywords: *capacity spectrum method, displacement target modification, structural performance evaluation, plastic hinges*

PENDAHULUAN

Perkembangan analisis struktur berdasarkan metode numerik menggunakan program komputer saat ini sangat pesat. Berbagai penelitian di bidang analisis struktur telah banyak dilakukan untuk mendesain struktur maupun evaluasi struktur yang telah berdiri. Analisis struktur pada kondisi elastis maupun kondisi inelastis dengan berbagai metode yang disediakan oleh aplikasi analisis struktur. Desain struktur berdasarkan peraturan gempa yang berlaku di Indonesia, SNI 1726:2019 (BSN, 2019) banyak menggunakan metode respon spektrum dan statik ekuivalen dengan batas-batas kondisi elastis. Namun, analisis pada kondisi inelastis masih jarang dilakukan dalam desain karena memerlukan waktu yang lebih lama dan perangkat komputer yang lebih tinggi spesifikasinya, apalagi bentuk dan tingkat bangunan yang lebih kompleks. Metode analisis inelastik banyak digunakan yaitu metode analisis dinamis nonlinear (riwayat waktu/ *time history analysis*) dan analisis statik dorong (*static pushover analysis*). Analisis riwayat waktu dapat mensimulasikan struktur bangunan yang diberikan beban berupa rekaman gempa yang sebenarnya (Wiryadi et al., 2021). Sedangkan analisis *static pushover* dapat mengetahui level kinerja struktur pada kondisi inelastisnya (Wibawa et al., 2021). Analisis dengan metode tersebut memang memerlukan waktu yang lebih lama untuk mendapatkan parameter yang ditinjau. Metode analisis statik dorong atau *static pushover analysis* dapat mengacu pada metode spektrum kapasitas, ATC-40, maupun metode target perpindahan FEMA-356, ataupun metode target perpindahan yang disempurnakan dalam FEMA 440 (FEMA, 2005). Kedua metode tersebut memiliki acuan dalam penentuan level kinerja struktur atau *performance point* pasca kondisi elastis. Kinerja struktur pada level *inelastic* ini menjadi acuan dalam menentukan kondisi struktur serta kemungkinan perbaikan struktur jika struktur mengalami kerusakan akibat beban lateral besar yang melampaui beban rencananya.

Indonesia sebagai negara yang terletak di wilayah gempa tinggi membuat setiap struktur bangunan harus direncanakan dapat memikul beban gempa rencana. Beban gempa rencana berdasarkan SNI 1726:2019 didasarkan pada riwayat gempa yang pernah terjadi dalam kurun waktu tertentu yang terpetakan dalam percepatan spektral. Data yang dipetakan berupa data statistic sehingga parameternya dapat mengalami perubahan jika data baru di-*input*. Hal ini terjadi pada perubahan peta gempa 2010 ke peta gempa 2017, yang mana mengakibatkan perubahan pada faktor percepatan dasar periode pendek dan periode 1 detik sehingga mengakibatkan perubahan pada gaya gempa rencana (Tubuh et al., 2021).

Pentingnya analisis pada kondisi inelastis adalah untuk mengetahui kondisi struktur apabila beban gempa rencananya terlewati. Hal ini juga dapat dilakukan pada gedung yang sudah berdiri sebagai evaluasi struktur pada kondisi inelastis. Metode spektrum kapasitas dari ATC-40 maupun metode target perpindahan modifikasi dari FEMA 440 memiliki perbedaan dalam menentukan target kinerja struktur pada kondisi inelastis, namun memberikan hasil yang serupa (Wiryadi et al., 2022). Hal ini menjadikan kedua metode tersebut relevan untuk diaplikasikan dalam menganalisis struktur pada kondisi inelastis. Sehingga pada paper ini ditampilkan hasil analisis statik dorong atau *static pushover analysis* pada struktur gedung yang telah berdiri yang memiliki empat tingkat dan berfungsi sebagai rumah susun yang terletak di daerah malang, Jawa Timur. Metode analisis yang digunakan mengacu pada ATC-40 dan FEMA 440 dalam menentukan level kinerja struktur. Hasil menampilkan masing-masing pendekatan kinerja dari kedua metode tersebut dan nilai kinerja struktur eksisting sebagai evaluasi kinerjanya serta perbandingannya.

METODE

Kinerja Struktur

Kinerja struktur adalah batas kemampuan struktur dapat menahan beban pada kondisi inelastis atau telah melewati batas elastis

dari material komponen struktur tersebut. Analisis tingkat kinerja dilakukan dengan mengasumsikan besar beban lateral khususnya beban gempa rencana yang terlewat. Penentuan level kinerja pada kajian ini dilakukan dengan metode ATC-40 dan FEMA 440 yang mana sendi plastis dari balok dan kolom yang terjadi diamati sampai mencapai target kapasitas atau target perpindahan yang ditentukan (Chopra and Goel, 2002).

Metode spektrum kapasitas berdasarkan ATC-40 (*Applied Technology Council – 40*) merupakan analisis kinerja struktur berdasarkan spektrum kapasitas dari perpindahan actual struktur. Dalam metode ini kinerja dinyatakan dengan *performance point* yang ditentukan dari drift maksimum berdasarkan Persamaan 1 dan *drift inelastic* maksimum berdasarkan Persamaan 2.

$$D = \frac{D_t}{H} \quad (1)$$

$$MID = \frac{D_t - D_1}{H} \quad (2)$$

Drift maksimum (D) ditentukan dari rasio simpangan maksimum (D_t) dengan tinggi bangunan, sedangkan drift inelastic maksimum (MID) merupakan rasio antara selisih simpangan maksimum (D_t) dan simpangan pada periode 1 detik (D_1) dengan tinggi bangunan. Terdapat empat kategori *performance point* dari ATC-40 yang dihitung dari nilai drift maksimum dan drift inelastic maksimum yang dapat dilihat pada Tabel 1. Kategori *performance point* antara lain *Immediate Occupancy* (IO), *Damage Control* (DC), *Live Safety* (LS), dan *Structural Stability* (SB). Penentuan *performance point* yaitu spektrum demand dengan damping 5% sesuai kondisi tanah dan wilayah gempa diplot pada spektrum kapasitas, sehingga didapatkan *performance point* nya.

Metode FEMA 440 (*Federal Emergency Management Agency – 440*) merupakan penyempurnaan dari metode FEMA 356 yang berdasarkan koefisien perpindahan (*displacement coefficient method / DCM*) yang dilakukan modifikasi dalam

menghitung factor C_1 dan C_2 seperti pada Persamaan 3 dan Persamaan 4.

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (3)$$

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (4)$$

Nilai konstanta a diambil sebesar 130, 90, dan 60 untuk kelas situs B, C, dan D. Jika waktu getar alami $< 0,2$ detik, maka nilai $C_1 = C_2 = 0,2$, tetapi jika waktu getar alami > 1 detik, maka nilai $C_1 = 1,0$ dan $C_2 = 1,0$ jika waktu getar alami $> 0,7$ detik. Target perpindahan (δ) dalam menentukan level kinerja ditentukan berdasarkan Persamaan 5.

$$\delta = C_0 C_1 C_2 C_m S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (5)$$

Koefisien – koefisien perpindahan tersebut antara lain koefisien faktor bentuk (C_0), koefisien modifikasi elastis-inelastis (C_1), koefisien efek *pinching* (C_2), koefisien pembesaran efek P-delta (C_m), respon spektrum akselerasi (S_a), waktu getar alami (T_e), percepatan gravitasi (g), dan rasio kuat elastis perlu terhadap koefisien kulus leleh terhitung (R). Untuk kategori level kinerja FEMA antara lain level *operational* (O), level *immediate occupancy* (IO), level *life safety* (LS), dan level *collapse prevention* (CP) serta besar perpindahan untuk *displacement control* adalah sebesar 2% dari ketinggian struktur bangunan yang jika terlampaui maka terjadi keruntuhan atau *Collapse* (C). Kategori tersebut lebih jelas dapat diperhatikan pada Tabel 2. Tingkat kerusakan yang diprediksikan yaitu ringan, sedang dan berat yaitu pada level kinerja IO, LS, dan CP yang digolongkan juga masing-masing menjadi tipe kerusakan *primary* dan *secondary*.

Sendi plastis (*plastic hinge*) menjadi indikator dalam mengidentifikasi kinerja dari komponen struktur. Sendi plastis akan terbentuk jika kapasitas kolom atau balok terlewat. Idealnya sendi plastis terbentuk pertama pada balok kemudian pada kolom, hal ini agar sesuai dengan konsep Kolom Kuat–Balok Lemah. Definisi sendi plastis untuk balok dan kolom mengikuti ketentuan literatur pada program analisis struktur.

Tabel 1. Kategori *performance point* berdasarkan ATC-40

<i>Parameter</i>	<i>Performance Level</i>			
	IO	DC	LS	SB
Maksimum Total <i>Drift</i>	0,01	0,01 s.d 0,002	0,02	0,33 Vi/Pi
Maksimum Total Inelastic <i>Drift</i>	0,005	0,005 s.d 0,015	<i>No Limit</i>	<i>No Limit</i>

Sumber: ATC-40

Tabel 2. Kategori level kinerja berdasarkan FEMA

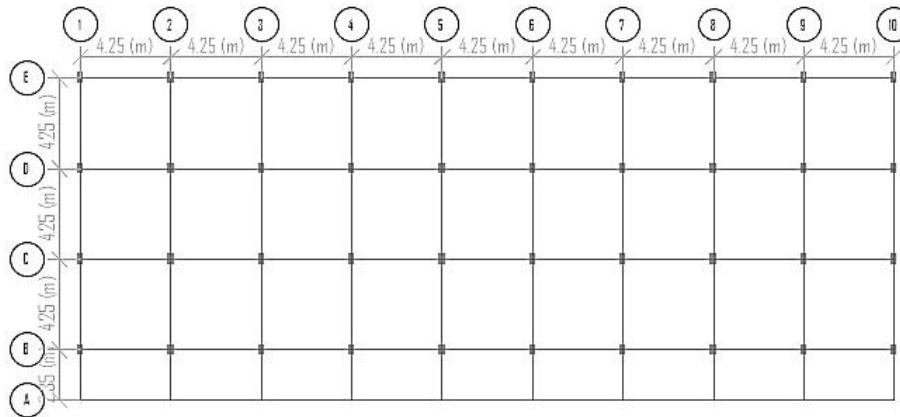
Type	Target Level Kinerja		
	<i>Immediate Occupancy (IO)</i>	<i>Life Safety (LS)</i>	<i>Collapse Prevention (CP)</i>
	Ringan	Sedang	Parah
<i>Primary</i>	Retak halus pada beberapa lokasi. Tidak ada keruntuhan yang terjadi.	Kerusakan parah pada balok dan pengelupasan selimut beton dan retak geser pada kolom daktail. Pengelupasan beton pada kolom nondaktail.	Banyak retakan dan sendi plastis pada elemen struktur yang daktail. Retakan pada beberapa kolom non daktail. Kerusakan parah pada kolom pendek.
<i>Secondary</i>	Pengelupasan selimut beton pada beberapa balok dan kolom daktail. Retak lentur pada balok dan kolom.	Banyak retakan dan sendi plastis pada elemen yang daktail. Retakan pada beberapa kolom nondaktail. Kerusakan parah.	Pengelupasan beton pada kolom dan balok yang berlebihan. Kerusakan parah pada joint dan beberapa tulangan bengkok.
<i>Drift</i>	1% sementara	2% sementara 1% permanen	4% sementara permanen

Sumber: FEMA 356

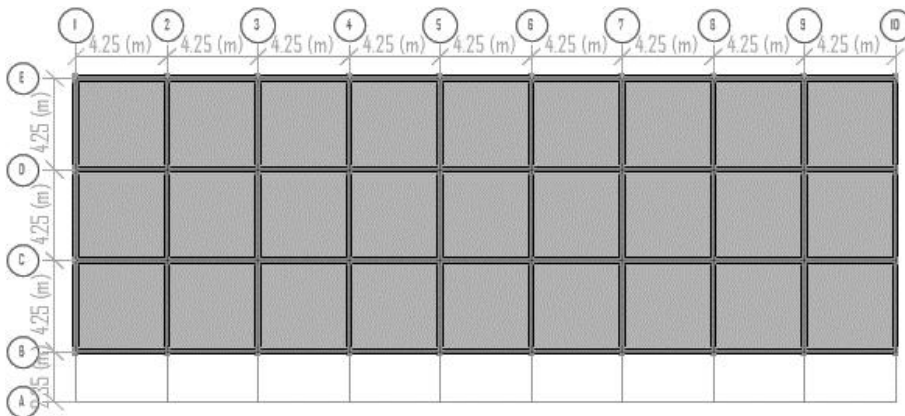
Pemodelan Struktur

Pada kajian ini dimodelkan struktur empat tingkat yang berfungsi sebagai rumah susun dengan panjang 38,25 m, lebar 12,75 m, dan tinggi 14,4 m (dihitung dari perletakan sampai balok ring). Tinggi antar tingkat divariasikan yaitu tingkat pertama 3,4 m, tingkat 2 sampai tingkat 4 masing-masing 3,2 m. Bangunan memiliki dua bagian atap yaitu atap datar pelat beton dan atap limas dengan rangka baja ringan. Dalam pemodelan rangka atap tidak dimodelkan dan hanya di input sebagai beban pada ring balok. Perletakan struktur diasumsikan terjepit pada level sloof, sehingga kolom pedestal dan sloof tidak dimodelkan. Masing-masing lantai di input beban hidup sesuai dengan fungsinya yaitu koridor, kamar tidur, lobby, dan tangga sesuai dengan peraturan pembebanan SNI 1727 2020 (BSN, 2020). Sedangkan beban mati mengacu pada material yang digunakan

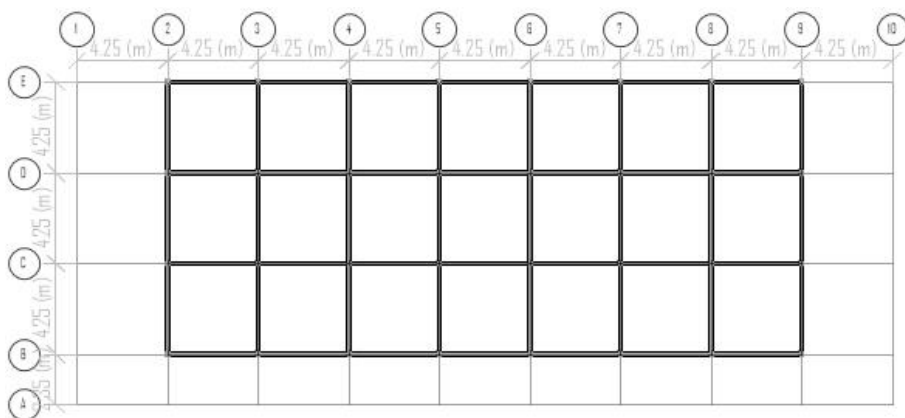
seperti dinding partisi, penutup lantai, plafond, dan penutup atap. Denah dan portal gedung masing-masing ditampilkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 4. Struktur gedung ini menggunakan material beton bertulang dengan mutu seperti pada Tabel 3 yang didesain mengikuti persyaratan SNI 2847 2019 (BSN, 2019b). Untuk kriteria beban lateral, bangunan ini berlokasi di Malang, Jawa Timur, sehingga data respon spektra gempa mengacu pada daerah Malang dengan kelas situs D (Desain Spektra Indonesia, 2021). Teknik pemodelan beban gempa dengan metode respon spektrum mengikuti teknik dari studi literatur (Maharani et al., 2020; Gunawan et al., 2021). Setelah dilakukan desain dan memenuhi kriteria perencanaan berdasarkan peraturan dengan dimensi elemen struktur yang memenuhi persyaratan tersebut seperti pada Tabel 4.



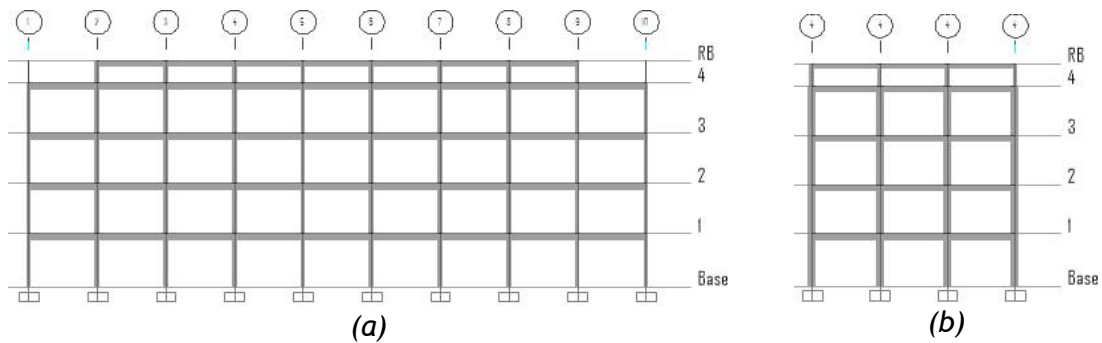
Gambar 1. Denah kolom



Gambar 2. Denah balok lantai



Gambar 3. Denah ring balok



Gambar 4. Portal: arah sumbu X (a), dan arah sumbu Y (b)

Model struktur (Gambar 5) dengan dimensi hasil desain adalah struktur eksisting yang tidak direncanakan berbasis kinerja, sehingga pada kajian ini dilakukan analisis kinerja dengan metode analisis *static pushover nonlinear* mengacu pada metode ATC-40 dan FEMA 440. Data analisis *static pushover nonlinear* tersebut berupa distribusi sendi plastis pada setiap perpindahan akibat gaya geser dasar. Sendi plastis menunjukkan kapasitas dari elemen struktur yang daktail pada kondisi elastis (Pokhrel and Bandelt, 2019). Semakin jauh perpindahan yang terjadi, sendi plastis akan berubah atau mengalami peningkatan sesuai dengan batas kapasitas kolom atau balok. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan pendekatan ATC-40 dan FEMA 440, yang mana perbandingannya menjadi evaluasi dari struktur yang sudah didesain. Seluruh pemodelan dan analisis menggunakan aplikasi analisis struktur yaitu SAP2000.

Tabel 3. Mutu material struktur

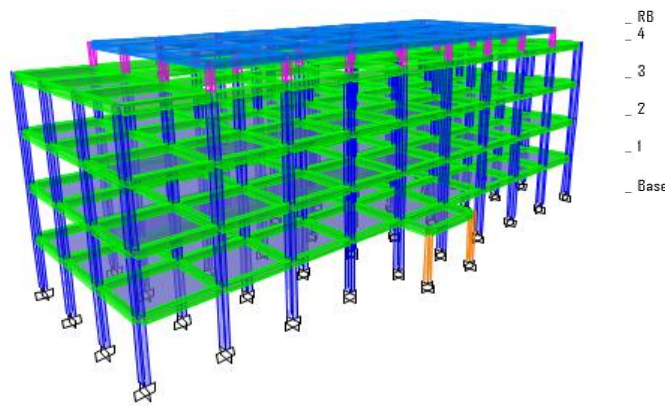
Parameter	Nilai
Beton	
Kuat tekan, f'_c	25 MPa
Modulus Elastisitas, E_c	2350 MPa
Poisson ratio, ν	0,2

Baja Tulangan	
Kuat leleh, f_y	240 MPa (< D10) 390 MPa (> D10)
Kuat tarik putus, f_u	370 MPa (< D10) 500 MPa (> D10)
Modulus Elastisitas, E_s	200000 MPa
Poisson ratio, ν	0,1

Tabel 4. Dimensi elemen struktur

Elemen Struktur	Kode	Dimensi (mm)
Kolom	K1	300 x 500
	K2	300 x 300
Balok	B1	250 x 450
	RB	200 x 350
Pelat	L1	130
	L2	120

Kolom utama K1 dari tingkat 1 sampai tingkat 4, sedangkan K2 yaitu kolom pada teras dan ring balok berupa kolom pendek. Pekat L1 adalah pelat lantai dan L2 adalah pelat pada lantai atap.



Gambar 5. Model 3D struktur

HASIL DAN PEMBAHASAN
Distribusi Sendi Plastis

Tabel 5 dan Tabel 6 menunjukkan hasil distribusi jumlah sendi plastis yang terjadi

untuk setiap masing-masing perpindahan akibat beban dorong arah X dan arah Y. Sedangkan Gambar 6 merupakan sendi plastis yang terjadi pada balok dan kolom.

Tabel 5. Distribusi sendi plastis akibat beban dorong arah X

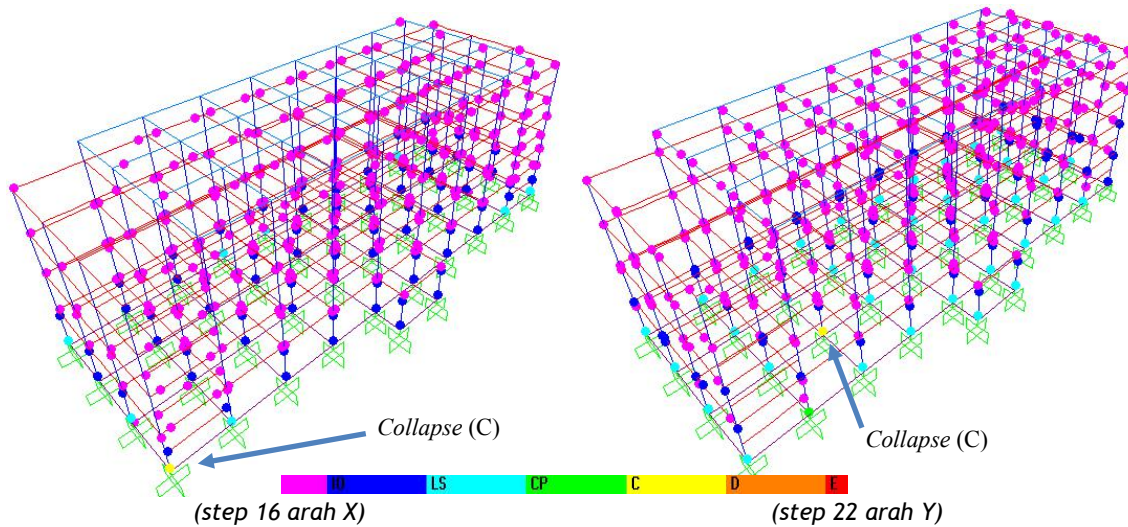
Step	Perpindahan (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	E	Total
0	-0,095	0,000	1180	0	0	0	0	0	0	0	1180
1	5,665	772,494	1180	0	0	0	0	0	0	0	1180
2	11,425	1.544,988	1180	0	0	0	0	0	0	0	1180
3	12,779	1.726,578	1178	2	0	0	0	0	0	0	1180
4	18,602	2.414,074	1107	73	0	0	0	0	0	0	1180
5	24,950	2.986,563	1062	118	0	0	0	0	0	0	1180
6	30,825	3.396,715	973	207	0	0	0	0	0	0	1180
7	37,104	3.684,780	955	225	0	0	0	0	0	0	1180
8	43,208	3.934,603	915	264	1	0	0	0	0	0	1180
9	49,362	4.132,991	884	291	5	0	0	0	0	0	1180
10	55,971	4.321,061	855	283	42	0	0	0	0	0	1180
11	61,958	4.481,687	833	303	44	0	0	0	0	0	1180
12	70,034	4.686,636	804	316	60	0	0	0	0	0	1180
13	76,607	4.841,728	790	313	77	0	0	0	0	0	1180
14	82,432	4.978,833	778	321	79	2	0	0	0	0	1180
15	90,274	5.149,570	765	332	79	4	0	0	0	0	1180
16	96,578	5.284,311	753	342	75	9	0	1	0	0	1180
17	103,016	5.414,541	733	361	49	33	0	4	0	0	1180
18	109,309	5.538,745	718	375	42	40	0	5	0	0	1180
19	115,764	5.655,714	700	393	39	40	0	8	0	0	1180
20	123,627	5.787,920	687	403	30	28	3	29	0	0	1180
21	131,359	5.910,306	679	408	23	23	6	41	0	0	1180
22	139,097	6.027,351	662	411	31	26	1	49	0	0	1180
23	140,818	6.052,696	658	412	32	26	1	51	0	0	1180

Tabel 6. Distribusi sendi plastis akibat beban dorong arah Y

Step	Perpindahan (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	E	Total
0	-1,177	0,000	1180	0	0	0	0	0	0	0	1180
1	4,583	1.025,253	1180	0	0	0	0	0	0	0	1180
2	9,189	1.845,113	1178	2	0	0	0	0	0	0	1180
3	15,213	2.759,181	1106	74	0	0	0	0	0	0	1180
4	21,398	3.493,103	1038	142	0	0	0	0	0	0	1180
5	27,289	4.071,056	994	186	0	0	0	0	0	0	1180
6	33,544	4.606,071	944	236	0	0	0	0	0	0	1180
7	39,559	4.923,688	902	278	0	0	0	0	0	0	1180
8	45,561	5.219,139	888	292	0	0	0	0	0	0	1180
9	53,649	5.601,948	875	305	0	0	0	0	0	0	1180
10	59,409	5.863,900	862	318	0	0	0	0	0	0	1180
11	65,995	6.160,641	842	315	23	0	0	0	0	0	1180
12	74,771	6.537,733	825	313	42	0	0	0	0	0	1180
13	81,195	6.789,868	806	332	42	0	0	0	0	0	1180
14	87,582	7.034,223	791	347	42	0	0	0	0	0	1180
15	93,648	7.247,638	786	352	42	0	0	0	0	0	1180
16	101,147	7.492,817	769	365	46	0	0	0	0	0	1180
17	107,909	7.694,225	746	386	48	0	0	0	0	0	1180
18	115,124	7.893,445	734	382	64	0	0	0	0	0	1180
19	126,062	8.224,373	731	379	48	22	0	0	0	0	1180
20	131,826	8.402,236	723	380	43	34	0	0	0	0	1180
21	139,561	8.630,456	722	369	49	40	0	0	0	0	1180
22	145,982	8.833,136	720	359	60	39	1	1	0	0	1180
23	153,013	9.018,948	716	359	63	33	0	9	0	0	1180
24	159,867	9.181,928	714	357	64	10	7	28	0	0	1180
25	166,372	9.326,410	713	344	77	7	4	35	0	0	1180
26	172,681	9.449,553	712	344	78	5	3	38	0	0	1180

Berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5, distribusi sendi plastis yang terjadi pada kolom mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya gaya geser dasar dan perpindahan yang terjadi. Nilai yang ditunjukkan pada kolom kriteria tersebut menunjukkan jumlah sendi plastis pada kolom atau balok terjadi. Pada step 3 baik arah X maupun arah Y, sudah terdapat elemen struktur yang melewati kapasitas elastis dan masuk pada kinerja IO. Pada level ini sudah terdapat struktur yang mengalami kerusakan ringan. Kemudian pada step 8 arah X dan step 11 arah Y, sudah

terdapat elemen struktur yang mencapai kinerja LS dengan kerusakan sedang. Pada step 14 dan step 19 masing-masing arah X dan Y, terdapat elemen struktur yang sudah masuk pada level CP yang mana terdapat kerusakan berat pada elemen struktur tersebut. Sedangkan pada step 16 arah X dan step 22 arah Y, sudah terdapat kolom yang *Collapse (C)* (Gambar 6) yang mana batas kapasitas inelastisnya telah terlampaui. Dengan kata lain kolom tersebut mengalami keruntuhan. Hasil ini tentu perlu dikomparasi dengan ketentuan dari ATC-40 maupun FEMA 440.

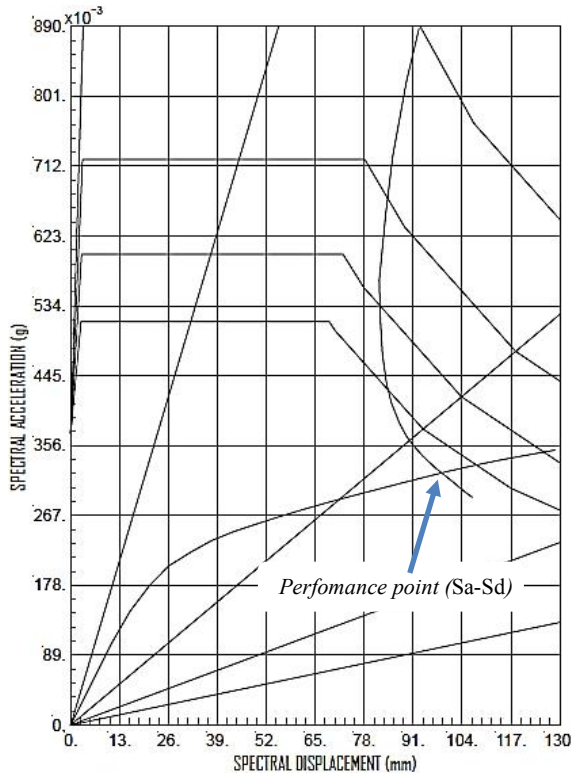


Gambar 6. Sendi plastis pada kolom dan balok struktur

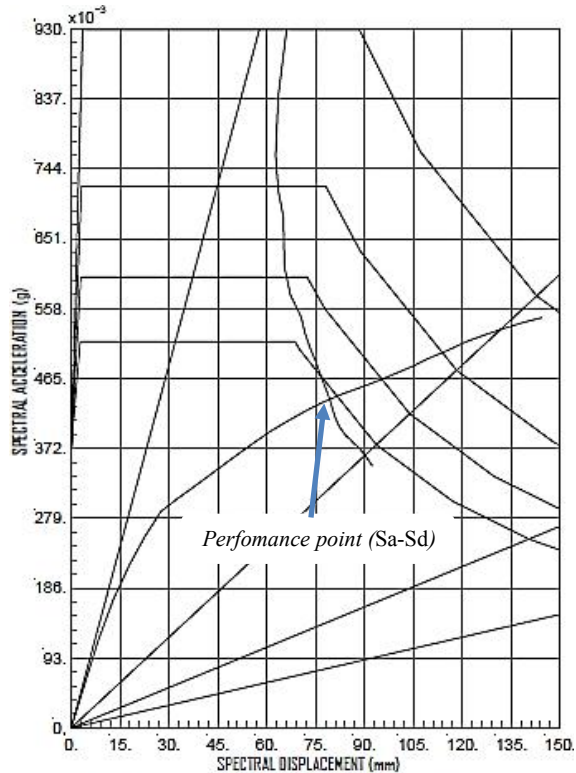
Performance Point berdasarkan spektrum kapasitas (ATC-40)

Pendekatan dengan spektrum kapasitas dalam menentukan performance point diawali dengan menentukan nilai koefisien C_a dan C_v dari data gempa pada daerah Malang. Nilai tersebut dapat diperoleh dari data desain spektra Indonesia melalui laman <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>, dan pilih titik pada peta dimana lokasi bangunan

tersebut yaitu kota Malang atau dapat juga dengan menginput koordinatnya. Berdasarkan data peta gempa, nilai C_a dan C_v untuk masing-masing adalah 0,3716 g dan 0,575 g. Nilai ini kemudian diinput pada parameter ATC-40 untuk menentukan spektrum kapasitasnya. Plot kurva *pushover* dengan *spectrum demand* dengan *damping* 5% untuk masing-masing arah X dan Arah Y disajikan pada Gambar 7.



Results
Performance Point (V, D) = (5514.762 , 108.094)
Performance Point (Sa, Sd) = (0.321 , 98.601)
Performance Point (Teff, Beff) = (1.112 , 0.230)
Arah X



Results
Performance Point (V, D) = (7344.941 , 96.624)
Performance Point (Sa, Sd) = (0.437 , 79.252)
Performance Point (Teff, Beff) = (0.854 , 0.205)
Arah Y

Gambar 7. Plot kurva pushover pada spektrum percepatan ATC-40

Berdasarkan kurva pada gambar 7 diperoleh *performance point* data yaitu gaya geser dasar (V) sebesar 5514,762 kN (arah X) dan 7344,941 kN (arah Y), sedangkan displacement maksimum arah X dan Y masing-masing 108,094 mm dan 96,624 mm. Untuk simpangan maksimum pada periode pertama sesuai dengan Tabel 4 dan Tabel 5 diperoleh 5,665 mm arah X dan 4,583 mm arah Y. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan drift maksimum dan drift inelastik maksimum sesuai dengan Persamaan 1 dan Persamaan 2, dan tinggi struktur adalah 14,4 m. Hasil perhitungan dan *performance level* berdasarkan kriteria ATC-40 disajikan dalam Tabel 6. Hasil kinerja yang didapatkan berdasarkan kriteria

ATC-40 adalah IO (*Immediate Occupancy*). Namun nilai perpindahan arah X jika dilihat pada Tabel 5 dimana titik *performance point*-nya didapatkan sendi plastis dengan status C (*Collapse*) (step 17-18), sedangkan untuk arah Y telah sesuai yaitu sampai IO (step 15-16). Hal ini menunjukkan struktur tidak memenuhi kriteria ATC-40, karena terdapat elemen struktur yang mengalami *collapse* atau runtuh pada perpindahan *performance point* IO. Sehingga *performance point* struktur masuk pada kinerja C atau *Collapse*. Hal ini menjadi evaluasi elemen struktur tersebut untuk diperbaiki atau diperkuat sehingga memenuhi kriteria ATC-40.

Tabel 7. *Performance point* struktur berdasarkan ATC-40

Parameter	Nilai drift	Performance Criteria				Performance Point	
		IO	DC	LS	SB		
Maksimum Total Drift	Arah X	0,00751	0,01	0,01 s.d 0,02	0,02	0,33 Vi/Pi	IO
	Arah Y	0,00671					
Maksimum Total	Arah X	0,00711	0,005	0,005 s.d 0,015	No Limit	No Limit	DC

Inelastic Drift Arah Y 0,00639

Level Kinerja berdasarkan koefisien perpindahan modifikasi (FEMA 440)

Penentuan level kinerja struktur berdasarkan modifikasi koefisien perpindahan dari FEMA 440 diawali dengan menentukan nilai S_S dan S_I berdasarkan data dari peta gempa yang dapat diambil dari peta gempa desain spektra Indonesia. Dari data tersebut didapatkan nilai S_S dan S_I masing-masing sebesar 0,782 g dan 0,330 g. Selanjutnya nilai target displacement dihitung berdasarkan Persamaan 5, dan modifikasi koefisien perpindahan C_1 dan C_3 berdasarkan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Target displacement arah X dan Y masing-masing diperoleh sebesar 122 mm dan 117 mm (Gambar 8). Target displacement kemudian dikontrol dengan kriteria Tabel 2, dimana tinggi struktur $H=14,4$ m dan batas

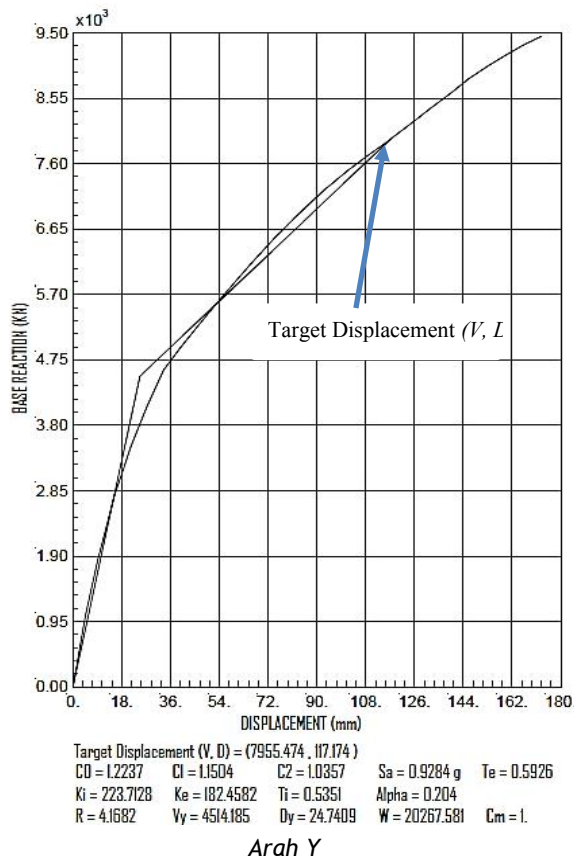
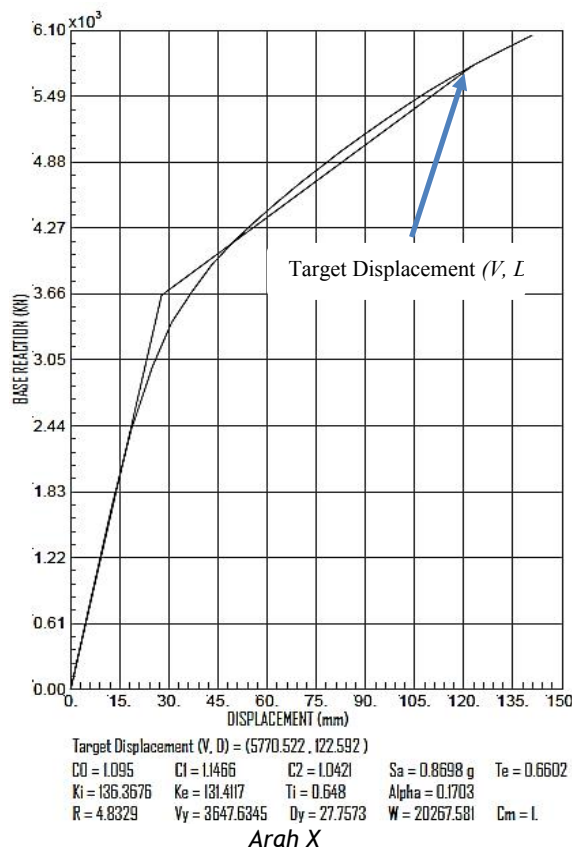
level kinerja struktur berdasarkan FEMA 440 yaitu sebagai berikut:

IO: $1\% \times H = 0,01 \times 14400 \text{ mm} = 144 \text{ mm}$

LS: $2\% \times H = 0,02 \times 14400 \text{ mm} = 288 \text{ mm}$

CP: $4\% \times H = 0,04 \times 14400 \text{ mm} = 576 \text{ mm}$

Berdasarkan ketentuan tersebut, nilai target displacement X dan Y < 144 mm dan level kinerja struktur adalah IO. Namun, dilihat pada Tabel 5, displacement target arah X berada pada step 19-20 yang mana terdapat sendi plastis dengan status C (*Collapse*). Sedangkan untuk arah Y, displacement target berada pada step 18 yang mana telah sesuai yaitu sendi plastis dengan status IO. Hal ini menjadi evaluasi untuk elemen struktur yang mengalami *collapse* untuk diperbaiki atau diperkuat sehingga kinerjanya sesuai dengan ketentuan dari FEMA 440.



Gambar 8. Plot kurva pushover pada Target Perpindahan Modifikasi FEMA 440

SIMPULAN

Struktur yang didesain berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019 menunjukkan kinerja yang IO

atau *Immediate Occupancy* yang dianalisis menggunakan metode spektrum kapasitas dari ATC-40 maupun modifikasi koefisien target perpindahan dari FEMA 440. Namun

pada arah X, terdapat status sendi plastis elemen struktur yang mengalami C atau *Collapse*, yang mana desain struktur menunjukkan masih lemah pada arah sumbu X. Hal ini menunjukkan struktur perlu dievaluasi pada arah sumbu X dengan melakukan perbaikan atau perkuatan pada elemen-elemen struktur yang mengalami keruntuhan (*Collapse*) sehingga memenuhi persyaratan dari ATC-40 maupun FEMA 440.

Desain struktur berbasis kinerja sangat baik diterapkan pada proses perencanaan untuk dapat segera mengetahui level kinerja struktur. Hal ini akan membantu mengetahui kinerja struktur jika beban rencana suatu saat akan terlampaui. Selain itu, percepatan batuan dasar akibat pembaruan peta gempa sering mengalami peningkatan dan beban gempa rencana juga mengalami peningkatan. Sehingga ketika dilakukan evaluasi terhadap desain struktur bangunan yang telah berdiri, struktur masih dapat memenuhi persyaratan desain dan kinerjanya.

DAFTAR PUSTAKA

Applied Technology Council. 1996. *ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit Of Concrete Building*. 1st Ed. Redwood, California: Twin Dolphin Drive.

Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1726:2019 Tata Cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. , (2019).

Badan Standardisasi Nasional. *SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. , (2019).

Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. , (2020).

Chopra, A.K., Goel, R.K. 2002. A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, .

Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan. 2021. *Desain Spektra Indonesia*. [cited Available from: URL: <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>

Federal Emergency Management Agency. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. In *Federal Emergency Management Agency, Washington DC*.

Gunawan, I.P.A.S., Giatmajaya, I.W., Wiryadi, I.G.G. 2021. Analisis Dan Pemodelan Struktur Gedung Rumah Sakit Pada Wilayah Gempa Tinggi. *Jurnal Ilmiah Teknik Unmas*, 1(1): 7–13.

Maharani, I.D.A.R., Wibawa, I.M.S., Wiryadi, I.G.G. 2020. Perancangan Struktur Gedung Rumah Sakit Dengan Sistem Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Khusus. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10(2): 11–19.

Pokhrel, M., Bandelt, M.J. 2019. Plastic Hinge Behavior and Rotation Capacity in Reinforced Ductile Concrete Flexural Members. *Engineering Structures*, 200: 109699.

Tubuh, I.K.D.K., Wiryadi, I.G.G., Wirawan, I.P.A.P. 2021. Pengaruh Penentuan Kelas Situs Terhadap Perilaku Struktur Dalam Menahan Beban Gempa. *Civil Engineering and Material Technology Seminar 2: Membangun Infrastruktur Yang Kokoh, Ramah Lingkungan Dan Tanggap Bencana*. Denpasar.

Wibawa, I.M.S., Tubuh, I.K.D.K., Prawira, P.P.L.A. 2021. Analisis Kinerja Struktur Gedung Dengan Analisis Pushover Pada Proyek Gedung Rektorat Universitas Mahasaraswati Denpasar. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10(2): 53–61.

Wiryadi, I.G.G., Giatmajaya, I.W., Wirawan, I.P.A.P., Trangipani, N.M. 2021. Analisis Riwayat Waktu Perilaku Struktur Gedung SMA Negeri 9 Denpasar. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10(2): 43–52.

Wiryadi, I.G.G., Wirawan, I.P.A.P., Tubuh, I.K.D.K., Candra, I.M.A. 2022. Level Kinerja Struktur Gedung Fakultas Pariwisata Universitas Udayana Berdasarkan FEMA 356 Dan ATC-40. *Jurnal Teknik Gradien*, 14(01): 25–34.