

ANALISIS KINERJA SEISMIK STRUKTUR BETON BERTULANG (STUDI KASUS: TOWER “A” GEDUNG CIPUTRA SCHOOL OF BUSINESS MAKASSAR)

Willy Sucipto (Universitas Atma Jaya Makassar, Makassar, sucipto_willy@yahoo.co.id)
Jonie Tanijaya (Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar, jonie.tanijaya@gmail.com)
Hendry T Kalangi (Universitas Atma Jaya Makassar, Makassar, hkalangi73@gmail.com)

Received: 30 Maret 2023, Revised: 12 April 2023, Accepted: 12 April 2023

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki tingkatan kinerja pada struktur beton bertulang dari proyek Tower A Gedung Ciputra *School of Business* Makassar . Analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan analisis pushover, metode spektrum kapasitas menurut ATC-40 dan metode koefisien perpindahan menurut FEMA 440. Analisis pushover dilakukan dengan bantuan program ETABS v18.1.1. Nilai perpindahan pada titik kinerja struktur berdasarkan metode spektrum kapasitas adalah sebesar 0,2022m untuk arah x dan 0,1965m untuk arah y. Nilai perpindahan pada titik kinerja struktur berdasarkan metode koefisien perpindahan sebesar 0,3317m untuk arah x dan 0,3297m untuk arah y. Tingkat kinerja struktur didasarkan pada nilai perpindahan pada saat struktur mencapai titik kinerja atau *performance point*. Hasil perhitungan tingkat kinerja struktur menurut ATC-40, struktur termasuk pada tingkat damage control sedangkan menurut FEMA 440, struktur termasuk pada tingkat life safety. Berdasarkan tingkat kinerja tersebut, pada saat gempa, terjadi kerusakan yang signifikan pada komponen-komponen struktur utama akan tetapi belum mengalami keruntuhan namun diperlukan sedikit perbaikan.

Kata kunci: kinerja seismik, analisis *pushover*, metode spektrum kapasitas, metode koefisien perpindahan

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the level of performance on the reinforced concrete structure of Tower A of Makassar School of Business Ciputra Building. Analysis which performed in this research is pushover analysis, capacity spectrum method based on ATC-40 and displacement coefficient according to FEMA 440. Pushover analysis was done using ETABS v.18.1.1. Based on capacity spectrum method, the displacement value at performance point is 0.2022m for x-direction and 0.1965 for y-direction while for displacement coefficient, the displacement value at performance point is 0.3317m and 0.3297m for y-direction. Structural performance level is categorized based on the displacement value at the performance point. For ATC-40, structural performance level is categorized as damage control and according to FEMA 440, the structural performance level is categorized as life safety. Based on this level of performance, when the earthquake occurs, there was significant damage to the main structural components but there was no collapse but a little repair was needed.

Keywords: seismic performance, pushover analysis, capacity spectrum method, displacement coefficient method

PENDAHULUAN

Bangunan-bangunan tinggi sangat berisiko untuk mengalami kerusakan akibat gempa bumi oleh karena itu perlu dilakukan peninjauan analisis gempa yang lebih mendalam. Analisis berdasarkan kinerja strukturnya bertujuan untuk menyelidiki kondisi bangunan pasca gempa. Analisis kinerja seismik menghasilkan output berupa tingkatan kinerja struktur yang dapat mendeskripsikan kondisi bangunan pasca gempa sehingga dapat dijadikan acuan untuk meminimalisir kerusakan yang dapat menyebabkan kerugian akibat gempa bumi. Berdasarkan data perhitungan perencanaan awal untuk struktur Tower “A” Gedung *Ciputra School of Business* Makassar tidak dihitung berdasarkan kinerja strukturnya, sehingga penulis tertarik untuk melakukan analisis tersebut. (Sumber: Data perencanaan proyek CSOB Makassar).

Menurut penelitian Abdul Fatah Arjakoni dan Muhamad Lutfi (2020) pada jurnal “Evaluasi Kinerja Seismik Pada Struktur Gedung Rumah Sakit Pendidikan Universitas Indonesia Dengan Metode Analisis Pushover

Berdasarkan ATC 40” mendapatkan hasil perhitungan rasio *drift* atap menurut ATC-40 yang menunjukkan bahwa gedung yang ditinjau termasuk dalam level kinerja *immediate occupancy* (IO), berarti bila terjadi gempa gedung tidak mengalami kerusakan struktural dan nonstruktural sehingga bangunan tersebut tetap aman digunakan.

Menurut penelitian Hizkia Yehezkiel Mamesah, Steenie E. Wallah dan Reky Stenly Windah (2014) pada jurnal “Analisis Pushover Pada Bangunan *Soft First Story*” mendapatkan hasil perhitungan level kinerja struktur berdasarkan target perpindahan dari metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 menunjukkan bahwa pada ketiga model bangunan tersebut berada pada level damage control di mana kondisi gedung belum mengalami kerusakan berarti dan dapat difungsikan kembali. Level kinerja struktur berdasarkan target perpindahan dari metode Spektrum Kapasitas ATC-40 menunjukkan bahwa ketiga model bangunan tersebut berada pada level *immediate occupancy* di mana kondisi gedung hampir sama dengan kondisi sebelum gempa dan dapat digunakan kembali.

Menurut penelitian Nur Rachmad Afandi (2010) pada jurnal “Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP2000” mendapatkan hasil bahwa struktur bangunan mampu memberikan perilaku nonlinear yang ditunjukkan fase awal dan mayoritas terjadinya sendi-sendi plastis terjadi pada elemen balok baru kemudian elemen kolom. Level kinerja struktur masuk kriteria *immediate occupancy* yang berarti terjadi kerusakan kecil pada struktural dan bangunan dapat segera digunakan kembali.

Kinerja struktur adalah tingkatan performa suatu struktur terhadap gempa rencana yang dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan pada struktur saat menerima gempa rencana pada periode ulang tertentu. Salah satu prosedur yang dapat digunakan untuk menentukan tingkat kinerja struktur adalah prosedur yang terdapat dalam *Applied Technology Council* atau ATC-40, yaitu metode spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) yang digunakan untuk mendapatkan titik kinerja atau *performance point*. Berdasarkan titik kinerja, diperoleh nilai simpangan maksimum atau perpindahan (*displacement*). Metode pendekatan untuk mendapatkan nilai *displacement* adalah metode koefisien perpindahan yang terdapat dalam Federal Emergency Management Agency atau FEMA 440. Nilai perpindahan yang didapatkan kemudian akan dikontrol tingkat kinerjanya menurut simpangan batas.

METODOLOGI PENELITIAN

Data Penelitian

Bangunan yang ditinjau berukuran lebar 42,725 m dan panjang 22,5 meter, dengan tinggi total bangunan yaitu 30,5m. Data perencanaan gedung dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi gedung

Spesifikasi Tinggi Gedung	
Tinggi keseluruhan	37,7 m
Tinggi lantai dasar	4 m (Lantai 2,3,4,5 dan 6)
Tinggi lantai tipikal	5,5 m (Lantai 7)
	4 m (Lantai 8)

Dimensi balok dan kolom yang digunakan pada perencanaan Gedung (Tabel 2).

Tabel 2. Dimensi balok dan kolom perencanaan gedung

No	Dimensi balok	
	Panjang (mm)	Lebar (mm)
1	200	400
2	200	500
3	200	600
4	200	700
5	300	500
6	300	600
7	300	700
8	300	800

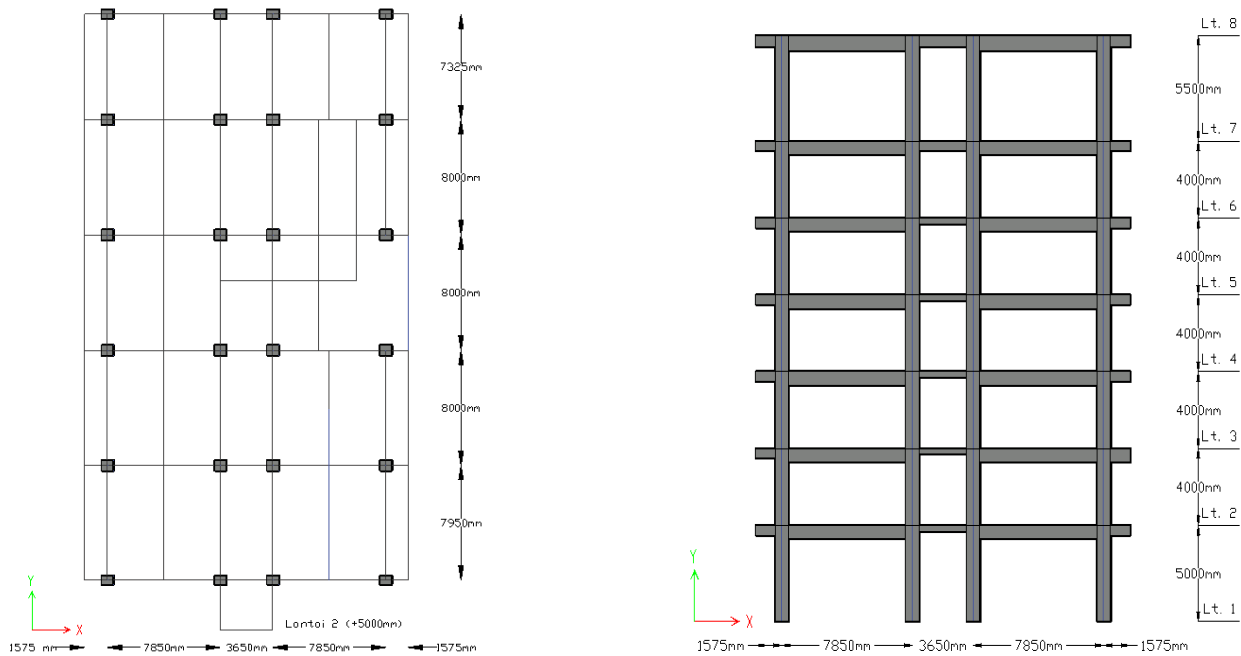
9	400	700
10	400	800

No	Dimensi kolom	
	Panjang (mm)	Lebar (mm)
1	600	800
2	700	800
3	700	800

Tebal pelat lantai yang digunakan adalah 12cm. Pelat dimodelkan sebagai elemen *shell* dengan *rigid diaphragm*. Tipe pelat lantai yang digunakan *shell*, yaitu karena pelat diasumsikan selain menerima gaya vertikal akibat beban mati dan hidup tetapi juga dapat menerima gaya horizontal/lateral akibat beban gempa. Penggunaan elemen *shell* juga agar dimensi balok di sekitar pelat dapat menjadi lebih kecil di bandingkan jika menggunakan elemen *membran*. Pelat dimodelkan sebagai *rigid diaphragm* agar pada saat terjadi gempa bumi, tidak terjadi rotasi pada pelat lantai yang direncanakan.

Pemodelan gedung dan mutu yang digunakan

Gedung menggunakan struktur beton bertulang dengan kuat tekan beton (f_c') sebesar 35MPa untuk kolom, sedangkan untuk balok dan pelat lantai menggunakan kuat tekan beton sebesar 25MPa pada lantai 2 sampai lantai 7 serta pada lantai 1 dan lantai 8 menggunakan kuat tekan beton 30MPa. Denah lantai 2 tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah dan tampak potongan tingkat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis yang didapatkan, menggunakan program software ETABS v18.1.1 dan mengacu pada SNI 1726:2019 untuk beban gempa dan SNI 1727:2020 untuk beban desain minimum pada struktur yang direncanakan. Hasil analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Pembebanan

Beban yang bekerja pada struktur bangunan, yaitu beban mati yang diakibatkan oleh berat sendiri struktur, beban mati akibat beban tambahan yang bersifat permanen, beban hidup dan beban gempa.

Beban Mati Tambahan

Beban mati tambahan yang bekerja pada struktur terdiri dari dinding yang beratnya sebesar 125kg/m², penutup lantai yang beratnya sebesar 125kg/m² serta plafon dan instalasi MEP yang beratnya sebesar 25kg/m².

Beban Hidup

Gedung yang ditinjau yaitu berfungsi sebagai universitas atau sekolah, maka berdasarkan SNI 1727:2020 besarnya beban hidup yang bekerja pada bangunan yang ditinjau yaitu sebesar 200kg/m².

Beban Gempa

Bangunan yang ditinjau berfungsi sebagai kampus, maka bangunan tersebut masuk dalam kategori IV dan memiliki faktor keutamaan gempa, yaitu sebesar 1,5.

Nilai dari parameter percepatan gempa didapatkan dari aplikasi Peta Gempa dan Respons Spektra 2019 dengan nilai, S_s sebesar 0,2273g dan nilai S_1 sebesar 0,1083g. Jenis kelas situs tanah yang ditinjau adalah tanah lunak (SE), maka akan didapatkan nilai $F_a = 2,4$ dan $F_v = 4,1244$ (hasil interpolasi). Nilai parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}), yaitu sebesar:

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 2,4 \times 0,2273 = 0,5455g$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 4,1244 \times 0,1083 = 0,4471g$$

Nilai parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, S_{DS} dan periode 1 detik, S_{D1} , yaitu sebagai berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} = \frac{2}{3} \times 0,5455 = 0,3637g$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0,4471 = 0,2981g$$

Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan pada perencanaan struktur ini sesuai dengan yang disyaratkan SNI 1726:2019. Untuk nilai parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) diperoleh sebesar 0,3637g dan nilai faktor redundansi struktur (ρ) diperoleh sebesar 1,3 karena kategori desain seismik, struktur termasuk dalam kategori D.

Sistem Struktur

Sistem struktur yang digunakan, yaitu Sistem Ganda, yang merupakan gabungan antara Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Maka, nilai faktor R , C_d dan Ω_0 , yaitu:

Koefisien modifikasi respons, $R = 8$.

Faktor pembesaran defleksi, $C_d = 5,5$.

Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0 = 3$.

Analisis Pushover

Hasil dari analisis *pushover* adalah kurva kapasitas. Kurva kapasitas merupakan kurva yang menggambarkan hubungan antara besarnya perpindahan dan gaya geser dasar. Kurva kapasitas arah x dan arah y menunjukkan peningkatan nilai perpindahan (*displacement*) seiring dengan bertambahnya nilai gaya geser dasar (*base shear*) yang tersaji dalam Gambar 2. Kurva kapasitas hasil *pushover* pada arah x berakhir pada *step* ke-4 dengan mencapai titik maksimum saat gaya geser dasar sebesar 943,1648 ton dan perpindahan mencapai 0,3704m, sedangkan pada arah y terjadi perpindahan maksimum sebesar 0,2614m saat gaya geser dasar mencapai 860,7785 ton pada *step* ke-3. Nilai perpindahan dan gaya geser dasar pada masing-masing kurva kapasitas secara detail tersaji dalam Tabel 3 dan Tabel 4.

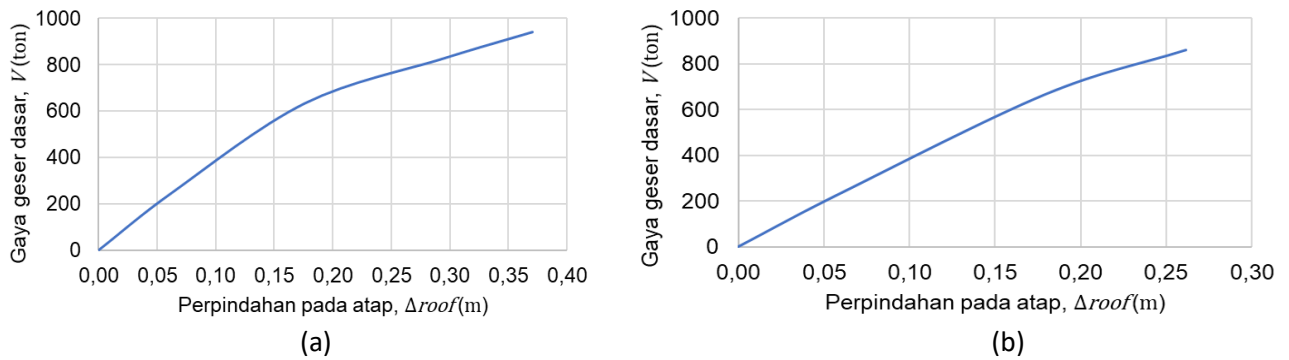
Tabel 3. Data kurva kapasitas arah-x

Step	Δ_{roof} (m)	V (ton)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	1638	2	0	0	0	1640	0	0	0	1640

1	0,0631	250,4851	1636	4	0	0	0	1640	0	0	0	1640
2	0,1759	634,7613	1350	290	0	0	0	1636	0	0	4	1640
3	0,2948	829,5970	1194	444	0	0	2	1606	20	0	14	1640
4	0,3704	943,1648	1184	454	0	0	2	1590	36	0	14	1640

Tabel 4. Data kurva kapasitas arah-y

Step	Δ_{roof} (m)	V (ton)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	1640	0	0	0	0	1640	0	0	0	1640
1	0,0608	239,0931	1638	2	0	0	0	1640	0	0	0	1640
2	0,1795	667,3396	1382	258	0	0	0	1634	0	0	6	1640
3	0,2614	860,7785	1236	404	0	0	2	1622	6	0	12	1640



Gambar 2. (a) Kurva kapasitas arah-x, (b) Kurva kapasitas arah-y

Analisis Kinerja Seismik

Analisis kinerja seismik dilakukan untuk menyelidiki tingkat kinerja struktur. Terdapat dua metode yang akan digunakan untuk melakukan analisis kinerja seismik adalah sebagai berikut:

Metode Spektrum Kapasitas Menurut ATC-40

Metode spektrum kapasitas merupakan metode yang digunakan untuk menemukan titik perpotongan antara kurva spektrum kapasitas dengan kurva *demand spectrum* yang disebut sebagai titik kinerja yang kemudian diperoleh nilai simpangan atau *drift*. Nilai amplitudo mode 1 (ϕ_{i1}) untuk arah x dan arah y dan nilai berat setiap tingkat (w_i) dapat dilihat pada Tabel 5. Tabel 6 merupakan faktor partisipasi modal pada mode pertama.

Tabel 5. Nilai mode 1 arah x dan y serta berat setiap tingkat

Lantai	ϕ_{i1} (m)		w_i (ton)
	Arah X	Arah Y	
8	0,0733	0,0602	495,4446
7	0,0661	0,0551	986,7317
6	0,0582	0,0499	836,7971
5	0,0477	0,0424	836,7971
4	0,0351	0,0325	845,7034
3	0,0213	0,021	876,9271
2	0,0085	0,009	839,0057
1	0	0	76,8
	Σ		5784,796

Tabel 6. Faktor partisipasi modal pada *mode* pertama untuk arah-x dan arah-y

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$w_i \cdot \phi_{i1}$	$w_i \cdot \phi_{i1}^2$	$w_i \cdot \phi_{i2}$	$w_i \cdot \phi_{i2}^2$
8	35,9986	2,6408	29,5476	1,7791
7	65,3157	4,3235	54,3876	2,9977
6	48,7342	2,8382	41,8306	2,091
5	39,9378	1,9061	35,5078	1,5067
4	29,723	1,0446	27,5496	0,8974
3	18,6636	0,3993	18,3182	0,3847
2	7,1651	0,0611	7,5577	0,068
1	0	0	0	0
Σ	245,5383	13,2138	214,6994	9,7249

Berdasarkan Tabel 8, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

Arah x:

$$\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g = \frac{245,5383}{9,8066} = 25,0380$$

$$\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g = \frac{13,2138}{9,8066} = 1,3474$$

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g} \right] = \left[\frac{25,0380}{1,3474} \right] = 18,58184$$

Arah y:

$$\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g = \frac{214,6994}{9,8066} = 21,8933$$

$$\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g = \frac{9,7249}{9,8066} = 0,9916$$

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g} \right] = \left[\frac{21,8933}{0,9916} \right] = 22,0771$$

Perhitungan modal koefisien massa pada *mode* pertama (α_1) dapat diuraikan sebagai berikut:

$$\sum_1^8 w_i / g = \frac{5784,7693}{9,8066} = 589,8853$$

Arah x:

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_1^8 w_i / g][\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g]} = \frac{626,9048}{589,8853 \cdot 1,3474} = 0,7887$$

Arah y:

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_1^8 w_i / g][\sum_1^8 (w_i \phi_{i1}^2) / g]} = \frac{479,3195}{589,8853 \cdot 0,9916} = 0,8193$$

Contoh perhitungan spektral percepatan (S_a) dan spektral perpindahan (S_d) pada *step* 1 dapat diuraikan sebagai berikut:

$$S_a = \frac{V/w}{\alpha_1} = \frac{250,4851/5784,7693}{0,7887} = 0,0463g$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} = \frac{0,0631}{18,5818 \cdot 0,0733 \cdot 1} = 0,0463m$$

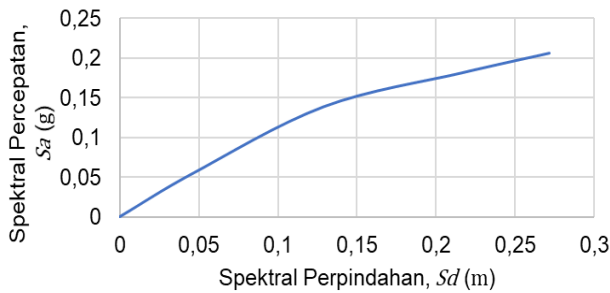
Hasil konversi kurva kapasitas format *ADRS* atau spektrum kapasitas arah x dan arah y dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8 dan kurva spektrum kapasitas arah x dan arah y dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 7. *ADRS format* untuk arah-x

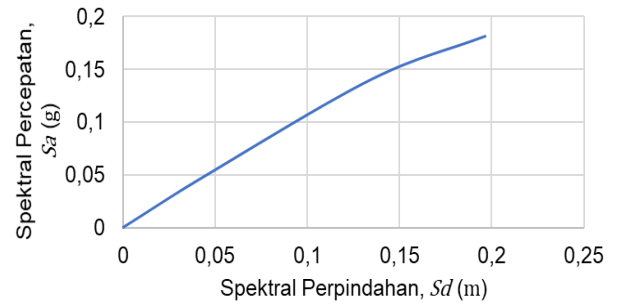
Step	S _d (m)	S _a (m)
0	0	0
1	0,0463	0,0549
2	0,129	0,1391
3	0,2162	0,1818
4	0,2716	0,2067

Tabel 8. *ADRS Format* untuk arah-y

Step	S _d (m)	S _a (m)
0	0	0
1	0,0457	0,0502
2	0,135	0,1407
3	0,1966	0,1816



(a)

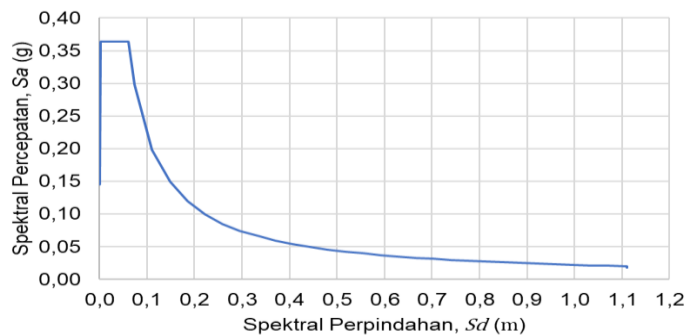


(b)

Gambar 3. *ADRS format* untuk (a) arah-x, (b) arah-y

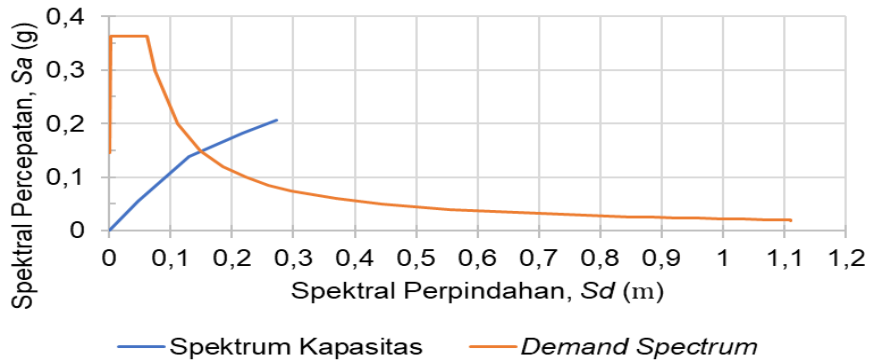
Hasil perhitungan kurva *demand spectrum* dapat dilihat pada Gambar 4. Contoh perhitungan nilai *S_d* pada saat nilai *T* sama dengan 0,1639 detik dan nilai *S_a* sama dengan 0,3637g adalah sebagai berikut:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \cdot g = \frac{0,1639^2}{4\pi^2} 0,3637 \cdot 9,8066 = 0,0024m$$

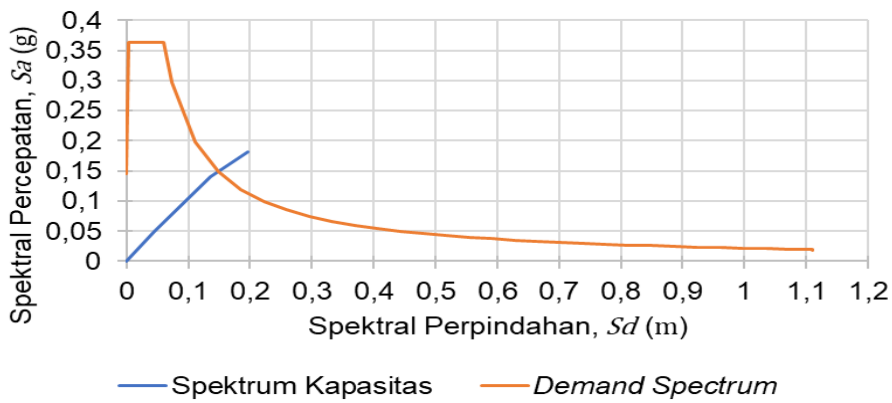


Gambar 4. Kurva *demand spectrum*

Kurva spektrum kapasitas dan kurva *demand spectrum* yang telah didapatkan pada langkah sebelumnya diplotkan dalam satu grafik. Hasil plot kurva spektrum kapasitas dengan kurva *demand spectrum* untuk arah x dan arah y dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Kurva kapasitas vs *demand spectrum* arah-x



Gambar 6. Kurva kapasitas vs *demand spectrum* arah-y

Hasil plot antara kurva spektrum kapasitas dengan kurva *demand spectrum* menghasilkan titik perpotongan yang merupakan titik kinerja. Hasil plot kurva spektrum kapasitas dengan kurva *demand spectrum* untuk arah x pada Gambar 5 dan Gambar 6 didapatkan titik perpotongan dimana nilai $S_d = 0,1485\text{m}$ dan $S_a = 0,1487\text{g}$ dan arah y didapatkan titik perpotongan dimana $S_d = 0,1479\text{m}$ dan $S_a = 0,1493\text{g}$. Perhitungan nilai simpangan pada saat didapatkan titik kinerja adalah sebagai berikut:

Arah x:

$$\Delta_{roof.pp} = S_d \times PF_1 \times \phi_{roof.1} = 0,1485 \times 18,5818 \times 0,0733 = 0,2022\text{m}$$

Arah y:

$$\Delta_{roof.pp} = S_d \times PF_1 \times \phi_{roof.1} = 0,1479 \times 22,0771 \times 0,0602 = 0,1965\text{m}$$

Metode koefisien perpindahan menurut FEMA 440

Nilai waktu getar efektif dan waktu sekan didapatkan dengan bantuan program ETABS v18.1.1. Pada arah x didapatkan nilai $T_e = 2,533$ detik dan nilai $T_s = 2,087$ detik dan pada arah y didapatkan nilai $T_e = 2,52$ detik dan nilai $T_s = 2,071$ detik. Nilai $C_0 = 1,4$ untuk arah x dan arah y karena struktur yang ditinjau termasuk tipe *other building* dengan jumlah tingkat lebih dari 5 tingkat dan kurang dari 10 tingkat. Nilai waktu getar diperoleh 2,135 detik yang nilainya lebih besar dari 1,0 sehingga nilai $C_1 = 1$ untuk arah x dan arah y. Nilai waktu getar diperoleh 2,135 detik yang lebih besar dari 0,7 sehingga nilai $C_2 = 1$ untuk arah x dan arah y. Kurva kapasitas hasil analisis *pushover* pada Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (meningkat) sehingga nilai $C_3 = 1$ untuk arah x dan arah y.

Target perpindahan (δ_t) dihitung menggunakan nilai $S_a = 0,1487\text{g}$ untuk arah x dan nilai $S_a = 0,1493\text{g}$ untuk arah y yang nilainya dapat dilihat pada langkah sebelumnya. Perhitungan target perpindahan dapat diuraikan sebagai berikut:

Arah x:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 1,4 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,1487 \times \frac{2,533^2}{4\pi^2} \times 9,8066 = 0,3317m$$

Arah y:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 1,4 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,1493 \times \frac{2,52^2}{4\pi^2} \times 9,8066 = 0,3297m$$

Tingkat kinerja struktur menurut ATC-40

Perhitungan simpangan maksimum total atau perpindahan diuraikan sebagai berikut:

Arah x:

$$\text{Maximum total drift} = \frac{\Delta_{roof.pp}}{H} = \frac{0,2024}{30,5} = 0,0066$$

Arah y:

$$\text{Maximum total drift} = \frac{\Delta_{roof.pp}}{H} = \frac{0,1965}{30,5} = 0,0064$$

Perhitungan simpangan inelastis maksimum diuraikan sebagai berikut:

Arah x:

$$\text{Maximum inelastic drift} = \frac{\Delta_{roof.pp} - \Delta_{roof.1}}{H} = \frac{0,2024 - 0,0631}{30,5} = 0,0046 = 0,46\%$$

Arah y:

$$\text{Maximum inelastic drift} = \frac{\Delta_{roof} - \Delta_{roof.1}}{H} = \frac{0,1965 - 0,0608}{30,5} = 0,0045 = 0,45\%$$

Hasil perhitungan tingkat kinerja struktur menurut ATC-40 berdasarkan nilai simpangan inelastik maksimumnya untuk arah x sebesar 0,0046 dan arah y sebesar 0,0045 termasuk dalam tingkat *immediate occupancy* sedangkan berdasarkan nilai simpangan maksimum totalnya untuk arah x sebesar 0,0066 dan arah y sebesar 0,0064 termasuk *damage control*.

Tingkat kinerja menurut FEMA 440

Perhitungan tingkat kinerja struktur menurut FEMA 440 diuraikan sebagai berikut:

Arah x:

$$\frac{\delta_t}{H} \times 100\% = \frac{0,3317}{30,5} \times 100\% = 1,0874\%$$

Arah y:

$$\frac{\delta_t}{H} \times 100\% = \frac{0,3297}{30,5} \times 100\% = 1,0810\%$$

Hasil perhitungan tingkat kinerja struktur menurut FEMA 440 untuk arah x sebesar 1,0874% dan untuk arah y 1,0810% sehingga struktur dikategorikan dalam tingkat *life safety*.

Rekapitulasi untuk nilai perpindahan dan tingkat kinerja struktur menggunakan beberapa metode dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi nilai perpindahan dan tingkat kinerja struktur

Perpindahan	Metode Spektrum Kapasitas (ATC-40)	Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 440)
X	0,2022m	0,3317m
Y	0,1965m	0,3297m
Tingkat Kinerja Struktur	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Titik kinerja struktur diperoleh berdasarkan hasil plot antara kurva spektrum kapasitas dengan kurva *demand spectrum* untuk arah x berada pada titik perpotongan dimana nilai $S_d = 0,1485m$ dan $S_a = 0,1487g$ dan untuk arah y didapatkan titik perpotongan di mana $S_d = 0,1479m$ dan $S_a = 0,1493g$.
2. Nilai perpindahan pada titik kinerja struktur berdasarkan metode spektrum kapasitas sebesar 0,2022m untuk arah x dan 0,1965m untuk arah y. Nilai perpindahan pada titik kinerja struktur berdasarkan metode koefisien perpindahan sebesar 0,3317m untuk arah x dan 0,3297m.
3. Tingkat kinerja struktur didasarkan pada nilai perpindahan pada saat struktur mencapai titik kinerja atau *performance point*. Hasil perhitungan tingkat kinerja struktur menurut ATC-40, struktur termasuk pada tingkat *damage control* sedangkan menurut FEMA 440, struktur termasuk pada tingkat *life safety*. Berdasarkan tingkat kinerja tersebut, pada saat gempa, terjadi kerusakan yang signifikan pada komponen-komponen struktur utama tetapi tidak sampai mengalami keruntuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, N. R. (2010). Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP2000. Skripsi: Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Anom, L. H. S., Wibowo, dan Sunarmasto. (2017). Analisis Kinerja Struktur Dengan Metode Performance Based Design Terhadap Gedung Ketidakberaturan Vertikal. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*. (Online), Vol. 9 No. 9.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1. California: Applied Technology Council*.
- Arjakoni, A. F. dan Lutfi, M. (2020). Evaluasi Kinerja Seismik Pada Struktur Gedung Rumah Sakit Pendidikan Universitas Indonesia Dengan Metode Analisis *Pushover* Berdasarkan ATC 40. *Jurnal Komposit*, Vol. 4, No. 2.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung, SNI 1726:2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Ertanto, B. C., Satyarno, I., dan Suhendro, B. (2017). *Performance Based Design* Bangunan Untuk Level Kinerja *Operational*. *Jurnal Inersia*, Vol. 13, No. 2.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D. C.: *Federal Emergency Management Agency 356*.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D. C.: *Federal Emergency Management Agency 440*.
- Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., dan Windah, R. S. (2014). Analisis *Pushover* Pada Bangunan *Soft First Story*. *Jurnal Sipil Statik*, Vol. 2, No. 4.

- Palupi, A. S. (2015). Studi Kinerja Struktur Gedung Supermall Pakuwon Mansion *Phase-1* Surabaya Menggunakan Metode Analisa *Pushover*. Skripsi: Universitas Jember.
- Patria, R. (2017). Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung Studi Kasus Pada Hotel Inna Garuda Extention Yogyakarta. Skripsi: Universitas Islam Indonesia.
- Sandhi, R. D., Wibowo, A., dan SMD, A. (2017). Kajian Analisis Pushover Untuk Performance Based Design Pada Gedung Fakultas Ilmu Sosial Dan Politik (FISIP) Universitas Brawijaya. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil*, Vol. 1, No. 3.
- Tavio dan Wijaya, Usman, 2018. *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design)*. Yogyakarta: Penerbit ANDI.