

Evaluasi perilaku seismik struktur bangunan gedung asrama di Yogyakarta dengan *nonlinear static procedure*

Muhammad George Husien Zen^{1,*}, Yunalia Muntafi¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Pushover analysis
ATC-40
Seismic behavior
Performance level
Plastic hinge

Corresponding Author:

Muhammad George Husien Zen
georgehusein2@gmail.com

Abstract

Indonesia is in a highly seismic region due to the interaction of active tectonic plates, particularly along the Java subduction zone with its relatively steep dip angle. In addition, the collapse of a dormitory building at another Islamic boarding school in 2025 ago and the location of the studied building within the affected area of the 2006 Yogyakarta Earthquake associated with the Opak Fault highlight the importance of seismic performance evaluation. This study evaluated the seismic behavior of the C Dormitory Building of Madrasah Mu'allimin Muhammadiyah Yogyakarta using linear and nonlinear analyses based on SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, SNI 2847:2019, and ATC-40. Linear analysis was performed through equivalent static and response spectrum analyses to evaluate structural irregularities, inter-story drift, and P-delta effects, while nonlinear evaluation was conducted using the Nonlinear Static Procedure (NSP). The results indicate that the structure does not exhibit horizontal or vertical irregularities, and both inter-story drift and P-delta effects satisfy the specified requirements. The pushover analysis produced a maximum base shear of 17.679,6086 kN with a displacement of 201,441 mm in the x-direction, and 21.394,983 kN with a displacement of 308,355 mm in the y-direction. Based on the ATC-40 performance evaluation, the structure is classified under the Damage Control (DC) performance level in both directions. In addition, the plastic hinge distribution indicates a beam sway mechanism consistent with the strong column-weak beam concept, where yielding predominantly occurs in beam elements before columns.

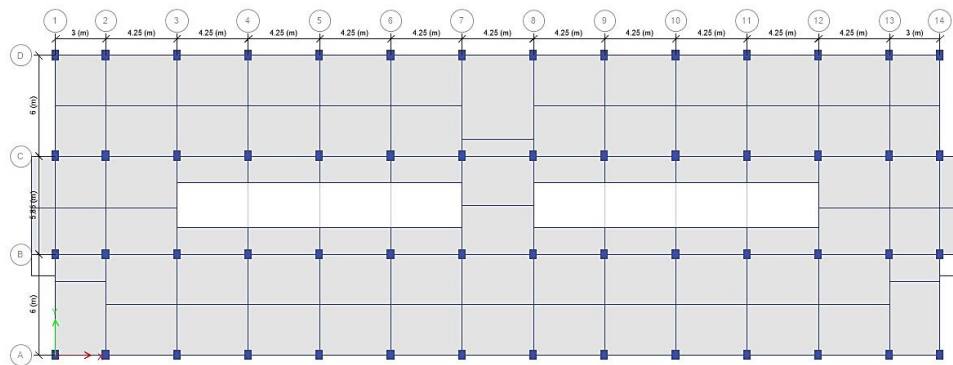
Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi akibat interaksi beberapa lempeng tektonik utama dunia dan sejumlah *microblocks* aktif. Secara geografis, Indonesia berada pada pertemuan Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Filipina, dan Pasifik (PusGen, 2017). Selain itu, Bird (2003) mengidentifikasi beberapa *microblocks* aktif di wilayah Indonesia yang turut berkontribusi terhadap kompleksitas aktivitas tektonik dan kejadian gempa bumi. Kondisi tersebut menyebabkan gempa bumi

dengan berbagai tingkat magnitudo sering terjadi dan berpotensi menimbulkan kerusakan pada infrastruktur maupun korban jiwa.

Pulau Jawa merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi karena berada pada zona subduksi aktif antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Menurut Muntafi dan Nojima (2021), zona subduksi di bawah Pulau Jawa memiliki *dip angle* yang lebih curam dibandingkan zona subduksi Sumatra, sehingga menghasilkan karakteristik kegempaan yang



Gambar 1. Denah Bangunan Gedung

berbeda. Salah satu peristiwa gempa yang berdampak besar adalah Gempa Yogyakarta tahun 2006 yang dikaitkan dengan aktivitas Sesar Opak dan menyebabkan kerusakan bangunan dalam skala luas serta menimbulkan korban jiwa yang signifikan (Walter dkk., 2008).

Evaluasi kinerja seismik merupakan aspek penting dalam menjamin keamanan dan fungsi bangunan eksisting terhadap pengaruh beban gempa. Selain itu, peristiwa runtuhnya bangunan asrama Pondok Pesantren Al Khoziny di Sidoarjo semakin menegaskan pentingnya evaluasi kinerja struktur, khususnya pada bangunan yang menampung penghuni dalam jumlah besar (Trikarinaputri, 2025). Pada penelitian ini, evaluasi kinerja seismik dilakukan pada Gedung Asrama C Madrasah Mu'allimin Muhammadiyah Yogyakarta yang berlokasi di Sedayu, Bantul, dengan jarak sekitar 15,5 km dari Sesar Opak dan masih berada dalam kawasan yang terdampak Gempa Yogyakarta 2006.

Penelitian dilakukan melalui pemodelan struktur berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 2847:2019. Analisis linear dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen dan respons spektrum untuk mengevaluasi keteraturan struktur, simpangan antar tingkat, serta pengaruh P-delta. Selanjutnya, evaluasi kinerja seismik dilakukan menggunakan analisis *Nonlinear Static Procedure* (NSP) atau analisis pushover berdasarkan ATC-40 (1996) dalam menentukan kategori

performance level bangunan. Analisis ini dilakukan untuk memperoleh kurva kapasitas (*capacity curve*), *performance point*, serta mekanisme pembentukan sendi plastis yang kemudian digunakan untuk menilai tingkat kinerja struktur terhadap beban gempa. Prosedur analisis ini mengambil referensi pada penelitian yang dilakukan Anwar (2004).

Metode Penelitian

Data dan pemodelan struktur

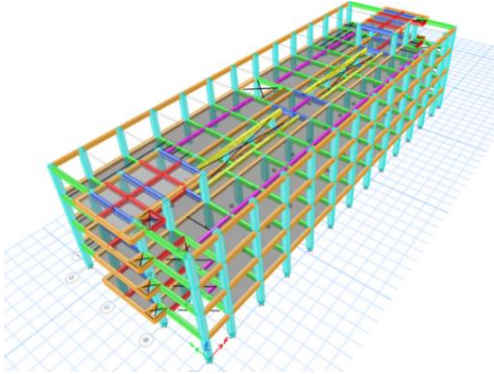
Bangunan yang akan diteliti yaitu Gedung Asrama C yang berada pada Kampus Terpadu Madrasah Mu'allimin Muhammadiyah Yogyakarta. Bangunan terdiri dari 4 tingkat tipikal yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan total ketinggian 13,8 m. Mutu dari material yang digunakan sebagai berikut.

1. Mutu beton: f'_c 25MPa
2. Mutu baja tulangan:
 - a. Baja tulangan sirip (BjTS) dengan diameter ≥ 10 mm, f_y 420 MPa
 - b. Baja tulangan polos (BjTP) dengan diameter ≤ 10 mm, f_y 280 MPa

Struktur dimodelkan 3 dimensi dengan mengacu pada data *as built drawing* dari PT Erosia Construction selaku kontraktor pelaksana proyek. Pemodelan struktur portal terbuka 3 dimensi dapat dilihat pada Gambar 2. Adapun data elemen struktur berdasarkan dokumen struktur diperoleh sebagai berikut.

1. Pelat: 120 mm (lantai); 150 mm (tangga, bordes, dan atap)

2. Balok dan kolom, setiap tipe dan dimensi elemen disajikan pada Tabel 1 untuk balok dan Tabel 2 untuk kolom.



Gambar 2. Pemodelan 3 dimensi struktur

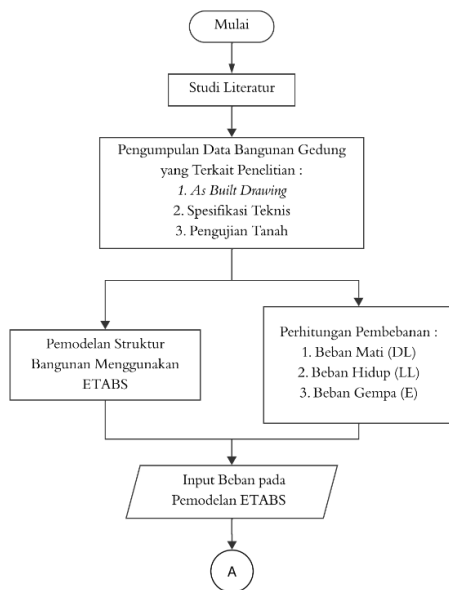
Tabel 1. Tipe dan dimensi balok

Tipe	Dimensi (mm)
B1	300 x 550
B2	300 x 500
B3	250 x 450
B4	250 x 400
B5	200 x 400
B7	250 x 500

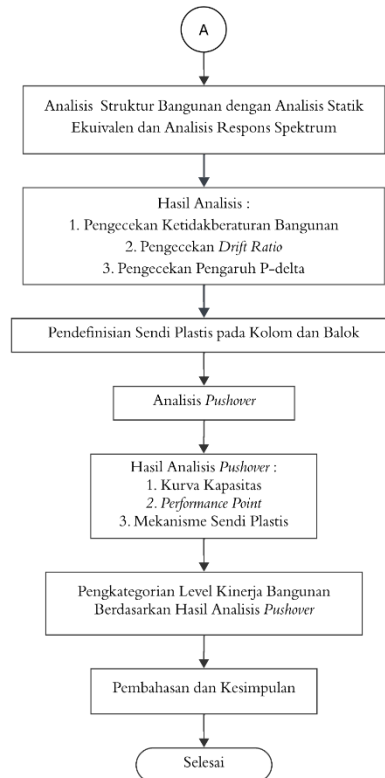
Tabel 2. Tipe dan dimensi kolom

Tipe	Dimensi (mm)
K1	450 x 600
K2	300 x 300

Bagan alir penelitian



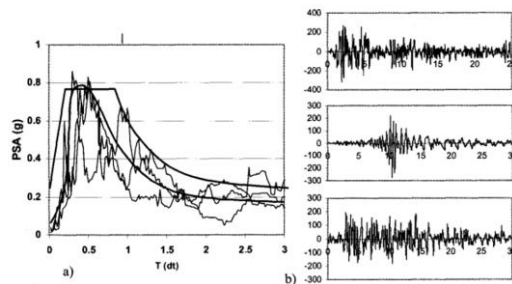
Gambar 3. Bagan alir penelitian



Lanjutan Gambar 3. Bagan alir penelitian

Analisis linear

Analisis linear dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen dan respons spektrum sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Analisis statik ekuivalen merupakan metode penyederhanaan yang mengubah pengaruh gempa menjadi gaya lateral statik ekuivalen yang didistribusikan pada struktur berdasarkan massa bangunan dan parameter seismik lokasi (Pawirodikromo, 2012). Sementara itu, analisis respons spektrum merupakan metode analisis dinamik yang menentukan respons maksimum struktur berdasarkan spektrum respons desain dan kombinasi respons ragam getar struktur yang disajikan pada Gambar 4 (Pawirodikromo, 2012).



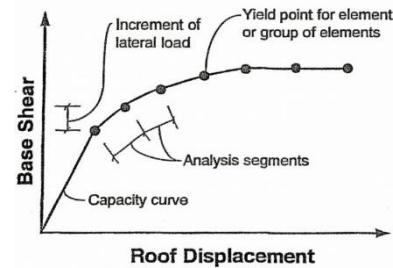
Gambar 4. Penyederhanaan spektrum gempa menjadi respons spektrum

Analisis linear digunakan untuk mengevaluasi perilaku elastis struktur terhadap beban gempa, meliputi pengecekan ketidakberaturan struktur, simpangan antar tingkat (*inter-story drift*), dan pengaruh P-delta. Pada analisis respons spektrum, persyaratan partisipasi massa ragam dan penskalaan gaya geser dasar juga diperiksa untuk memastikan hasil analisis memenuhi ketentuan yang berlaku. Hasil dari tahapan ini digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja awal struktur sebelum dilakukan analisis nonlinier.

Analisis nonlinear static procedure (NSP)

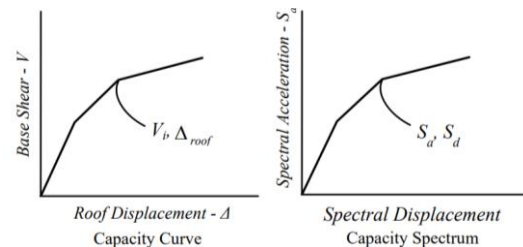
Evaluasi kinerja seismik struktur dilakukan menggunakan metode *nonlinear static procedure* (NSP) atau analisis *pushover* berdasarkan pedoman ATC-40. Menurut Utomo dkk. (2012), analisis *pushover* merupakan metode analisis statik nonlinier yang dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap hingga terbentuk sendi plastis pertama dan berlanjut sampai tercapai perpindahan target atau kondisi batas tertentu.

Metode ini memungkinkan evaluasi perilaku pasca-elastis dan kapasitas inelastis struktur terhadap beban gempa. Ilustrasi analisis *pushover* disajikan pada Gambar 5 dimana beban lateral diberikan secara inkremental sehingga diperoleh kurva kapasitas *capacity curve* yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar *base shear* dan perpindahan atap *roof displacement*.

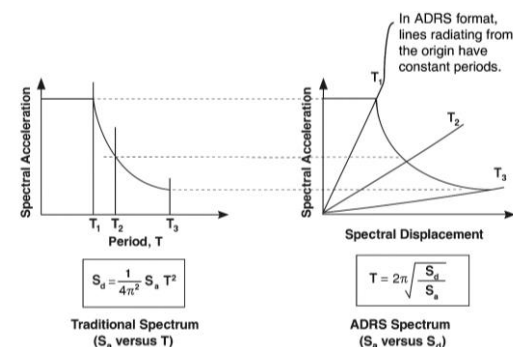


Gambar 5. Kurva kapasitas *pushover*

Selanjutnya, evaluasi kinerja struktur dilakukan menggunakan *capacity spectrum method* (CSM) berdasarkan ATC-40. Metode ini membandingkan kapasitas struktur (*capacity*) yang diperoleh dari analisis *pushover* dengan kebutuhan gempa (*demand*) yang direpresentasikan oleh spektrum respons gempa. Agar dapat dibandingkan, kurva kapasitas hasil *pushover* dan spektrum respons gempa dikonversi ke dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectrum* (ADRS). Dalam format ini, kapasitas dan kebutuhan gempa dinyatakan dalam koordinat percepatan spektral (*spectral acceleration*, S_a) dan perpindahan spektral (*spectral displacement*, S_d) yang disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Konversi respons spektrum ke format ADRS



Gambar 7. Konversi kurva kapasitas ke spektrum kapasitas

Dalam penjelasan Suwandi (2019) titik potong antara kurva kapasitas dan spektrum kebutuhan gempa menghasilkan *performance point*, yaitu kondisi saat kapasitas struktur sama dengan kebutuhan gempa rencana. Parameter yang diperoleh dari *performance point* meliputi perpindahan spektral (S_d), percepatan spektral, periode efektif (T_{eff}), dan redaman efektif (β_{eff}) yang selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat kinerja struktur. Dalam ATC-40 (1996), diberikan batasan *roof drift ratio* yang dievaluasi berdasarkan *performance point* untuk menilai kinerja struktur (*performance level*) melalui analisis *pushover*. Parameter yang digunakan adalah *maximum total drift* dan *maximum inelastic drift*. Batasan *roof drift ratio* disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Batasan *roof drift ratio* berdasarkan ATC-40

Parameter	IO	Performance Level		
		Damage Control	LS	Structural Stability
Maximum Total Drift	0,01	0,01 to 0,02	0,02	$0,33 \times \frac{V_i}{P_i}$
Maximum Inelastic Drift	0,005	0,005 to 0,015	no limit	no limit

Nilai *drift ratio* dihitung melalui Pers. 1 untuk *maximum total drift* dan Pers. 2 untuk *maximum inelastic drift*.

$$\text{Maximum total drift ratio} = \frac{\delta_t}{H_{total}} \quad (1)$$

$$\text{Maximum inelastic drift ratio} = \frac{\delta_t - \delta_1}{H_{total}} \quad (2)$$

Dimana:

δ_t = Nilai perpindahan *performance point* (m),

δ_1 = Nilai perpindahan awal leleh (m),

H = Tinggi total bangunan (m),

V_i = Total gaya geser pada tingkat-i, dan

P_i = Total gaya aksial pada tingkat-i.

Selain itu, distribusi dan perkembangan sendi plastis diamati untuk mengidentifikasi mekanisme keruntuhan struktur serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap konsep *strong column-weak beam*.

Hasil dan Pembahasan

Berat seismik efektif

Berat seismik efektif struktur dihitung berdasarkan kombinasi beban mati, beban mati tambahan (*superimposed dead load*), dan sebagian beban hidup yang berkontribusi terhadap massa seismik bangunan. Hasil perhitungan berat seismik efektif dari model ETABS diverifikasi dengan perhitungan manual untuk kontrol berat bangunan yang disajikan pada Tabel 4 menunjukkan bahwa rasio totalnya yaitu 0,07% yang memenuhi batas rasio $\leq 5\%$ berdasarkan *engineering judgement*.

Tabel 4. Kontrol perhitungan berat bangunan

Tingkat	Berat Manual (kg)	Berat ETABS (kg)	Rasio
Base	65318,400	65393,78	0,07%
1	913421,886	911645,06	
2	912021,533	907634,24	
3	895933,538	891526,37	
4	186730,708	195257,74	
Total	2973426,066	2971457,19	

Analisis linear

Gaya Geser Dasar

Berdasarkan SNI 1726:2019 dilakukan perhitungan manual gaya geser dasar dengan Pers. 3 berikut.

$$\begin{aligned} V &= C_{s, \text{pakai}} \times W_t \\ &= 0,0929 \times 28498,75 \text{ kN} \\ &= 2646,23 \text{ kN} \end{aligned} \quad (3)$$

Selain itu, pasal pada juga SNI 1726:2019 juga menyebutkan bahwa perlu dilakukan eskalaan gaya gempa apabila hasil gaya geser dasar melalui analisis ragam (V_r) kurang dari 100% (paling sedikit 90 %) gaya geser dasar statik ekuivalen (V), maka gaya dari analisis ragam tersebut wajib diskalakan menggunakan Pers. 4.

$$\begin{aligned} FS &= \frac{V_r}{V_t} \\ &= \frac{2646,23}{2235,04} \\ &= 1,18 \end{aligned} \quad (4)$$

Sehingga didapatkan hasil penskalaan gaya gempa antara analisis statik ekuivalen dan analisis respons spektrum pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil penskalaan gaya gempa

Arah Sumbu	Jenis Analisis		
	V _{statik} (kN)	V _{dinamik, awal} (kN)	V _{dinamik, akhir} (kN)
X	2646,23	2235,037	2646,23
Y	2646,23	2109,689	2646,23

Ketidakberaturan Struktur

Evaluasi ketidakberaturan struktur dilakukan untuk meninjau keteraturan bangunan berdasarkan konfigurasi struktur, distribusi massa, dan kekakuan bangunan. Rekapitulasi hasil pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7 yang menunjukkan bahwa struktur teridentifikasi tidak memiliki ketidakberaturan vertikal maupun horizontal.

Tabel 6. Rekapitulasi ketidakberaturan horizontal

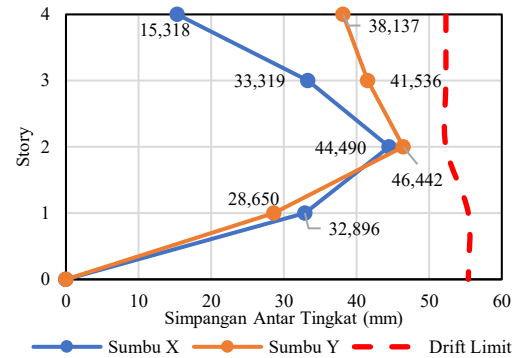
No	Tipe	Ketidakberaturan	Cek
1	1a	Torsi	Tidak ada
2	1b	Torsi berlebihan	Tidak ada
3	2	Sudut dalam	Tidak ada
4	3	Diskontinuitas diafragma	Tidak ada
5	4	Pergeseran tegak lurus terhadap bidang	Tidak ada
6	5	Sistem non paralel	Tidak ada

Tabel 7. Rekapitulasi ketidakberaturan vertikal

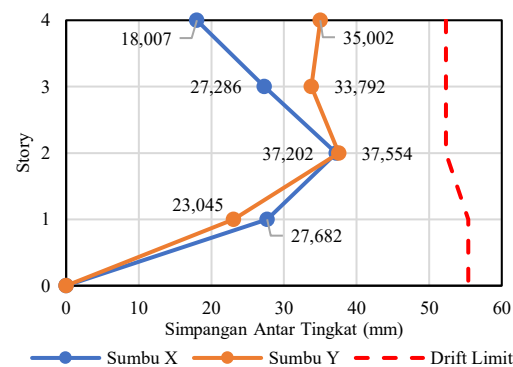
No	Tipe	Ketidakberaturan	Cek
1	1a	Kekakuan tingkat lunak	Tidak ada
2	1b	Kekakuan tingkat lunak berlebihan	Tidak ada
3	2	Massa	Tidak ada
4	3	Geometri vertikal	Tidak ada
5	4	Diskontinuitas bidang pada elemen vertikal	Tidak ada
6	5a	Tingkat lemah akibat diskontinuitas pada Kekuatan lateral tingkat	Tidak ada
7	5b	Tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada Kekuatan lateral tingkat	Tidak ada

Simpangan Antar Tingkat (*story drift*)

Evaluasi simpangan antar tingkat dilakukan untuk meninjau respons lateral struktur akibat beban gempa. Hasil perbandingan nilai simpangan antar tingkat dari analisis statik ekuivalen dan respons spektrum disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. *Story drift* dari analisis statik ekuivalen

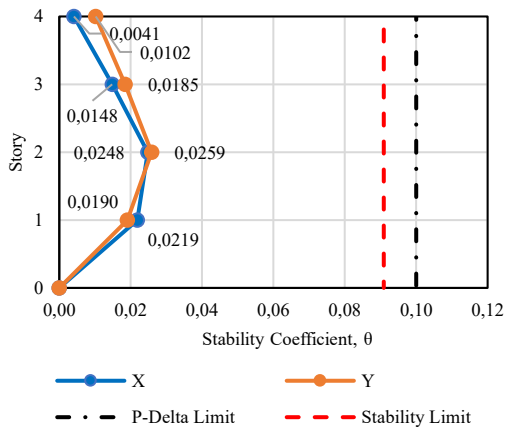


Gambar 9. *Story drift* dari analisis respons spektrum

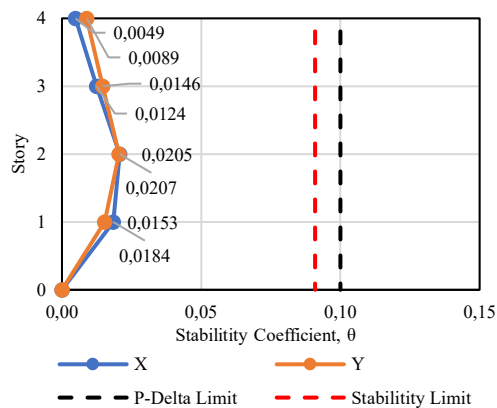
Dari grafik diketahui bahwa rekapitulasi nilai simpangan dominan lebih besar pada sumbu y yang merupakan sumbu lemah karena dimensi bentang bangunan sumbu y yang lebih pendek dari sumbu x, hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Nagargoje dan Deshmukh (2021) dimana nilai simpangan (*story drift*) cenderung dominan lebih besar dimiliki pada sumbu lemah bangunan atau sumbu yang lebih pendek daripada sumbu lainnya

Pengaruh P-Delta

Hasil pengecekan koefisien stabilitas struktur ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11 yang menunjukkan bahwa stabilitas struktur pada sumbu x lebih kuat yang ditandai dengan nilainya yang cenderung lebih kecil dibandingkan sumbu y serta nilai pada kedua sumbu yang jauh lebih kecil dari batas P-delta dan batas stabilitas struktur.



Gambar 10. Pengaruh p-delta dari analisis statik ekuivalen

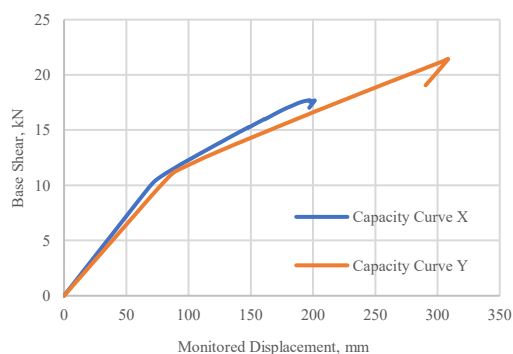


Gambar 11. Pengaruh p-delta dari analisis respons spektrum

Analisis nonlinear static procedure (NSP)

Kurva Kapasitas

Disajikan grafik perbandingan hasil kurva kapasitas pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan kurva kapasitas sumbu x dan sumbu y

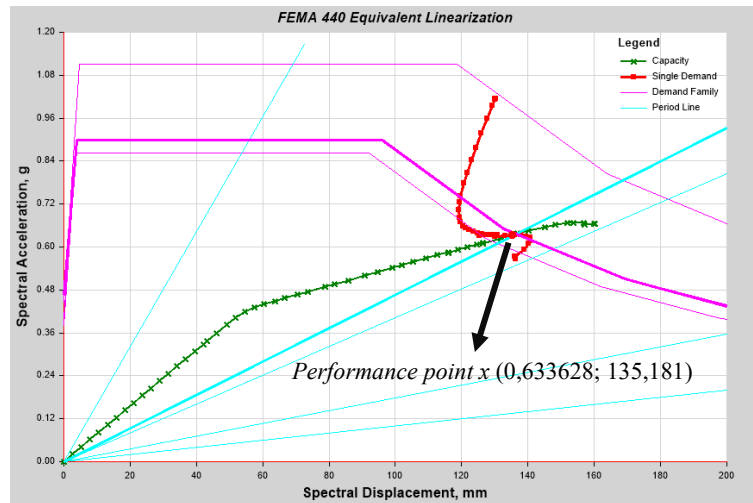
Berdasarkan Gambar 12, kurva kapasitas arah y menunjukkan nilai *base shear* dan *roof displacement* maksimum yang lebih besar dibandingkan arah x. Nilai *base shear* maksimum yang diperoleh pada arah x adalah sebesar 17.679,61 kN dengan *displacement* maksimum sebesar 201,44 mm, sedangkan pada arah y diperoleh *base shear* maksimum sebesar 21.394,98 kN dengan *displacement* maksimum sebesar 308,36 mm.

Secara umum, kapasitas gaya geser dasar yang lebih besar diharapkan terjadi pada sumbu kuat struktur. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas maksimum justru terjadi pada arah y yang secara geometris merupakan sumbu lemah bangunan. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh konfigurasi elemen struktur, khususnya orientasi penampang kolom dan distribusi tulangan longitudinal. Menurut Darwin dkk. (2016), orientasi penampang kolom dan rasio tulangan longitudinal berpengaruh terhadap kapasitas lentur serta respons nonlinier elemen struktur, sehingga dapat menghasilkan kapasitas lateral yang berbeda pada masing-masing arah pembebanan.

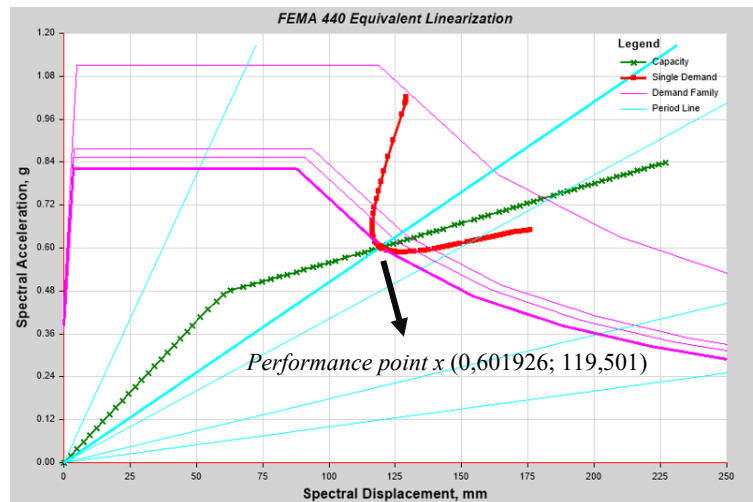
Pada penelitian ini, kolom menggunakan dimensi 450 mm × 600 mm dengan dimensi terpanjang kolom (600 mm) sejajar pada sumbu lemah denah (sumbu y), sehingga memengaruhi nilai momen inersia dan kekakuan lateral bangunan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Fairuz dkk. (2021) dan Mahendra (2022), yang menunjukkan bahwa kapasitas *base shear* maksimum hasil analisis *pushover* tidak selalu terjadi pada sumbu kuat bangunan, melainkan dapat dipengaruhi oleh orientasi penampang kolom dan konfigurasi sistem penahan gaya lateral yang digunakan.

Performance Point

Performance point hasil analisis *pushover* yang merupakan perpotongan antara kurva kapasitas (*pushover curve*) dengan respons spektrum (*demand curve*) dalam format ADRS pada kedua sumbunya dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14 serta Tabel 8 untuk rekapannya.



Gambar 13. Performance point sumbu x



Gambar 14. Performance point sumbu y

Tabel 8. Performance point hasil analisis pushover

Arah	Base		Performance Point				
	Shear (kN)	V_t (kN)	D_t (mm)	S_a (g)	S_d (mm)	T_{eff}	β_{eff}
X	2646,23	16613,941	171,957	0,634	135,181	0,943	0,121
Y	2646,23	15005,613	165,343	0,602	119,501	0,829	0,088

Pada Tabel 8 dapat dilihat untuk sumbu x, nilai gaya geser dasar $V_t = 16613,941 \text{ kN} > 2646,23 \text{ kN}$ dan untuk sumbu y, nilai gaya geser dasar $V_t = 15005,613 \text{ kN} > 2646,23 \text{ kN}$. Maka dengan menggunakan metode spektrum kapasitas (ATC-40, 1996) perilaku seismik struktur pada kedua sumbu telah mengalami deformasi in-elastis akibat perubahan kekakuan struktur setelah terjadi sendi plastis.

Untuk nilai *target displacement* (D_t) kedua sumbu hasil analisis *pushover* tidak boleh melebihi batasan maksimum *displacement* yaitu $0,02 H = 0,02 \times 13,8 \text{ m} = 0,276 \text{ m} = 276 \text{ mm}$. Untuk nilai D_t pada masing-masing sumbu x dan y adalah $171,957 \text{ mm}$ dan $165,343 \text{ mm} < 276 \text{ mm}$, sehingga telah memenuhi persyaratan keamanan seperti penelitian yang dilakukan Muntafi (2012).

Performance Level

Menggunakan Pers. 1 dan Pers. 2 yang berdasarkan ATC-40 dilakukan perhitungan *drift ratio* pada kedua sumbu sebagai berikut.

1. Sumbu x

a. Maximum total drift ratio:

$$\frac{\delta_t}{H_t} = \frac{171,957}{13800} = 0,0125 > 0,01 \text{ (DC)}$$

b. Maximum inelastic drift ratio:

$$\frac{\delta_t - \delta_1}{H_t} = \frac{171,9 - 3,5}{13800} = 0,0122 > 0,005 \text{ (DC)}$$

2. Sumbu y

a. Maximum total drift ratio:

$$\frac{\delta_t}{H_t} = \frac{165,343}{13800} = 0,0120 > 0,01 \text{ (DC)}$$

b. Maximum inelastic drift ratio:

$$\frac{\delta_t - \delta_1}{H_t} = \frac{165,3 - 3,5}{13800} = 0,0117 > 0,005 \text{ (DC)}$$

Berdasarkan hasil evaluasi tingkat kinerja pada Tabel 9, nilai *maximum total drift ratio* yang diperoleh sebesar 0,0125 untuk arah x dan 0,0120 untuk arah y. Sementara itu, nilai *maximum inelastic drift ratio* masing-masing sebesar 0,0122 dan 0,0117. Berdasarkan kriteria ATC-40 (1996), nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur pada kedua arah termasuk dalam kategori *Damage Control* (DC). Tingkat kinerja ini mengindikasikan bahwa struktur telah mengalami deformasi inelastis akibat

pembentukan sendi plastis, namun kerusakan yang terjadi masih tergolong minor hingga sedang sehingga bangunan masih dapat diperbaiki dan fungsi utamanya tetap dapat dipertahankan setelah gempa rencana.

Mekanisme Sendi Plastis

Pembentukan sendi plastis pertama terjadi pada *step* ke-16 untuk arah x dan *step* ke-20 untuk arah y yang disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10, yang ditandai dengan transisi kondisi dari titik A ke B sebagai awal perilaku inelastis struktur. Seiring peningkatan beban lateral, jumlah sendi plastis pada elemen balok terus bertambah.

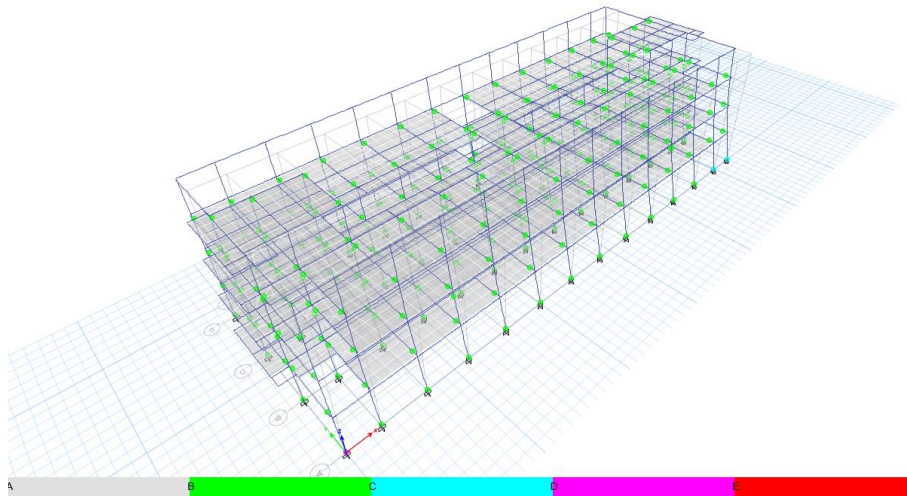
Berdasarkan Gambar 15 dan Gambar 16 yang menampilkan *step* akhir analisis pada kedua sumbu, mekanisme sendi plastis yang terbentuk pada kedua arah menunjukkan pola *beam sway mechanism*. Hal ini ditandai dengan pelelehan pada beberapa elemen balok mencapai titik C dan D, sementara sebagian besar kolom masih berada pada titik B. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur cenderung telah memenuhi konsep *strong column-weak beam*, sehingga mekanisme keruntuhan yang terjadi lebih terkendali dan diharapkan mampu memberikan perilaku yang lebih aman saat menerima beban gempa.

Tabel 9. Distribusi sendi plastis sumbu x

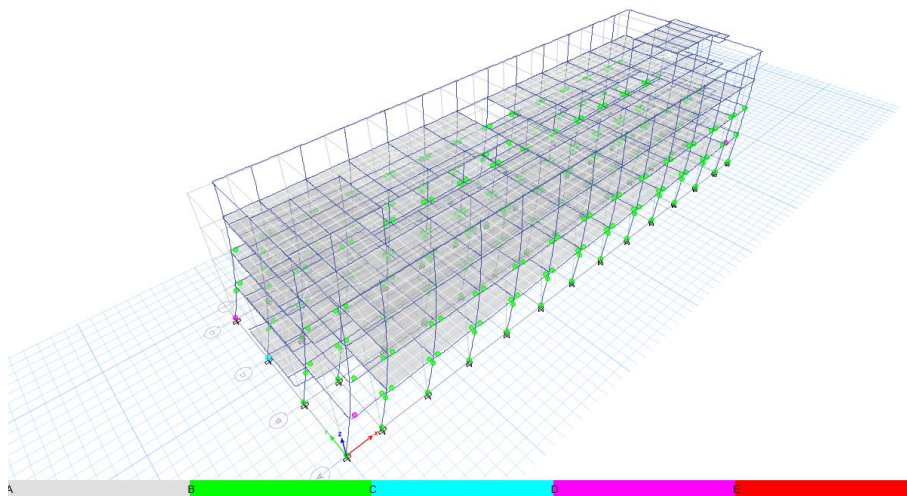
Step	Displacement (mm)	Base Shear (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
1	3,5	503,9499	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
2	7	1007,8998	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
					↓↓↓							
15	52,5	7559,2555	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
16	56	8063,2066	1135	1	0	0	0	1136	0	0	0	1136
17	57,628	8296,913	1134	2	0	0	0	1136	0	0	0	1136
					↓↓↓							
54	201,148	17675,986	806	327	0	3	0	1002	131	3	0	1136
55	201,441	17679,609	806	326	1	3	0	1002	131	3	0	1136
56	196,956	17016,524	806	326	1	3	0	1002	131	3	0	1136

Tabel 9. Distribusi sendi plastis sumbu y

Step	Displacement (mm)	Base Shear (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
1	3,5	450,8673	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
2	7	901,7349	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
					↓↓↓							
19	66,5	8566,5266	1136	0	0	0	0	1136	0	0	0	1136
20	69,674	8975,3515	1132	4	0	0	0	1136	0	0	0	1136
21	73,775	9495,9579	1112	24	0	0	0	1136	0	0	0	1136
					↓↓↓							
78	301,355	21103,0935	822	314	0	0	0	956	180	0	0	1136
79	304,855	21248,795	816	320	0	0	0	956	180	0	0	1136
80	308,355	21394,983	811	322	3	0	0	956	180	0	0	1136



Gambar 15. Mekanisme sendi plastis step-56 sumbu x



Gambar 16. Mekanisme sendi plastis step-80 sumbu y

Kesimpulan

Evaluasi kinerja seismik Gedung Asrama C Madrasah Mu'allimin Muhammadiyah Yogyakarta menunjukkan bahwa struktur memenuhi persyaratan kinerja berdasarkan hasil analisis linear dan nonlinier. Hasil analisis linear menunjukkan bahwa bangunan tidak memiliki ketidakberaturan horizontal maupun vertikal, serta memenuhi batas simpangan antar tingkat dan stabilitas terhadap pengaruh P-delta.

Berdasarkan analisis *pushover*, diperoleh kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 17.679,61 kN pada arah x dan 21.394,98 kN pada arah y. Evaluasi tingkat kinerja menggunakan ATC-40 menunjukkan bahwa struktur berada pada kategori *Damage Control* (DC) pada kedua arah pembebanan, yang mengindikasikan bahwa kerusakan yang terjadi masih berada pada tingkat yang dapat diperbaiki dan fungsi utama bangunan tetap dapat dipertahankan setelah gempa rencana.

Distribusi sendi plastis menunjukkan mekanisme *beam sway mechanism* dengan pelelehan awal terjadi pada elemen balok sebelum kolom, sehingga struktur cenderung telah memenuhi konsep *strong column-weak beam*. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur memiliki mekanisme keruntuhan yang lebih aman dan mampu memberikan perilaku seismik yang baik terhadap beban gempa.

Adapun saran kelanjutan penelitian dapat berupa perbandingan dengan analisis nonlinear lain seperti *nonlinear time history* (NTH) agar diketahui perbedaan *output* dari kedua jenis analisis tersebut. Selain itu penggunaan variasi denah lain, ataupun variasi geometri elemen struktur seperti balok dan kolom sebagai perbandingan perkuatan elemen dalam mengevaluasi struktur juga dapat dilakukan dalam mengembangkan kelanjutan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Anwar, N., 2004. Pushover Analysis Using ETABS and SAP2000, in: Association of Structural Engineers Philippines Seminar. ACECOMS.
- ATC-40, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, California Seismic Safety Commission.
- Badan Standardisasi Nasional, 2020. Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (1727:2020). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019a. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (1726:2019). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019b. Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (2847:2019). Jakarta.
- Bird, P., 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems* 4.
- Darwin, D., Dolan, C.W., Nilson, A.H., 2016. Design of Concrete Structures, 15 ed. Mc Graw Hill Education.
- Fairuz, F.M., Thamrin, R., Zaidir, 2021. Kinerja Struktur Gedung Beton Bertulang dengan Variasi Arah Penampang dan Rasio Tulangan Kolom. *SIKLUS J. Tek. Sipil* 7, 13.
- Mahendra, A.I., 2022. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung 9 Lantai Beton Bertulang dengan Pushover Analysis Berdasarkan ATC-40 (Studi Kasus : Gedung Fakultas Psikologi Uin Sunan Ampel Surabaya).
- Muntafi, Y., 2012. Evaluasi Kinerja Bangunan Gedung Dpu Wilayah Kabupaten Dengan Analisis Pushover. *Simp. Nas. RAPI XI FT UMS* 2012.
- Muntafi, Y., Nojima, N., 2021. Seismic Properties and Fractal Dimension of Subduction Zone in Java and Its Vicinity Using Data From 1906 To 2020. *Int. J. GEOMATE* 21, 71–83.
- Nagargoje, S., Deshmukh, G., 2021. Influence of Aspect Ratio & Plan Configurations on Seismic Performance of Multi-storeyed R . C . C . Buildings using Response Spectrum Analysis 8, 817–821.
- Pawirodikromo, W., 2012. Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan, Pustaka Pelajar.
- Suwandi, H.P., 2019. Analisis Gempa Non-Linear Static Pushover Dengan Metode Atc-40 Untuk Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung. *Modul. Media Komun. Dunia Ilmu Sipil* 1. <https://doi.org/10.32585/modulus.v1i1.379>
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017. Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan

Umum dan Perumahan Rakyat.

- Utomo, C., Susanto, R.I., Tujono, S., Wibowo, H., 2012. Evaluasi Struktur Dengan Pushover Analysis Pada Gedung Kalibata Residences Jakarta (The Evaluation Of The Structure by Using Pushover Analysis of Kalibata Residences Building Jakarta). Jur. Tek. Sipil, Fak. Tek. Univ. Diponegoro.
- Walter, T.R., Wang, R., Luehr, B.G., Wassermann, J., Behr, Y., Parolai, S., Anggraini, A., Günther, E., Sobiesiak, M., Grosser, H., Wetzel, H.U., Milkereit, C., Sri Brotopuspito, P.J.K., Harjadi, P., Zschau, J., 2008. The 26 May 2006 magnitude 6.4 Yogyakarta earthquake south of Mt. Merapi volcano: Did lahar deposits amplify ground shaking and thus lead to the disaster? *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 9, 1–9.