

Analisis Kinerja Struktur Bangunan Gedung Laboratorium 5 Lantai Terhadap Gempa Kuat

Lintang Enggartiasto¹⁾, Agung Kristiawan²⁾, Ikwanudin³⁾,
Risidiana Cholifatul Afifah⁴⁾

^{1, 2, 3, 4)} Program Studi Teknik Sipil Universitas PGRI Semarang
Jl. Sidodadi Timur Jalan Dokter Cipto No.24, Karangtempel, Kec. Semarang Timur,
Kota Semarang, Jawa Tengah 50232

Email: lintangenggartiasto@upgris.ac.id¹⁾, agungkristiawan@upgris.ac.id²⁾,
ikhwanudin@upgris.ac.id³⁾, risidiana.afifah@gmail.com⁴⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v14i2.1186>

(Received: 19 August 2024 / Revised: 15 September 2024 / Accepted: 19 September 2024)

Abstrak

Perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung sangat diperlukan sebagai konsekuensi kondisi geografi Negara Indonesia yang sebagian besar memiliki resiko gempa yang tinggi. Penelitian ini membahas kinerja struktur gedung laboratorium 5 lantai eksisting terhadap gempa kuat. Metode yang digunakan meliputi non-linier statik pushover dan non linier dinamik riwayat waktu (*time history*). Rekaman gempa yang digunakan adalah gempa kuat dengan percepatan spektrum 0.2 detik dengan rasio redaman 5% untuk periode 2500 tahun. Hasil analisis pushover level kinerja struktur saat *performance point* arah X termasuk kategori *Immediate Occupancy* dan arah Y termasuk kategori *Damage Control* dengan parameter sistem struktur hasil analisis non linier yang memenuhi syarat terhadap parameter desain SNI 1726-2019. *Drift ratio* terbesar pada analisis riwayat waktu menghasilkan level kinerja struktur dengan kategori *Damage Control*. Disimpulkan dengan kategori level kinerja struktur tersebut, saat terjadi gempa kuat (periode 2500 tahun) struktur akan mengalami kerusakan struktural yang ringan dan masih dapat diperbaiki untuk difungsikan kembali.

Kata kunci: *Desain berbasis kinerja, analisis non-linier, level kinerja struktur*

Abstract

Due to the geography of Indonesia, most of which has a high seismic risk, seismic design of buildings is necessary. This research discusses the structural performance of an existing 5-story laboratory building against strong earthquakes. The methods used include nonlinear static pushover and nonlinear dynamic time history. The earthquake record used is a strong earthquake with an acceleration spectrum of 0.2 seconds and a damping ratio of 5% for a period of 2500 years. The results of the pushover analysis of the structural performance level at the performance point in the X-direction include the Immediate Occupancy category and in the Y-direction include the Damage Control category with the structural system parameters of the nonlinear analysis results that meet the requirements of the SNI 1726-2019 design parameters. The largest drift ratio in the time history analysis results in a structural performance level with the Damage Control category. It is concluded that with this category of structural performance level, during a strong earthquake (2500 year period), the structure will experience minor structural damage and can still be repaired to function.

Keywords: *Performance Based Design, Non-Linier Analysis, Structural Performance Level*

1. Latar Belakang

Gempa bumi merupakan salah satu dampak terbesar yang dapat menimbulkan kerusakan baik pada bangunan maupun struktur lainnya (Abdu, 2024). Perubahan peta gempa dan persyaratan bangunan tidak selalu berakibat peningkatan gaya gempa. Sebaliknya, ada kasus di mana gaya gempa justru menurun akibat perubahan tersebut dan menjadi salah satu hal yang penting dalam mengevaluasi dampak gempa terhadap struktur (Nabhilla & Hayu, 2020).

Filosofi desain seismik saat ini untuk bangunan beton bertulang seperti yang diuraikan dalam berbagai kode dan pedoman, digunakan untuk desain bangunan yang aman terhadap beban yang bekerja terutama beban gempa bumi. Namun, peraturan desain struktur saat ini tidak menjelaskan secara detail mengenai level kinerja struktur yang didesain terhadap beban gempa bumi dan menyebabkan desain tidak efisien (Zameeruddin & Sangle, 2021). Selain itu, perubahan standar/kode yang cepat, sangat penting dilakukan analisis terhadap kinerja struktur bangunan secara berkala, hal ini dikarenakan Indonesia merupakan negara yang terletak di zona gempa Pasifik dan Asia (Mamesah et al., 2014). Seperti beberapa tahun terakhir, Indonesia mengalami serangkaian gempa bumi besar di berbagai wilayah seperti di Aceh, Yogyakarta, Kepulauan Mentawai, dan lain-lain (Tatya Putri Utami & Niken Warastuti, 2019). Intensitas dan besaran gempa yang terjadi di Indonesia selama ini, menyebabkan peraturan gempa di Indonesia selalu dievaluasi dan diperbaiki, SNI 1726 tahun 2019 merupakan peraturan terbaru yang mengikuti peta gempa 2017 serta merujuk pada ASCE 7-16 (Wirakusuma et al., 2022). Apabila suatu gedung bertingkat terletak di daerah rawan gempa, maka gempa bumi tentu sudah diperhitungkan dalam perencanaan pembangunannya (Amrullah et al., 2019). Bangunan eksisting pada umumnya telah melalui tahap perencanaan yang lengkap, termasuk pengurusan perizinan dari pihak/lembaga yang berwenang. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa desain struktur telah sesuai dengan kaidah dan standar teknis yang berlaku (Pradono, 2019). Selain itu di dalam masa layannya, bangunan gedung harus sesuai peruntukannya agar fungsi bangunan tersebut tidak berubah (Nugroho, 2016).

Kinerja struktur adalah tingkat performa sebuah struktur terhadap gempa yang direncanakan (Kukuh Adhi Kafie et al., 2023). Tingkat performa dan struktur dapat diketahui dari tingkat kerusakan pada struktur saat terjadi gempa dengan periode ulang tertentu. Karena itu, tingkat kinerja sistem struktur akan selalu terkait dengan biaya perbaikan terhadap kerusakan bangunan tersebut (Hutama, 2021). *Performance Based Design* (PBD) adalah metode analisis kinerja struktur yang memungkinkan pemilik bangunan untuk memperoleh tingkat kinerja struktur bangunan berdasarkan gempa yang direncanakan (Powell, 2007). Tingkat kerusakan struktur bangunan yang disebabkan oleh beban gempa MCE_R dapat ditentukan dengan menggunakan PBD, yang didasarkan pada ATC-40 dan FEMA 273 (Budiono & Wicaksono, 2016). Analisis menggunakan metode desain berbasis kinerja membandingkan data pembebanan seismik berupa spektrum respons terhadap kurva kekuatan untuk memperoleh peringkat kinerja dan tingkat kinerja struktur. (Nurjannah et al., 2020).

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh level kinerja struktur terhadap gempa kuat (MCE_R) dengan periode ulang 2500 tahun pada struktur bangunan eksisting dengan fungsi laboratorium yang terbuat dari material beton bertulang dengan metode *performance based design*. Penentuan level kinerja pada model

struktur dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan program ETABS berdasarkan gambar *As Built Drawing* struktur gedung.

2. Metode Penelitian

Kapasitas dan daktilitas adalah dua konsep penting dalam evaluasi dan perancangan struktur bangunan. Kapasitas struktur merujuk pada kemampuan struktur untuk menahan beban tertentu sebelum mengalami kegagalan atau kerusakan (Dwi Wahyuni et al., 2021). Analisis ketahanan suatu struktur bangunan terhadap beban gempa dapat dilakukan dengan empat cara, yaitu: statik linier, statik non-linier, dinamik linier, dan dinamik non-linier. Cara statik non-linier dikenal sebagai analisis pushover (ASCE/SEI 41-23, 2023). Prinsip analisis *push-over* adalah dengan memberikan beban lateral pada struktur sehingga terjadi perpindahan lateral dalam bentuk kurva kapasitas (Nurjannah et al., 2020). Besarnya beban dorong lateral (*push-over*) secara bertahap bertambah hingga deformasi struktur mencapai batas kapasitasnya. Meningkatnya besaran beban lateral, terjadi perubahan kondisi struktur dan dapat diketahui tingkat kerusakannya (sendi plastis). (Elnashai, 2001). Kurva kapasitas *push-over* yang dihasilkan diubah menjadi spektrum yang merepresentasikan hubungan antara percepatan spektral (S_a) dan perpindahan (S_D), sebagaimana ditentukan oleh persamaan (1) hingga (4) dalam analisis desain berbasis kinerja. (ATC-40, 1996).

$$MPF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \phi_i) / g}{\sum_{i=1}^n (w_i \phi_{i1}^2) / g} \right] \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^n (w_i \phi_i) / g]}{[\sum_{i=1}^n (w_i / g)] [(w_i \phi_{i1}^2) / g]} \quad (2)$$

$$S_a = \frac{V / W}{\alpha_1} \quad (3)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{atap}}{PF_1 \phi_{atap 1}} \quad (4)$$

Dengan:

- MPF_1 = faktor partisipasi modal untuk mode alami pertama
- α_1 = koefisien massa modal pada mode pertama
- w_i / g = massa pada tingkat ke – i
- ϕ_{i1} = amplitudo mode – 1 pada tingkat ke – i
- $\phi_{atap 1}$ = amplitudo mode – 1 di atap
- N = jumlah tingkat bangunan
- V = gaya geser dasar
- W = berat bangunan (termasuk beban mati dan beban hidup)
- Δ_{atap} = perpindahan atap
- S_a = percepatan spektra
- S_d = perpindahan spektra

Beban gempa aktual dimasukkan ke dalam pemodelan sebagai spektrum respons berdasarkan jenis tanah dan lokasi struktur bangunan. Spektrum respons adalah hubungan antara periode dan spektrum percepatan. Dalam analisis desain berbasis kinerja, spektrum respons diubah menjadi spektrum keperluan (*demand*) yang merupakan hubungan antara percepatan spektral dan perpindahan spektral menggunakan Persamaan (5) hingga (7).

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g \quad (5)$$

$$S_{ai} g = \frac{2\pi}{T_i} S_{vi} \quad (6)$$

$$S_{di} = \frac{T_i}{2\pi} S_{vi} \quad (7)$$

Dengan ,

S_{di} = nilai spektra perpindahan pada periode ke – i

S_{ai} = nilai spektra percepatan pada periode ke – i

T_i = periode i

g = percepatan gravitasi

Dengan demikian, spektrum kapasitas dan spektrum keperluan dapat diplot karena mempunyai acuan yang sama, yaitu berupa kurva hubungan spektra. Titik perpotongan antara spektrum kapasitas dengan spektrum permintaan adalah titik kinerja struktur yang memperlihatkan tingkat kinerja bangunan dalam menahan beban gempa (gambar 1). Semakin banyak kerusakan struktur inelastis tanpa keruntuhan struktur yang bersangkutan, semakin besar redaman histerestiknya (Chintanapakdee & Chopra, 2003). Metode ini dapat digunakan jika bentuk ragam/mode pertama sangat dominan dalam kedua arah orthogonal dibandingkan bentuk ragam lain.

Analisis riwayat waktu nonlinier yang disebut NL-THA digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktural, selain pendekatan pushover. (gambar 2). Perhitungan NL-THA lebih akurat karena menggunakan beban percepatan seismik sebagai fungsi waktu (*acceleration time history*)(Budiono & Wicaksono, 2016). Analisis riwayat waktu linier yang ditunjukkan pada Gambar 2 mencakup analisis model matematis linier dari struktur untuk menentukan responsnya terhadap serangkaian riwayat percepatan yang cocok secara spektral yang kompatibel dengan respons desain spektral pada lokasi bangunan. Redaman yang digunakan sebesar 5%, dan komponen gerak tanah harus dicocokkan secara spektral dalam rentang 0.8 T batas bawah dan 1.2 T batas atas berdasarkan SNI 1726-2019. Saat ini, metode NL-THA dianggap sebagai metode yang lebih akurat, sedangkan CSA merupakan metode yang lebih sederhana dan konservatif (Ertanto et al., 2017). Respons struktur ditinjau terhadap parameter sistem struktur menggunakan persamaan (8) hingga (11). Hasil tinjauan kemudian dibandingkan dengan persyaratan sistem struktur SNI 1726-2019.

Faktor kuat lebih (Ω_0)

$$\Omega_0 = \frac{V_m}{V_d} \quad (8)$$

Faktor modifikasi respons (R)

$$R = R_d \times \Omega_0 \quad (9)$$

$$R_d = \frac{V_e}{V_{pp}} \quad (10)$$

Faktor pembesaran defleksi (C_d)

$$C_d = \frac{\Delta_{pp}}{\Delta_D} \quad (11)$$

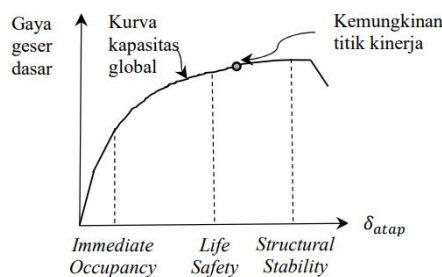
Dengan :

V_m = gaya geser maksimum (kN)

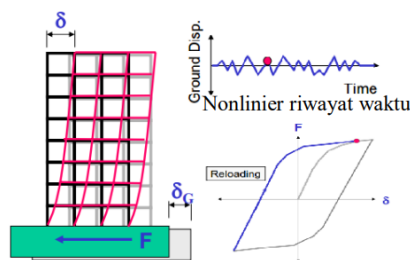
V_d = gaya geser desain (kN)

- V_e = gaya geser elastik (kN)
- V_{pp} = gaya geser aktual (kN)
- R_d = reduksi daktilitas
- Δ_{pp} = perpindahan aktual (mm)
- Δ_D = perpindahan desain (mm)

Evaluasi kinerja yang dibahas adalah perilaku respon inelastis struktur. Selanjutnya, desain struktur dapat diverifikasi agar konsisten dengan asumsi dan ekspektasi perilaku struktur selama fase desain. ATC-40 mengusulkan untuk mengukur kinerja struktur berdasarkan kriteria global, dengan menggunakan simpangan atau perpindahan lantai struktur dari fase elastik ke fase inelastik bila dibebani gempa kuat (MCE_R). Nilai batas deformasi untuk level kinerja struktur berdasarkan ATC-40 diperlihatkan pada Tabel 1.



Gambar 1 Kurva Kapasitas Hasil Pushover (ATC-40, 1996)



Gambar 2 Analisis Non-Linier Metode Riwayat Waktu (FEMA 451, 2006)

Tabel 1 Batas Perpindahan Setiap Level Kinerja Struktur (ATC-40, 1996)

<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	Structural Stability
0.01	0.01 – 0.02	0.02	0.33 V_i/P_i

Dalam penelitian ini digunakan bantuan program *ETABS* dengan data percepatan gempa untuk wilayah Semarang dengan karakteristik tanah sedang (SD) menggunakan struktur beton dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) terdiri dari 5 lantai dengan tinggi 27 meter, panjang 53 meter dan lebar 16 meter (gambar 3). Bangunan berfungsi sebagai laboratorium yang tidak memiliki ruang operasi sehingga termasuk kategori resiko III dan faktor keutamaan 1.25. berdasarkan parameter percepatan gempa bangunan termasuk kategori desain seismik “D”. Parameter percepatan gempa yang digunakan berturut-turut, $S_s = 0.864$ g, $S_I = 0.374$ g, $F_a = 1.154$, $F_v = 1.926$, $S_{DS} = 0.665$ g, $S_{DI} = 0.480$ g, $T_0 = 0.144$ detik, $T_S = 0.722$ detik, $T_L = 11$ detik.



Gambar 3 Denah dan Elevasi Struktur Bangunan yang ditinjau

Rekaman gempa yang digunakan adalah tiga pasang *real ground motion* yang berasal dari tiga mekanisme gempa, yaitu *shallow crustal*, *Benioff* dan *Megathrust*. Dengan ketiga mekanisme tersebut, rekaman gempa diseleksi berdasarkan jarak pusat gempa, besaran *magnitude* dan kecepatan gelombang geser yang disesuaikan dengan data deagregasi untuk kota Semarang. Tabel 2 menampilkan hasil data deagregasi gempa untuk kota Semarang, rentang *magnitude*, jarak dan kecepatan gelombang geser didapatkan dari buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia tahun 2022. Selanjutnya, rekaman gempa sesuai mekanismenya didapatkan dari data *PEER Ground Motion Data Base* untuk *shallow crustal* sedangkan data mekanisme gempa *Benioff* dan *Megathrust* didapatkan dari data *Natural Hazard Risk and Resiliency Research Center (NHR3)*.

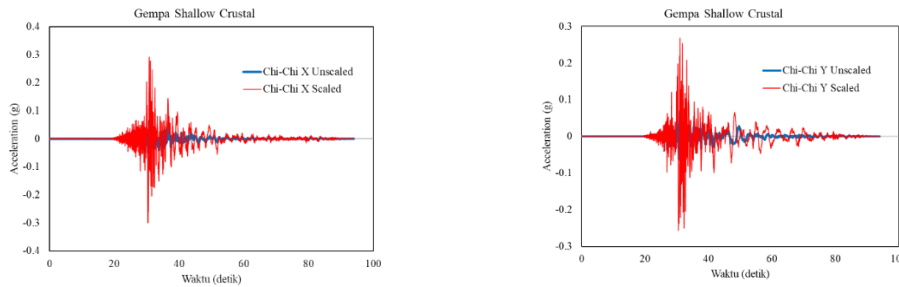
Percepatan spektrum respons dipilih 0.2 detik yang merupakan puncak respons spektrum rencana sehingga didapatkan hasil yang konservatif. Hasil rekaman gempa rencana berdasarkan kesesuaian rentang data deagregasi kota Semarang ditampilkan pada tabel 3. Selanjutnya rekaman gempa diskalakan terhadap rentan target untuk spektrum MCE_R dengan target antara $0.8 T$ batas bawah sampai $1.2 T$ batas atas.

Tabel 2 Data Deagregasi Gempa Kota Semarang (Pusat Studi Gempa Nasional, 2022)

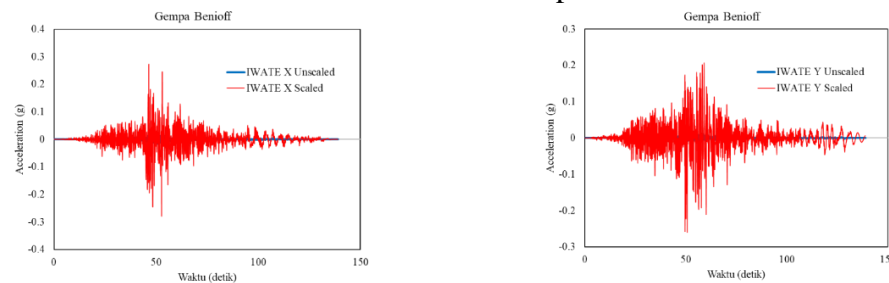
No	Mekanisme	Magnitude	Jarak (km)	Vs (m/s)
1	Shallow Crustal	6.2,6.4	20-30	175-350
2	Benioff	7.2,7.4	150-200	175-350
3	Megathrust	8.2,8.8	200-250	175-350

Tabel 3 Data Gempa yang Disesuaikan Data Deagregasi Kota Semarang

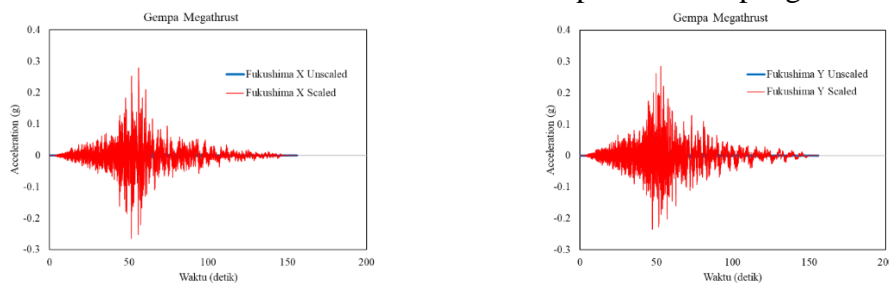
No	Mekanisme	Gempa	Tahun	M	R (km)	Vs (m/s)
1	Shallow Crustal	Chi-Chi	1999	6.2	29.23	277.5
2	Benioff	Iwate_Off	2011	7.4	189.76	261
3	Megathrust	Fukushima	2003	8.29	243.08	334.3



Gambar 4 Penskalaan Rekaman Gempa Chi – Chi - Taiwan



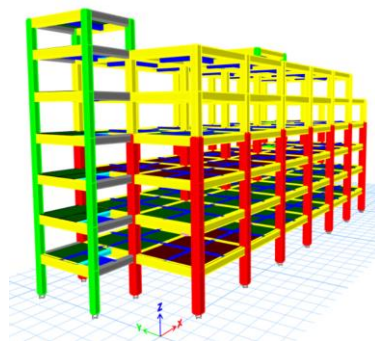
Gambar 5 Penskalaan Rekaman Gempa Iwate - Jepang



Gambar 6 Penskalaan Rekaman Gempa Fukushima - Jepang

3. Hasil dan Pembahasan

Mutu beton yang digunakan adalah f_c' 25 MPa dan mutu baja tulangan f_y 420 MPa. Sistem struktur yang digunakan adalah sistem rangka pemikul momen khusus. Dimensi dan spesifikasi mutu bahan struktur diperoleh berdasarkan data *As Built Drawing* sebagai berikut:



Gambar 7 Dimensi dan Model Tiga Dimensi Struktur

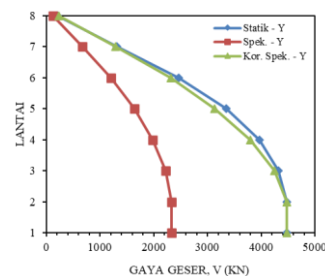
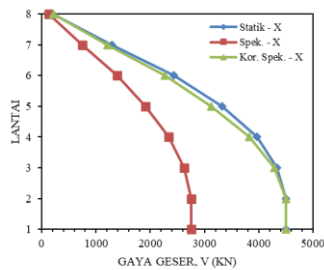
Kolom utama

Lantai dasar-lantai 2 = 700 x 700 mm
Lantai 3-lantai 4 = 600 x 600 mm
Lantai 5 = 500 x 500 mm
Balok Induk = 350 x 700 mm
Balok anak = 300 x 600 mm
Pelat lantai = tebal 120 mm

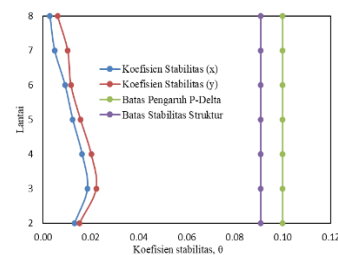
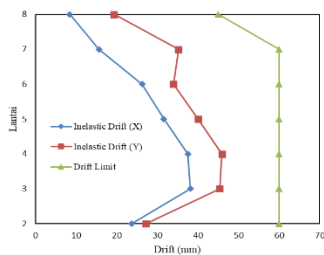
Sesuai pasal 7.7.3 SNI 1726-2019 , struktur harus berperilaku translasi pada dua mode pertama dan diijinkan berotasi pada mode ketiga yang ditampilkan pada tabel 4. Setelah partisipasi massa ragam mencapai 100% dilanjutkan dengan perhitungan gaya gempa metode statik ekuivalen dan metode respons spektrum dengan faktor skala awal respons spektrum 1.533 m/s^2 selanjutnya dievaluasi dengan gaya geser seismik hasil analisis statik.

Tabel 4 Partisipasi Massa Modal

Kasus	Mode	Periode (detik)	UX (%)	UY (%)	SumUX (%)	SumUY (%)	RZ (%)	SumRZ (%)
Modal	1	1.09	0.00%	73.34%	0.00%	73.34%	6.29%	6.29%
Modal	2	0.973	80.15%	0.01%	80.15%	73.35%	0.01%	6.30%
Modal	3	0.906	0.02%	6.16%	80.18%	79.51%	73.60%	79.91%
Sebagian tidak ditampilkan								
Modal	19	0.065	0.00%	0.75%	99.26%	99.96%	0.00%	99.26%
Modal	20	0.064	0.74%	0.00%	100.00%	99.97%	0.00%	99.26%
Modal	21	0.059	0.00%	0.03%	100.00%	100.00%	0.74%	100.00%
Modal	22	0.016	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	0.00%	100.00%



Gambar 8 Gaya Geser Antar Lantai Arah X dan Arah Y



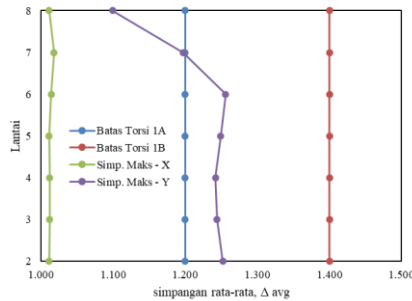
Simpangan Antar Lantai

Stabilitas terhadap P - Delta

Gambar 9 Simpangan antar lantai dan Stabilitas terhadap P-Delta

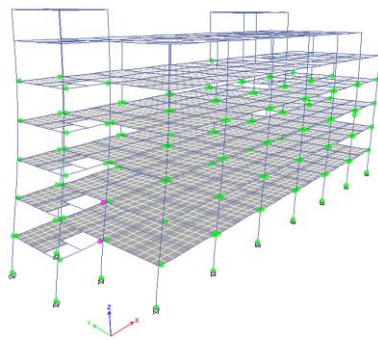
Gaya geser rencana untuk analisis dinamik memenuhi persyaratan 100% gaya geser metode statik ekuivalen yang ditunjukkan pada gambar 8. Selanjutnya struktur dicek terhadap simpangan antar tingkat dan efek P- delta yang ditampilkan

pada gambar 9 dan gambar 10 yang telah memenuhi persyaratan terhadap simpangan ijin meskipun mempunyai ketidakberaturan torsi pada arah sumbu Y bangunan (gambar 11). Dengan adanya ketidakberaturan torsi, maka faktor redundansi yang digunakan adalah 1.3 dan memperhitungkan pembesaran momen akibat torsi.

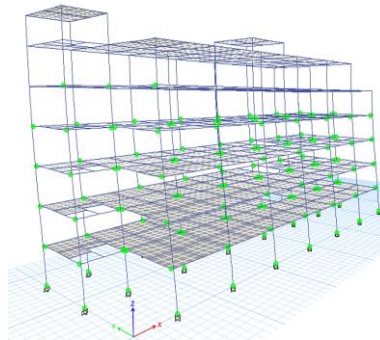


Gambar 10 Cek Ketidakberaturan Torsi

Selanjutnya, setelah memenuhi syarat penulangan dilakukan pemasangan sendi plastis sesuai kapasitas penampang. Gambar 12 dan gambar 13 menunjukkan pembentukan sendi plastis pada tahap akhir analisis push-over. Hasil dari *performance point* pada kurva spektrum kapasitas ditampilkan pada gambar 14 untuk arah X dan gambar 15 untuk arah Y.

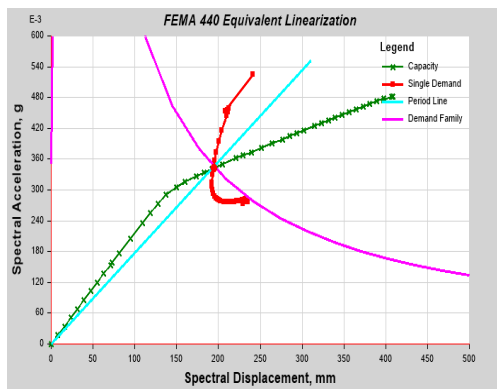


Pembentukan Sendi Plastis pada Tahap Akhir Pushover Arah X

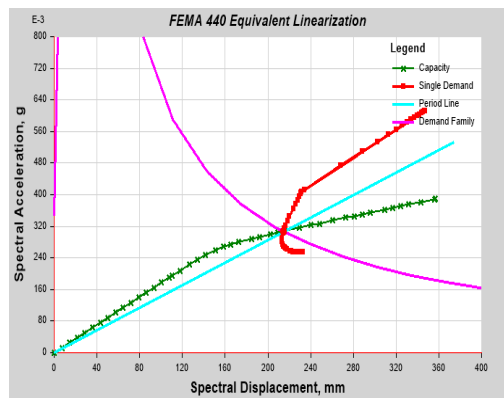


Pembentukan Sendi Plastis pada Tahap Akhir Pushover Arah Y

Gambar 11 Pembentukan Sendi Plastis

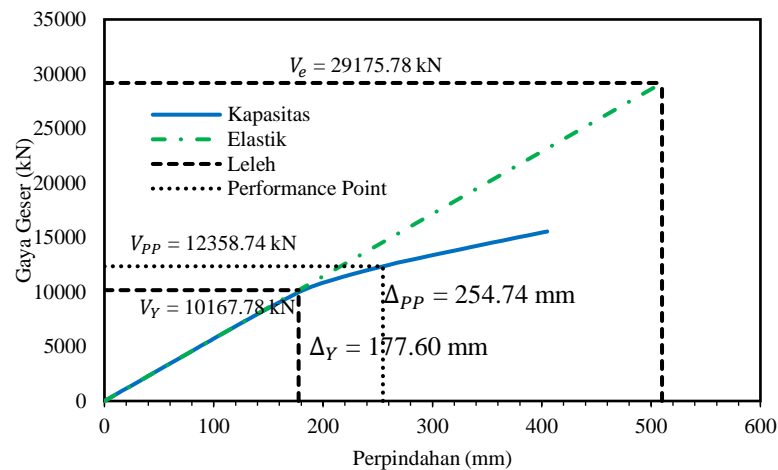


Kurva Spektrum Kapasitas Arah X

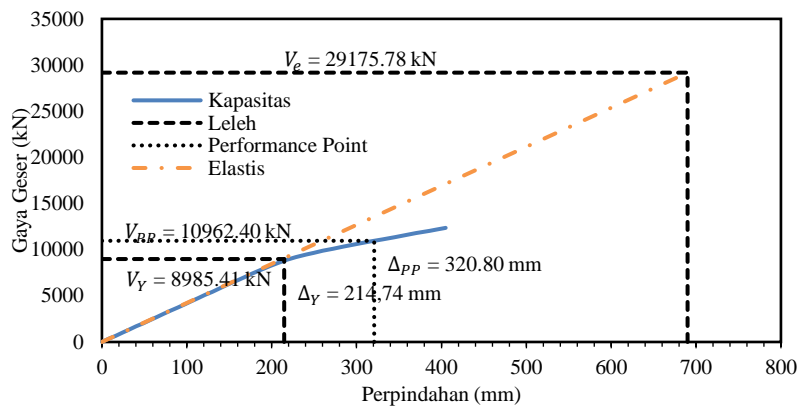


Kurva Spektrum Kapasitas Arah Sumbu Y

Gambar 12 Kurva Spektrum Kapasitas



Gambar 13 Hasil Respons Struktur Arah Sumbu X



Gambar 14 Hasil Respons Struktur Arah Sumbu Y

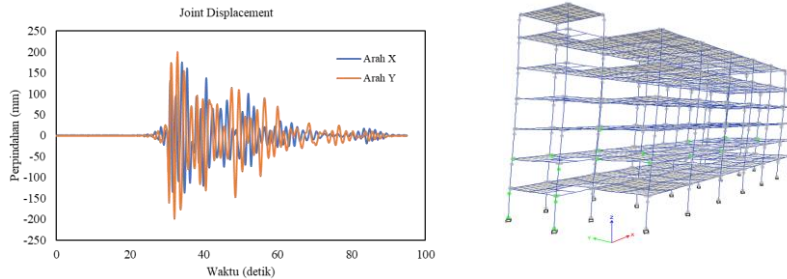
Tabel 5 Perbandingan Parameter Respons Struktur

Parameter	Arah X	Arah Y	SNI 1726-2019
R	7.08	7.98	8
Ω_0	3.45	2.76	3
C_d	6.18	5.71	5.5

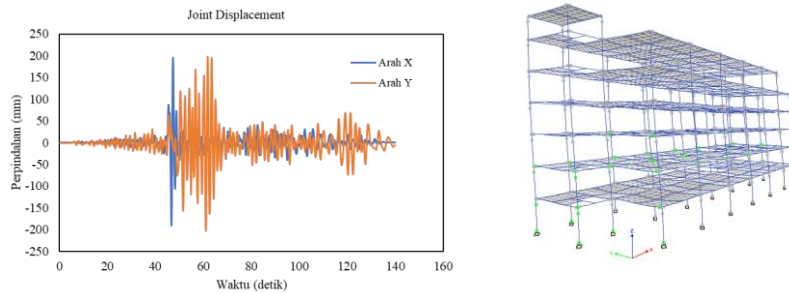
Hasil idealisasi respons struktur berbasis gaya pada tabel 5 dengan parameter desain awal (SNI 1726-2019) baik arah X dan arah Y nilai R kurang dari nilai R desain, lebih lanjut pada arah Y nilai Ω_0 kurang dari nilai Ω_0 desain. Namun periode getar struktur yang dihasilkan lebih besar dari periode puncak respons spektrum (T_s), sehingga idealisasi respons struktur dapat ditinjau dengan pendekatan berbasis perpindahan (*equal displacement*) dengan nilai R aktual (R_d) lebih besar dari 1 dengan demikian parameter struktur masih memenuhi persyaratan (Budiono, 2017). Level kinerja struktur jika ditinjau dari rasio perpindahan maksimum terhadap tinggi bangunan termasuk kategori *damage control* atau peralihan antara *immediate occupancy* ke *life safety* untuk gempa kuat dengan periode ulang 2500 tahun (MCE_R).

Selain analisis non linier push-over, juga dilakukan analisis non linier riwayat waktu (*time history*) dengan sendi plastis dan data penampang mengikuti masukan

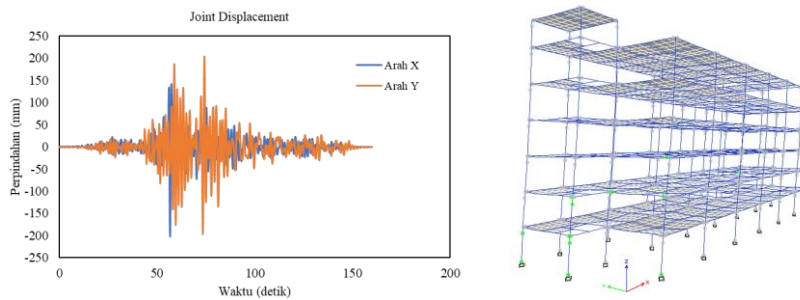
dari *pushover*, analisis digunakan metode integrasi langsung dengan beban mati (D_L) dan beban hidup (L_L) sebagai kondisi awal (*initial condition*) dengan rekaman gempa Chi-Chi, Iwate dan Fukushima sesuai dengan tabel 3. Hasil respons struktur terhadap gempa diperlihatkan pada gambar 18 hingga gambar 20 dengan perpindahan terbesar terjadi akibat gempa Fukushima sebesar 202.188 mm pada saat $t = 56.7$ detik.



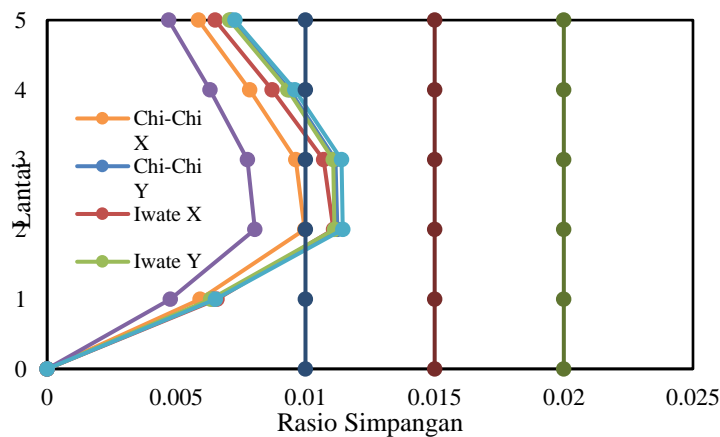
Gambar 15 Respons Struktur Akibat Gempa Chi – Chi Taiwan



Gambar 16 Respons Struktur Akibat Gempa Iwate - Jepang



Gambar 17 Respons Struktur Akibat Gempa Fukushima – Jepang



Gambar 18 Rasio Simpangan Antar Lantai

Selanjutnya rasio simpangan (*drift ratio*) ditentukan berdasarkan perbedaan nilai perpindahan antara dua tingkat yang berdekatan dibagi dengan tinggi lantai yang ditampilkan pada gambar 21 yang dibandingkan dengan persyaratan level kinerja struktur berdasarkan ATC-40. Hasil *drift ratio* pada arah X nilai terbesar terjadi pada lantai 2 bangunan dengan nilai 0.0111 akibat gempa Iwate, selanjutnya pada arah Y *drift ratio* terbesar terjadi pada lantai 2 dengan nilai 0.0114 akibat gempa Fukushima. Berdasarkan hasil rasio simpangan tersebut, level kinerja struktur termasuk kategori *Damage Control* dengan rasio simpangan antara 0.01 – 0.02.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian analisis diatas, struktur gedung eksisting yang ditinjau memiliki ketidakberaturan torsi 1A pada arah sumbu Y bangunan, meskipun demikian simpangan yang terjadi masih dibawah simpangan ijin dan terhadap efek P-Delta sesuai persyaratan SNI 1726-2019. Kontrol kekuatan struktur dengan analisis pushover menghasilkan titik potong pada kurva spektrum kapasitas yang disebut sebagai *performance point*. Level kinerja struktur arah X termasuk kategori Immediate Occupancy dan arah Y termasuk kategori *Damage Control*. Hasil kurva respons struktur arah X dan Y menunjukkan nilai parameter sistem struktur non-linier seperti nilai R , C_d dan Ω_0 yang lebih kecil dari parameter desain sesuai SNI 1726-2019 namun memenuhi persyaratan parameter sistem struktur jika ditinjau dengan *equal displacement* untuk periode struktur lebih besar dari periode puncak respons spektrum, sehingga pada kondisi sebenarnya struktur memiliki kekuatan yang lebih besar. *Drift Ratio* hasil analisis riwayat waktu dengan tiga sumber gempa (Shallow Crustal, Benioff dan Megathrust) menghasilkan level kinerja struktur dengan kategori *Damage Control*. Sehingga dengan kategori level kinerja struktur tersebut, kinerja struktur memenuhi persyaratan berdasarkan FEMA 303 untuk bangunan laboratorium dengan kategori resiko III saat terjadi gempa kuat MCE_R (periode 2500 tahun) dan akan mengalami kerusakan struktural yang ringan dan masih dapat diperbaiki untuk difungsikan kembali.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil kesimpulan penelitian, penelitian ini hanya membahas perilaku seismik dari struktur bangunan. Selanjutnya perlu ditinjau kapasitas penampang struktur hasil analisis non-linier yang memenuhi persyaratan kriteria penerimaan (*acceptance criteria*). Sehingga kemampuan struktur pasca beban gempa dapat dijelaskan secara lebih detail dan dapat dilakukan desain perkuatan (*retrofitting*) apabila kapasitas penampang tidak memenuhi syarat akibat beban yang bekerja untuk menjamin keamanan penghuni bangunan.

Daftar Kepustakaan

- Abdu, M. (2024). *Kinerja Beban Seismik Arah Tegak Lurus Akselerasi Respons Spektrum Pada Bangunan Gedung Tidak Beraturan Vertikal Berdasar SNI-1726-2019 Studi Kasus Kota Baubau*. 22, 255–264.

- Amrullah, W., Bagio, T. H., & Tistogondo, J. (2019). Desain Perencanaan Struktur Gedung 38 Lantai Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (Srpmk). *Jurnal Ilmiah MITSU*, 7(1), 18–23. <https://doi.org/10.24929/ft.v7i1.679>
- ASCE/SEI 41-23, A. S. of C. E. (2023). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. In *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society Of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784416112>
- ATC-40. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. *Applied Technology Council*, 1, 334.
- Budiono, B. (2017). *Contoh desain bangunan tahan gempa dengan sistem rangka pemikul momen khusus dan sistem dinding struktur khusus di Jakarta*. Penerbit ITB.
- Budiono, B., & Wicaksono, E. B. (2016). Perilaku Struktur Bangunan dengan Ketidakberaturan Vertikal Tingkat Lunak Berlebihan dan Massa Terhadap Beban Gempa. *Jurnal Teknik Sipil*, 23(2), 113–126. <https://journals.itb.ac.id/index.php/jts/article/view/2932>
- Chintanapakdee, C., & Chopra, A. K. (2003). Evaluation of modal pushover analysis using generic frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(3), 417–442. <https://doi.org/10.1002/eqe.232>
- Dwi Wahyuni, S., Khamid, A., & Feriska, Y. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur Dinding Bata dengan Metode Analisis Pushover pada Bangunan Sederhana. *Infratech Building Journal (IJB)*, 2(2), 29–39.
- Elnashai, A. S. (2001). Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications. *Structural Engineering and Mechanics*, 12(1), 51–69. <https://doi.org/10.12989/sem.2001.12.1.051>
- Ertanto, B. C., Satyarno, I., & Suhendro, B. (2017). Performance Based Design Bangunan Gedung Untuk Level Kinerja Operasional. *Performance Based Design Bangunan Gedung Untuk Level Kinerja Operasional*, 13(2), 189–204.
- FEMA 273. (1997). NEHRP Guidelines and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. In *Building Seismic Safety Council* (Vol. 16, Issue 1). <https://doi.org/10.1193/1.1586092>
- FEMA 451. (2006). NEHRP Recommended Provisions: Design Examples. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Hutama, B. P. (2021). Evaluasi Kinerja Bangunan Rumah Sakit Santa Maria Pemalang dengan Non-linier Static Pushover Analysis Metode ATC-40 dan FEMA 440. *INERSIA Informasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 17(2), 118–129. <https://doi.org/10.21831/inersia.v17i2.25511>
- Kukuh Adhi Kafie, Andreas Triwiyono, Iman Satyarno, & Hu, H.-T. (2023). Seismic Performance Evaluation of Wharf Based on ASCE 61-14. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 9(September), 277–286. <https://doi.org/10.22146/jcef.6749>
- Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story. *Jurnal Sipil Statik*, 2(4), 214–224.
- Nabhilla, R., & Hayu, G. (2020). Analisis Perilaku Struktur Perkantoran Tahan Gempa Menggunakan Metode Pushover Analysis. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 6, 141–154. <https://doi.org/10.31849/siklus.v6i2.4889>

- Nugroho, F. (2016). Penerapan Analisis Pushover Untukmenentukan Kinerja Struktur Padabangunan Eksisting Gedung Beton Bertulang. *Jurnal Momentum*, 18(2), 19–25. <https://doi.org/10.21063/jm.2016.v18.2.19-25>
- Nurjannah, S. A., Hanafiah, Lestari, W., Lim, E., & Imran, I. (2020). Kinerja Struktur Sistem Tunggal dan Ganda dengan Performance Based Design. *Cantilever*, 8(2), 73–81. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v8i2.21>
- Powell, G. H. (2007). *Performance Based Design Using Nonlinear Analysis: A Practical Seminar on Nonlinear Modeling and Analysis Using CSI' PERFORM 3D Software*. Computers \& Structures Incorporated. <https://books.google.co.id/books?id=2pG6nQAACAAJ>
- Pradono, M. H. (2019). *Kajian Penerapan Standar Tahan Gempa Pada Application Assessment of the Seismic Resistant Standard on the Evaluation of Existing Structures*. 3(1), 1–9.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2022). *Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan Dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*. Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR.
- SNI 1726-2019. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.
- Tatya Putri Utami, & Niken Warastuti. (2019). Analisis Kekuatan Bangunan Terhadap Gaya Gempa Dengan Metode Pushover Studi Kasus Gedung Asrama Pusdiklat Ppatk, Depok. *Jurnal Infrastruktur*, 3(2), 99–106. <https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v3i2.709>
- Wirakusuma, I., Prasetya, M. A., & Sarya, G. (2022). Kinerja Struktur Gedung Perkuliahan 10 Lantai Berdasarkan Analisis Nonlinier Pushover dan Atc-40. *Extrapolasi*, 19(01), 35–45. <https://doi.org/10.30996/ep.v19i01.6705>
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2021). Performance-based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Moment Resisting Frame. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(3), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.005>