

Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Kantor GKI dengan Metode *Non-Linear Dynamic Time History*

Evaluation of GKI Office Building Structure Performance Using Non-Linear Dynamic Time History Method

Yosep C. Richardus¹, Elias Ferdinand², Rezky A. Wibowo³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Yapis Papua, Indonesia

Abstrak

Jayapura merupakan ibukota dari Provinsi Papua yang memiliki kondisi geologis yang kompleks, hal ini menjadikan kota jayapura sering terdampak gempa bumi akibat adanya aktifitas pergerakan lempeng tektonik. Analisis riwayat waktu digunakan untuk mensimulasikan respons struktur terhadap gempa dengan memanfaatkan data akselerogram dari kejadian gempa yang telah terjadi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi besar gaya geser di dasar struktur, perpindahan maksimum, serta simpangan antar lantai, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat kinerja struktur sesuai pedoman ATC-40. Dalam penelitian ini, studi kasus difokuskan pada Gedung Kantor GKI Sinode yang berada di Tanah Papua. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan bantuan software ETABS V.20. Data gempa masukan menggunakan gempa Amberley. Proses spectral matching dilakukan untuk menyesuaikan catatan gerakan tanah pada gempa masukan dengan spektrum respon struktur bangunan. Analisis terhadap gempa Amberley pada arah X dan Y menghasilkan gaya geser dasar sebesar 6466,45 kN. Nilai perpindahan maksimum terbesar terjadi pada lantai dak atap sebesar 39,930 mm. Pada lantai 5, simpangan antar lantai akibat gempa Amberley arah X tercatat sebesar 43,852 mm. Total drift maksimum akibat gempa Amberley tercatat sebesar 0,00156617 pada arah X dan 0,001663 pada arah Y, yang mengindikasikan bahwa kinerja struktur gedung berada pada level IO (*Immediate Occupancy*).

Kata Kunci

Getaran Seismik,
Analisis Dinamik
Nonlinear,
Kapasitas Kinerja
Struktur

PENDAHULUAN

Kota Jayapura sebagai kota yang rawan terhadap gempa bumi mengalami berbagai dampak yang melibatkan kehidupan manusia, infrastruktur, ekonomi, dan lingkungan. Waktu dan kekuatan gempa bumi tidak dapat diprediksi. Saat gempa terjadi, struktur bangunan berisiko mengalami kerusakan yang bisa mengarah pada runtuhnya bangunan (1,2). *Time history analysis* merupakan pendekatan yang mensimulasikan respons struktur terhadap data gempa berupa gerakan tanah, dengan perhitungan dilakukan secara bertahap dalam selang waktu tertentu (3,4). *Time history analysis* juga merupakan pendekatan untuk mengkaji respons dinamik struktur bangunan dengan karakteristik nonlinier akibat input gempa rencana berupa gerakan tanah (5,6). Penilaian kinerja struktur bertujuan untuk menentukan bagaimana tingkat kinerja bangunan saat mendapatkan pengaruh gaya seismik (7). Untuk mengukur bahaya gempa, kinerja seismik ditentukan berdasarkan tingkat kerusakan maksimum yang diperkenankan (*performance level*) (1). Analisis dinamik *non-linier* dengan riwayat waktu dilakukan untuk memperoleh nilai gaya geser dasar, perpindahan maksimum, dan simpangan

antar lantai, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat kinerja struktur sesuai dengan standar peraturan yang berlaku (5). Penerapan data percepatan tanah pada suatu struktur dalam analisis time history memungkinkan perhitungan variasi gaya geser antar lantai dan perpindahan selama berlangsungnya gempa rencana. Pemilihan gerak tanah (*ground motion*) dicocokkan secara spektral (*spectrally matched*) berdasarkan parameter mekanisme sumber gempa terhadap kegempaan di lokasi penelitian, yaitu subduksi *interface* (*Megathrust*), subduksi *intraslab* (*Benioff*), dan sesar dangkal (8). Rekaman gerakan tanah yang dipilih selanjutnya perlu disesuaikan skalanya berdasarkan spektrum respons percepatan desain lokal untuk rentang periode alami antara 0,2 T hingga 1,5 T (8,9). Tujuan dari langkah ini adalah agar semua mode getar yang dimiliki oleh struktur dapat tercakup dalam analisis riwayat waktu. Teknik penskalaan gerakan tanah ini dikenal dengan istilah metode penyesuaian spektra (*spectral matching*) (8). Perencanaan beban untuk gedung harus mempertimbangkan penggunaan berbagai jenis beban yang diperbolehkan, seperti beban mati, beban hidup, dan beban gempa (7). Beban mati mencakup seluruh beban yang berasal dari berat struktur bangunan itu sendiri, termasuk elemen-elemen tambahan yang bersifat tetap dan menjadi bagian integral dari bangunan, seperti pelat, balok, dan kolom (9).

METODOLOGI PENELITIAN

Data Gedung

Gedung GKI Sinode yang berlokasi di Tanah Papua dijadikan sebagai objek dalam penelitian ini yang berlokasi di Jl. Argapura No.15, Kelurahan Argapura, Distrik Jayapura Selatan. Gedung tersebut difungsikan sebagai gedung perkantoran 7 lantai dengan panjang 28,05 m dan lebar 24,5 m. Jenis struktur yang digunakan adalah material utama pada struktur ini berupa beton bertulang dengan tingkat kekuatan sesuai standar K300 ($f'c$ 25 MPa), serta tulangan baja tipe BjTS 420A dan BjTP 280. Elemen struktur yang dianalisis meliputi balok, kolom, dan pelat lantai, yang dirinci dalam tabel berikut:

Tabel 1. Tipe dan Dimensi Balok

No.	Tipe Balok	Dimensi (mm)
1.	B1	400 x 700
2.	B2	300 x 600
3.	B3	250 x 500
4.	B4	200 x 400
5.	B5	150 x 400

Tabel 2. Tipe dan Dimensi Kolom

No.	Tipe Kolom	Dimensi (mm)
1.	K1	800 x 800
2.	K2	600 x 800
3.	K3	400 x 800
4.	K4	300 x 600
5.	K5	200 x 500

Tabel 3. Tipe Pelat Lantai

No.	Tipe Plat Lantai	Tebal (mm)
1.	S1	150
2.	S2	130

Gaya Geser Dasar (*Base Shear*)

Dalam SNI 1726-2019, gaya geser dasar seismik untuk arah yang ditentukan harus dihitung menggunakan rumus yang tertera :

$$V = C_S \cdot W \quad (1)$$

Keterangan :

V = gaya geser dasar

C_S = koefisien respons

W = berat seismik efektif

Nilai C_S dalam persamaan 2 ditentukan dengan persamaan ;

$$C_S = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2)$$

Keterangan :

S_{DS} = parameter percepatan spektral pada rentang periode pendek

R = koefisien modifikasi respond

I_e = faktor keutamaan gempa

Kontrol terhadap simpangan antar lantai di dalam struktur gedung diperlukan, sehingga simpangan yang terjadi tidak melebihi batas maksimal yang diperkenankan. (Δ ijin) (3).

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \Delta_x}{I_e} \quad (3)$$

Keterangan :

δ_x = perpindahan yang diperbesar pada lantai yang ditinjau

C_d = faktor pembesaran simpangan lateral

I_e = faktor keutamaan gempa

Δ_x = simpangan tingkat ke-x

δ_{ex} = perpindahan elastik akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan

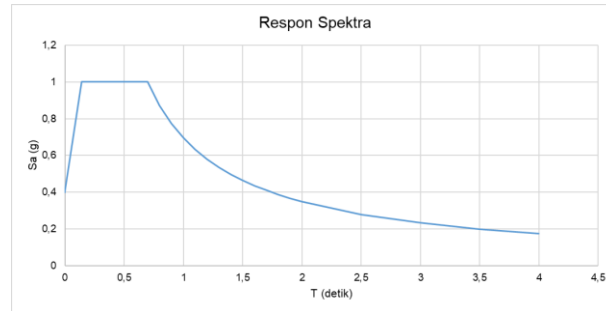
Adapun nilai dari simpangan yang diizinkan tidak boleh melebihi batas tersebut yang diatur berdasarkan tabel dalam SNI 1726-2019.

Level Kinerja Struktur

Penentuan level kinerja struktur berdasarkan ATC-40 mengacu pada perpindahan atap, dan salah satu parameter yang digunakan adalah *total drift* maksimum.(10). Besar *drift index* tergantung pada beban yang bekerja pada struktur. Batasan level kinerja dapat ditetapkan dalam ATC-40.

Data Percepatan Tanah

Parameter percepatan tanah dapat ditentukan melalui website Desain Spektra Indonesia dengan memasukkan titik koordinat pada lokasi penelitian. Percepatan tanah yang tercatat memiliki spektral percepatan untuk periode pendek (S_s) memiliki nilai 1,5000 g, dan spektral percepatan pada periode 1 detik (S_1) adalah 0,6140.



Gambar 1. Grafik Respons Spektrum

Perhitungan Pembebanan

Perhitungan pembebanan menggunakan standar peraturan di Indonesia yaitu menurut SNI 1727-2020 dan SNI 1726-2019. Beban yang dihitung mencakup beban mati, beban hidup, dan beban akibat gempa. Penentuan parameter gempa dilakukan agar mendapatkan grafik respons spektrum.

Pemodelan Struktur dengan *Software ETABS V.20*

Model struktur yang digunakan berupa *portal open frame*, dengan *shear wall* (dinding geser) dimasukkan dalam pemodelan 3D.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cek Kontrol Struktur

Dalam SNI Gempa 1726-2019, diatur bahwa jumlah ragam getar yang diperhitungkan dalam penjumlahan respons harus berkontribusi pada partisipasi massa setidaknya 90%.

Tabel 1. Partisipasi Massa

Mode	Periode	Sum UX	Sum UY
1	1,359	0,0098	0,594
2	1,331	0,0146	0,7409
3	1,291	0,7819	0,7442
4	0,39	0,8666	0,7454
5	0,385	0,8962	0,7479
6	0,361	0,8963	0,8786
7	0,217	0,9312	0,8787
8	0,202	0,9313	0,9111
9	0,194	0,9324	0,9128
10	0,169	0,943	0,9131
11	0,155	0,958	0,9138
12	0,148	0,9581	0,944

Tabel di atas menunjukkan bahwa rasio total partisipasi massa dengan dua belas ragam getar telah memenuhi ketentuan SNI 1726:2019, dengan faktor partisipasi massa mode efektif minimum sebesar 90%. Partisipasi massa mode efektif pada mode kedelapan mencapai 93,13% untuk arah X dan 91,11% untuk arah Y.

Pemilihan Gerak Tanah

Dari hasil pemilihan gerak tanah didapatkan nilai magnitudo 7,8-8 SR dengan jarak 20-30 km berdasarkan subduksi interface (*Megathrust*). Berdasarkan parameter tersebut diambil catatan rekaman gempa yang mempunyai nilai magnitudo dan jarak yang mirip dengan parameter sebelumnya. Dari hasil pengumpulan data pada website <https://www.risksciences.ucla.edu> didapatkan bahwa gempa amberley memiliki kecocokan dengan parameter mekanisme sumber gempa terhadap kegempaan di lokasi penelitian.

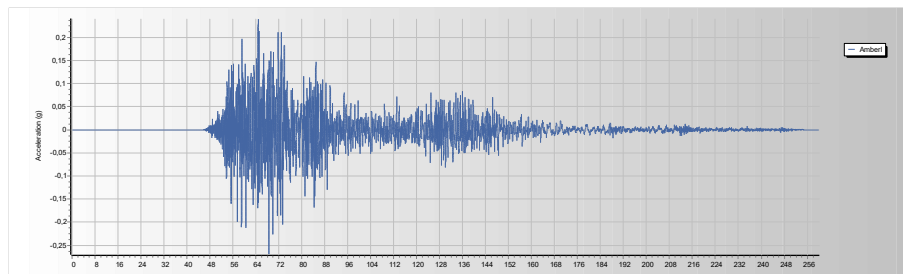
Tabel 2. Data Gempa Amberley

RSN	Event	Lokasi	Tahun	M	R (km)
5004250	Amberley	New Zealand	2016	7.85	26.92

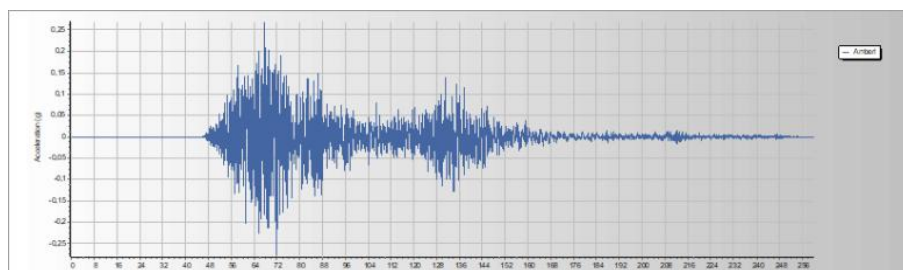
Data yang diambil berupa nilai percepatan tanah pada arah X dan Y, kemudian data tersebut diinput kedalam software *seismomatch* untuk memuat akselerogram dari gempa yang ditinjau.

Spectral Matching

Hasil dari pemilihan gerak tanah berupa akselerogram pada lokasi gempa yang ditinjau, Grafik yang memvisualisasikan hubungan antara percepatan permukaan tanah (PGA) dengan durasi waktu gempa. Data akselerogram ini menjadi parameter input gempa untuk keperluan perancangan atau analisis struktur. Input gaya gempa yang digunakan adalah percepatan maksimum permukaan tanah (PGA) yang tercatat dalam rekaman gempa. Berikut ini adalah gambar akselerogram dari gempa yang ditinjau yang dimuat dalam software *seismomatch*.

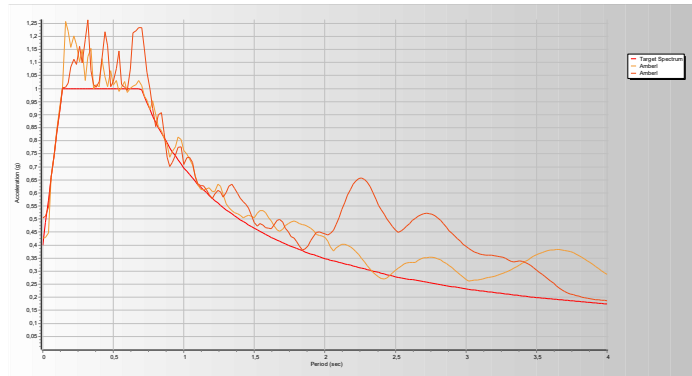


Gambar 2. Akselerogram Gempa Amberley X



Gambar 3. Akselerogram Gempa Amberley Y

Spectral matching dilakukan untuk menyesuaikan catatan Gerakan tanah sehingga respon percepatan spektral cocok dengan spektrum respon target.



Gambar 4. Akselerogram Gempa Amberley Y

Gaya Geser Dasar

Berdasarkan SNI 1726:2019 bahwa untuk perbandingan gempa statik ekuivalen dengan gempa dinamik memiliki syarat $100\% V_{\text{statik}} \geq V_{\text{Dinamik}}$. Gaya geser dasar statik dapat ditentukan dengan parameter:

$$\begin{aligned} \text{koefisien respons } (C_S) &= 0,1174 \\ \text{berat seismik efektif } (W) &= 55.073 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan berdasarkan persamaan 1 pada jurnal ini didapatkan nilai V_x sebesar 6466,45 kN dan nilai V_y sebesar 6466,45 kN. Hasil analisis gaya geser dinamik pada *software ETABS V.20* mendapatkan nilai $V_{t,x}$ sebesar 2299,70 kN dan nilai $V_{t,y}$ sebesar 114,50 kN.

Dari analisis yang dilakukan, didapatkan bahwa gaya geser dasar dinamik untuk gempa Amberley di arah X dan Y ($V_{t,x}$ dan $V_{t,y}$) lebih rendah dari 100% gaya geser statik (V), sehingga nilai V_t perlu dikalikan dengan faktor skala. Sesuai dengan SNI 1726:2019, apabila gaya geser dasar hasil analisis dinamik (V_t) kurang dari gaya geser statik (V) sebesar 100%, maka gayanya dikalikan dengan faktor V/V_t .

$$f_x = \frac{V_x}{V_{t,x}} = \frac{6466,45}{2299,70} = 2,82 \quad (6)$$

$$f_y = \frac{V_y}{V_{t,y}} = \frac{6466,45}{114,50} = 56,477 \quad (7)$$

Nilai koreksi gaya geser dasar pada gempa Amberley X dan Y dikalikan dengan skala factor skala awal sehingga didapatkan bahwa perbandingan gaya geser dasar gempa statik ekuivalen dengan gempa dinamik telah memenuhi syarat $100\% V_{\text{statik}} \geq V_{\text{dinamik}}$.

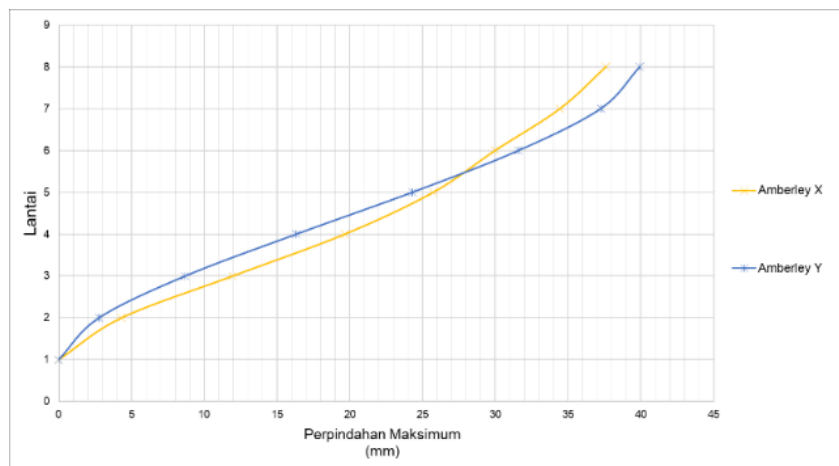
Tabel 3. Hasil Koreksi Gaya Geser Dasar

Nama Gempa	Geser Dasar Statik V (kN)	Geser Dasar Dinamik V_t (kN)	Faktor Skala Awal f_x	Syarat SNI $V_t > V$ ($V_t \times f_x$)	Keterangan
Amberley X	6466,45	2299,7	2,81	6466,44	OK
Amberley Y	6466,45	114,5	56,48	6466,56	OK

Tabel 4. Perpindahan Maksimum pada Gempa Amberley

Lantai	Elevasi	Arah X	Arah Y
	(m)	(mm)	(mm)
Lantai Dak Atap	24	37,588	39,930
Lantai Atap	21	34,434	37,246
Lantai 6	17,5	29,980	31,602
Lantai 5	14	25,727	24,298
Lantai 4	10,5	19,652	16,325
Lantai 3	7	11,958	8,698
Lantai 2	3,5	4,319	2,773
Lantai 1	0	0,000	0,000

Grafik perpindahan maksimum yang diperoleh dari rekaman gempa padat gambar dibawah ini:

**Gambar 5.** Grafik Perpindahan Maksimum Gempa Amberley

Hasil analisis menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terbesar terjadi pada lantai dak atap yang disebabkan oleh gempa Amberley arah Y dengan nilai perpindahan maksimum sebesar 39,930 mm.

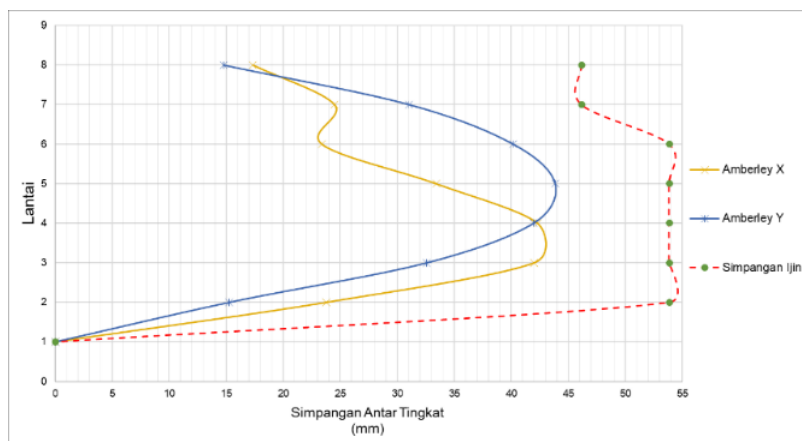
Simpangan Antar Lantai

Drift (simpangan) merujuk pada perpindahan lateral antar dua lantai yang berdekatan pada bangunan, atau bisa juga dijelaskan sebagai defleksi horizontal setiap tingkat bangunan. Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan struktur, diperlukan kontrol nilai defleksi pusat massa di suatu tingkat.

Tabel 5. Kontrol Simpangan Ijin pada Gempa Amberley

Story	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastic Drift		Drift Limit	Cek
	δ_{eX}	δ_{eY}	δ_{eX}	δ_{eY}		Δ_X	Δ_Y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
8	37,588	39,930	3,154	2,684	3000	17,347	14,762	46,154	OK
7	34,434	37,246	4,454	5,644	3000	24,497	31,042	46,154	OK
6	29,980	31,602	4,253	7,304	3500	23,392	40,172	53,846	OK
5	25,727	24,298	6,075	7,973	3500	33,413	43,852	53,846	OK
4	19,652	16,325	7,694	7,627	3500	42,317	41,949	53,846	OK
3	11,958	8,698	7,639	5,925	3500	42,015	32,588	53,846	OK
2	4,319	2,773	4,319	2,773	3500	23,755	15,252	53,846	OK
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	OK

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh bahwa nilai simpangan antar lantai untuk semua rekaman gempa telah berada dalam batas simpangan antar tingkat yang diizinkan. Grafik yang menunjukkan batas Simpangan antar lantai yang terjadi pada setiap rekaman gempa dapat dilihat pada diagram berikut ini.

**Gambar 6.** Simpangan Antar Lantai pada Gempa Amberley

Dari gambar 6 disimpulkan bahwa pada saat gempa Amberley dengan arah X, lantai 4 mengalami nilai drift antar lantai tertinggi dengan nilai *Inelastic Drift* sebesar 41,948 mm.

Level Kinerja Struktur

Level kinerja struktur Penentuan dilakukan sesuai *total drift* maksimum, yakni perbandingan antara drift atap dan tinggi keseluruhan struktur.

Level kinerja struktur dalam *ATC-40* pada gempa Amberley Y adalah sebagai berikut

$$\text{Maximum total drift} = \frac{39,930}{2400} = 0,00166375 \text{ (Immediate Occupancy)} \quad (8)$$

Level kinerja struktur dalam *ATC-40* pada gempa Amberley X adalah sebagai berikut

$$\text{Maximum total drift} = \frac{37,588}{2400} = 0,00156617 \text{ (Immediate Occupancy)} \quad (9)$$

Dari hasil perhitungan *maximum total drift* maka penentuan level kinerja struktur berdasarkan tabel 2 dalam jurnal ini, struktur gedung masuk kedalam kategori *Immediate Occupancy (IO)*, Struktur tidak menunjukkan kerusakan besar, dengan kekakuan dan kekuatannya masih mendekati kondisi awal sebelum gempa. Komponen *non-struktural* tetap terpasang dan berfungsi secara umum apabila utilitas tersedia. Fungsi bangunan tetap berjalan normal tanpa kendala perbaikan.

KESIMPULAN

Gaya geser dasar maksimum yang dialami struktur akibat gempa Amberley pada arah X dan Y tercatat sebesar 6466,45 kN. Perpindahan maksimum tertinggi terjadi pada dak atap, disebabkan oleh gempa Amberley arah Y, dengan nilai mencapai 39,930 mm. Simpangan antar lantai tertinggi tercatat pada lantai 5 akibat gempa Amberley arah X, yaitu sebesar 43,852 mm. Meskipun demikian, semua pada arah X maupun Y, nilai *drift* antar lantai masih tergolong aman karena tidak melebihi batas yang ditentukan yang diperbolehkan sesuai dengan SNI 1726-2019. Berdasarkan evaluasi kinerja struktur mengacu pada ATC-40, total drift maksimum akibat gempa Amberley adalah 0,00156617 untuk arah X dan 0,001663 untuk arah Y. Dengan demikian, struktur bangunan dikategorikan Masuk dalam kategori tingkat kinerja *immediate occupancy*, artinya setelah gempa tidak terjadi kerusakan signifikan pada elemen struktur. Komponen non-struktural tetap terpasang dan sebagian besar tetap berfungsi dengan baik apabila sistem utilitas tersedia. Bangunan masih layak digunakan tanpa memerlukan tindakan perbaikan khusus pasca-gempa.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ramadhanti F, Adeswastoto H, Setiawan B. Analisis Kerentanan Bangunan Terhadap Bencana Dengan Rapid Visual Screening. J TAPAK [Internet]. 2020;10(1):1–15. Available from: <https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/tapak/article/view/1321>
2. Adeswastoto H, Djauhari Z, Suryanita R. Evaluasi Kerentanan Bangunan Gedung Terhadap Gempa Bumi Berdasarkan Asce 41-13. SIKLUS J Tek Sipil. 2017;3(2):86–99.
3. Fadilah HM, Walujodjati E. Perbandingan Pembebanan Gempa Bangunan Bertingkat Menggunakan Analisis Static Equivalent dan Analisis Dynamic Time History di Kab. Garut. J Konstr. 2020;18(1):20–30.
4. Syaiful Anam, Bantot Sutriyono, Retno Trimurtiningrum. 922-Article Text-2449-1-10-20200427. Stud Perbandingan Kinerja Gedung Bet Bertulang Srp mk 6 Lantai Dengan Menggunakan Metod Pushover Dan Nonlinear Time Hist Anal. 2020;8(1):33–41.
5. Glorie SM, Luis V, Muljati I, Pudjisuryadi P. Evaluasi Kinerja Metode Direct Displacement Based Design Dan Force Based Design Pada Bangunan Vertical Setback 6 Lantai. J Dimens Pratama Tek Sipil. 2014;2(2):1–8.
6. Wirawan NB, Apriwelni S. Structural Failure Analysis of Building E ITERA Due to The Pounding Effect with Non-Linear Time History. J Saintis. 2020;20(01):35–46.
7. RSNI2 1727. RSNI2 1727:2018 Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Badan Standarisasi Nas [Internet]. 2018;196. Available from: www.bsn.go.id
8. PuSGeN T. Disusun oleh : Pusat Studi Gempa Nasional Kerjasama : 2022. 1–431 p.
9. Hartanto MO, Cliff KV, Ghewa GJP, Widjaja WS. Analisis Perbandingan Perilaku Struktur Gedung Tanpa Dan Dengan Dinding Geser Pelat Baja Menggunakan Metode

- Non-Linear Time History Analysis. Konf Nas Tek Sipil. 2024;1(3):16–7.
10. ATC 40. ATC 40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Redwood City California. Seism Saf commisionion. 1996;1(November 1996):334.