

Evaluasi kinerja seismik menggunakan analisis riwayat waktu berbasis penyesuaian spektral

Fanza Dwinandatyan Reynata Nugraha^{1,*}, Astriana Hardawati¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Article Info

Available online

Keywords:

Seismic performance
evaluation
Linear Time History
Analysis
Spectral matching
Story drift
FEMA 356 performance
level
soft soil
SNI 1726:2019

Corresponding Author:

Fanza Dwinandatyan
Reynata Nugraha
22511151@students.uii.ac.id

Abstract

Indonesia's high seismicity and soft soil condition (Site Class SE) in Surabaya necessitate a rigorous seismic evaluation of vital facilities. This study evaluates the seismic performance of the 5-story BKD East Java Province building, a reinforced concrete structure utilizing a dual system, using Linear Time History Analysis (LTHA) with Spectral Matching. Seven historical ground motions were scaled to the SNI 1726:2019 design spectrum following the NIST GCR 11-917-15 guidelines, employing seven ground motions permits the evaluation of structural responses based on their average values. The evaluation focused on base shear, story drift, and FEMA 356 performance levels. The results demonstrate that the dynamic base shear from all matched records fulfilled the minimum equivalent static requirement. The X direction response was more critical than the Y direction. The average story drifts were 0.0158 (X) and 0.0117 (Y), both strictly complying with the SNI 1726:2019 allowable limit of 0.02. According to FEMA 356 criteria, the building performs at the Immediate Occupancy (IO) level for stories 1 and 2 in both directions. However, the drifts for stories 3 through 5 in both X and Y directions exceeded the IO limit, reaching the Life Safety (LS) level. Since global building performance is governed by the most critical structural response, the overall seismic performance level is categorized as Life Safety (LS). Ultimately, the structural stiffness satisfies current code requirements and exhibits adequate capacity to withstand dynamic seismic loads.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Indonesia termasuk negara dengan tingkat kegempaan tinggi akibat posisinya yang berada di zona subduksi dan pertemuan lempeng tektonik utama dunia (Irsyam dkk., 2020). Secara geografis, wilayah ini dikelilingi oleh tiga lempeng besar, yakni Lempeng Indo-Australia di selatan, Lempeng Eurasia di utara, dan Lempeng Pasifik di timur. Kondisi ini menuntut perencanaan struktur bangunan yang tidak hanya mampu menahan beban vertikal, tetapi juga harus mampu merespons beban gempa secara dinamis. Dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa, Kota Surabaya menjadi salah

satu wilayah tinjauan yang krusial. Berdasarkan data penyelidikan tanah, lokasi studi kasus masuk dalam klasifikasi situs tanah lunak (Kelas SE). Karakteristik tanah lunak ini sangat rawan memicu adanya amplifikasi gelombang gempa atau *site amplification* (Kramer, 1996). Pengaruh fleksibilitas tanah terhadap respons struktur bertulang juga telah dikaji oleh Jayalekshmi dan Chinmayi (2016), di mana getaran dari batuan dasar akan membesar secara signifikan saat mencapai permukaan dan memberikan gaya inersia yang lebih merusak pada struktur bangunan. Lebih lanjut, respons spektrum pada periode pendek di atas tanah lunak terbukti dipengaruhi oleh karakteristik skenario gempa yang terjadi (Stafford, dkk

2017). Penelitian ini mengambil objek studi pada Gedung Badan Kepegawaian Daerah (BKD) Provinsi Jawa Timur, yaitu struktur beton bertulang lima lantai yang beroperasi sebagai fasilitas perkantoran pemerintah. Dikarenakan infrastruktur vital pemerintahan, keandalan struktural gedung ini terhadap ancaman gempa menjadi aspek yang krusial. Oleh karena itu, evaluasi kinerja seismik harus dilakukan untuk menilai apakah kapasitas struktur eksisting memenuhi kriteria minimum pada standar gempa, yakni SNI 1726:2019. Pendekatan serupa dengan metode analisis non-linear juga telah dilakukan pada bangunan sejenis (Nugroho dan Satyarno, 2023), yang menunjukkan bahwa evaluasi kinerja seismik dinamik memberikan gambaran lebih komprehensif dibanding analisis statik.

Untuk memperoleh perilaku bangunan yang komprehensif, digunakan pendekatan analisis riwayat waktu linear (*Linear Time History Analysis* / LTHA) sebagaimana yang telah diterapkan pada evaluasi gedung eksisting oleh Suharjanto, dkk (2022). Metode ini dipilih karena lebih representatif dalam merepresentasikan interaksi dinamik struktur dibandingkan analisis statik ekuivalen maupun spektrum respons (Putra & Saputra, 2026). Pemilihan rekaman gerakan tanah dalam metode ini didasarkan pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (PusGen, 2022), sehingga gempa yang dipilih telah mewakili potensi bahaya seismik di wilayah Surabaya. Penentuan jumlah rekaman gempa mengacu pada pedoman teknis NIST GCR 11-917-15 (NIST, 2011), yaitu dipilih 7 pasang gempa. Penggunaan tujuh rekaman ini secara statistik mengizinkan evaluasi respons struktur didasarkan pada nilai rata-rata, sehingga memberikan kinerja yang lebih stabil dan representatif dibandingkan dengan penggunaan nilai maksimum.

Karakteristik frekuensi pada rekaman gempa historis jarang sesuai dengan target spektrum desain SNI. Apabila rekaman langsung digunakan, respons struktur yang diperoleh berpotensi tidak merepresentasikan kondisi nyata. Untuk mengatasi hal tersebut,

digunakan teknik penyesuaian spektral (Hancock dkk., 2006). Pendekatan ini dipilih karena mampu menyesuaikan spektrum tanpa merusak sifat *non-stationary* dari sumber aslinya, sehingga parameter alami gempa seperti durasi efektif, urutan gelombang, dan variasi amplitudo tetap terjaga dengan baik.

Melalui pendekatan dinamik tersebut, penelitian ini ditujukan untuk mengevaluasi kinerja seismik Gedung BKD Provinsi Jawa Timur. Evaluasi ditujukan untuk mengetahui tiga parameter utama, yaitu pemenuhan syarat minimum gaya geser dasar, kontrol simpangan antar-lantai serta penentuan level kinerja struktur berdasarkan pedoman evaluasi seismik FEMA 356 (FEMA, 2000).

Metode Penelitian

Jenis penelitian

Penelitian ini bersifat kuantitatif berbasis simulasi numerik. Data teknis bangunan eksisting dikumpulkan melalui studi dokumen yang diperoleh langsung dari instansi pemilik gedung.

Lokasi proyek

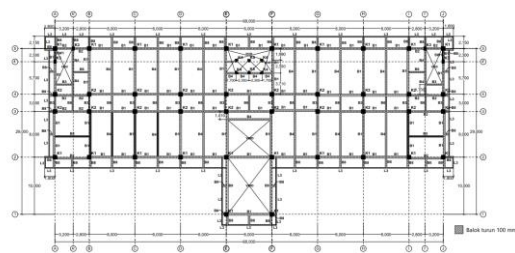
Lokasi penelitian terletak di jalan Jemur Andayani No. 1, Kelurahan Siwalankerto, Kecamatan Wonocolo, Kota Surabaya, Jawa Timur. Peta lokasi objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



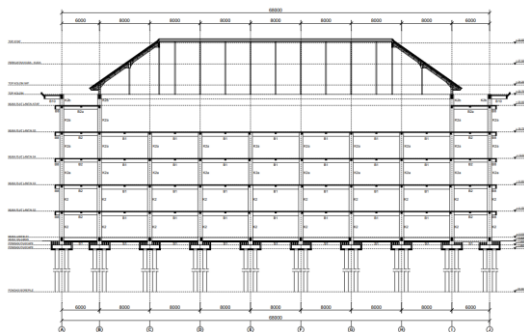
Gambar 1. Peta Lokasi Gedung BKD Jawa Timur
(Sumber: Google earth, 2026)

Data penelitian

Data penelitian yang digunakan dalam analisis ini merupakan data sekunder. Data tersebut meliputi dokumen perancangan teknis struktur, spesifikasi material, kondisi tanah dasar, serta parameter spektrum respons desain. Gedung BKD Provinsi Jawa Timur memiliki 5 lantai dengan tinggi tipikal antarlantai sebesar 4,2 meter dan elevasi total mencapai 22,7 meter. DED gedung tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Denah Lantai 2 (Elv. + 4.150)



Gambar 3. Potongan A-J

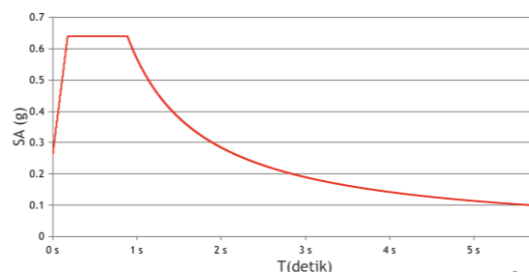
Spesifikasi material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Keterangan	Kode	Nilai	Satuan
Mutu beton	f'_c	25	MPa
Modulus elastisitas	E_c	23500	MPa
Berat jenis beton	γ_c	24	kN/m ³
Tegangan leleh BJTS	f_y	420	MPa
Tegangan leleh BJTP	f_y	280	MPa
Modulus elastisitas baja tulangan	E_s	200000	MPa

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah di lokasi proyek, evaluasi nilai N-SPT rerata pada kedalaman 30 meter diklasifikasikan ke dalam kelas situs tanah lunak (SE). Selanjutnya parameter spektrum respons desain yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Percepatan batuan dasar periode pendek	S_s	0,7	g
Percepatan batuan dasar periode 1 detik	S_1	0,31	g
Faktor Amplifikasi periode pendek	F_a	1,38	-
Faktor Amplifikasi periode 1 detik	F_v	2,6	-
Parameter respon spektral percepatan	S_{MS}	0,96	g
Parameter respon spektral percepatan	S_{M1}	0,855	g
Parameter percepatan desain periode pendek	S_{DS}	0,64	g
Parameter percepatan desain periode 1 detik	S_{D1}	0,57	g
Periode transisi pendek	T_0	0,18	detik
Batas akhir periode percepatan konstan	T_s	0,89	detik

Berdasarkan pada parameter tersebut, kurva spektrum respons desain difungsikan sebagai spektrum target dalam tahapan validasi rekaman gempa historis. Visualisasi dari kurva respons spektrum target ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Respons Spektrum Surabaya (SE)

Tahapan penelitian

1. Kajian Teori

Tahapan awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan berbagai literatur yang relevan terkait dinamika struktur, evaluasi kinerja seismik, dan analisis riwayat waktu linear. Referensi utama yang digunakan yaitu standar SNI 1726:2019, kriteria level kinerja berdasarkan FEMA 356, serta prosedur penyesuaian spektral. Selain itu, dikaji juga literatur mengenai *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dari peta deagregasi gempa bumi.

2. Pengumpulan Data

Data sekunder diperoleh dari instansi terkait secara resmi, yaitu mencakup *Detailed Engineering Drawing* (DED), rincian spesifikasi material, serta laporan penyelidikan geoteknik. Selain itu, dilakukan pengumpulan tujuh pasang data rekaman gerakan tanah historis (*ground motion*) yang diunduh dari basis data *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD).

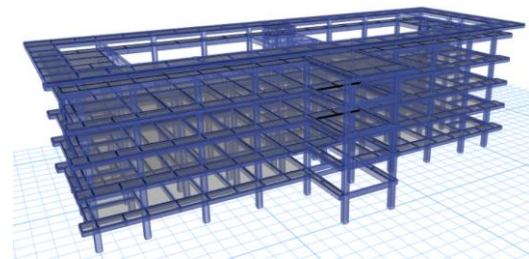
3. Justifikasi Jumlah *Ground Motion*

Jumlah rekaman gempa menggunakan analisis riwayat waktu diatur oleh SNI 1726:2019, yang mensyaratkan penggunaan 11 pasang gerakan tanah. Namun, penentuan jumlah rekaman gempa dalam studi ini mengacu pada pedoman teknis NIST GCR 11-917-15 (NIST, 2011), yaitu dipilih 7 pasang gempa. Penggunaan tujuh rekaman ini secara statistik mengizinkan evaluasi respons struktur didasarkan pada nilai rata-rata, sehingga memberikan kinerja yang lebih stabil dan representatif dibandingkan dengan penggunaan nilai maksimum. Selain itu, menurut pedoman NIST tersebut, kebutuhan jumlah rekaman minimum sangat bergantung pada tingkat kecocokan gerakan tanah terskala terhadap target spektrumnya (*goodness of fit*). Karena studi ini menerapkan teknik *spectral matching* yang menghasilkan kecocokan spektrum yang sangat tinggi dan mereduksi dispersi respons secara signifikan, penggunaan 7 pasang rekaman

dinilai sudah sangat memadai untuk mengestimasi respons rata-rata dengan tingkat keandalan yang tinggi tanpa perlu penambahan rekaman.

4. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur gedung dilakukan menggunakan perangkat lunak CSI ETABS. Proses ini mencakup pendefinisian properti material, dimensi penampang elemen, geometri struktur tiga dimensi, serta pembebanan gravitasi yang digunakan untuk mendefinisikan massa seismik bangunan. Pemodelan struktur 3D dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan 3D Gedung BKD Jawa Timur

5. Pemilihan Rekaman Gerakan Tanah

Tahapan ini diawali dengan memilih tujuh pasang data rekaman gerakan tanah historis dari basis data *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD). Kriteria pemilihan difilter secara spesifik berdasarkan rentang nilai magnitudo (M) dan jarak sumber gempa (R) di wilayah Surabaya berdasarkan hasil Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia tahun 2022. Identifikasi karakteristik seperti *pulse velocity* juga perlu diperhatikan dalam seleksi *ground motion* (Shahi dan Baker, 2014).

6. Penyesuaian Spektral

Penyesuaian spektral dilakukan untuk memodifikasi akselerogram dari ketujuh pasang rekaman gerakan tanah historis agar sesuai dengan karakteristik kegempaan lokal menggunakan *software* SeismoMatch 2024. Tujuannya adalah agar kurva respons spektrum dari tiap rekaman tersebut sesuai dengan kurva target respons spektrum. Tingkat

kecocokan ini dikontrol pada rentang periode yang disyaratkan oleh SNI 1726:2019, yaitu antara $0,8T_{lower}$ hingga $1,2T_{upper}$.

7. Analisis Riwayat Waktu Linear

Akselerogram dari ketujuh pasang gerakan tanah yang telah melalui proses penyesuaian spektral selanjutnya diinput sebagai beban dinamik pada *base* model struktur di dalam perangkat lunak ETABS.

8. Evaluasi Kinerja Seismik

Tahap terakhir adalah mengevaluasi hasil respons struktur. Dua parameter utama yang menjadi fokus evaluasi adalah gaya geser dasar dan simpangan antar-lantai. Sebelum simpangan dievaluasi, nilai respons dinamik perlu dikoreksi terlebih dahulu menggunakan faktor skala. Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, gaya geser dasar dinamik ($V_{dinamik}$) hasil analisis riwayat waktu tidak boleh kurang dari 100% gaya geser dasar statik atau respons spektrum (V_{statik}). Penyesuaian gaya dinamik ini dilakukan dengan menggunakan faktor skala baru sesuai dengan Persamaan (1):

$$\text{Faktor Skala} = \frac{V_{statik}}{V_{dinamik}} \quad (1)$$

Setelah gaya geser dasar diskalakan, evaluasi dilanjutkan pada parameter deformasi. Sesuai SNI 1726:2019, simpangan antar-lantai hasil analisis harus diperbesar untuk mendapatkan nilai simpangan aktual desain, menggunakan Persamaan (2):

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I_e} \quad (2)$$

dengan,

δ_x = Nilai simpangan aktual
 C_d = Faktor pembesaran defleksi
 δ_{xe} = Simpangan antar-lantai *software*
 I_e = Faktor keutamaan gempa
 Selanjutnya, nilai simpangan tersebut digunakan untuk menentukan level kinerja seismik berdasarkan kriteria penerimaan

pada dokumen pedoman FEMA 356. Meskipun kriteria batas kinerja FEMA 356 pada dasarnya disusun untuk pendekatan analisis nonlinear yang berbasis deformasi inelastis, aplikasinya terhadap hasil analisis riwayat waktu linear (LTHA) tetap valid. Validitas ini didasarkan pada prinsip perbesaran defleksi menurut SNI 1726:2019. Analisis linear murni hanya menghasilkan simpangan pada kondisi elastis (δ_{xe}). Berdasarkan Persamaan (2), simpangan elastis tersebut diamplifikasi menggunakan faktor pembesaran defleksi (C_d) untuk mengestimasi besaran simpangan inelastis maksimum (simpangan aktual) yang diekspektasikan terjadi saat struktur merespons gempa kuat. Oleh karena nilai simpangan antar lantai aktual yang telah diperbesar tersebut merepresentasikan prediksi respons deformasi inelastis bangunan, pemetaannya terhadap ambang batas simpangan transien FEMA 356 dapat digunakan untuk keperluan evaluasi global struktur.

Pembahasan

Pemodelan dan karakteristik dinamis struktur

Pemodelan struktur Gedung BKD Provinsi Jawa Timur dievaluasi terlebih dahulu melalui analisis modal. Berdasarkan hasil perhitungan *software* ETABS, distribusi massa tiap lantai dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Massa Seismik

Story	Berat Seismik (Ton)
1	1764,8046
2	1754,2619
3	1745,3465
4	1745,2779
5	1453,7936
Total	8463,4845

Kemudian dilakukan analisis untuk mendapatkan nilai dan karakteristik dinamis struktur yang direpresentasikan oleh periode fundamental. Hasil partisipasi massa ragam (*modal participating mass ratios*) dari model ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Partisipasi Massa Ragam dan Periode Fundamental

Mode	Periode (dtk)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	0,953	0,7491	0,0000	0,7491	0,0000
2	0,891	0,0001	0,7207	0,7492	0,7207
3	0,804	0,0122	0,0002	0,7614	0,7209
4	0,385	0,1304	0,0000	0,8918	0,7209
5	0,314	0,0000	0,1688	0,8918	0,8898
6	0,242	0,0001	0,0000	0,8919	0,8898
7	0,232	0,0618	0,0000	0,9537	0,8898
8	0,166	0,0001	0,0565	0,9538	0,9463
9	0,161	0,0210	0,0003	0,9747	0,9466
10	0,131	0,0001	0,0203	0,9749	0,9670
11	0,110	0,0241	0,0001	0,9990	0,9671
12	0,086	0,0000	0,0318	0,9990	0,9988

Hasil menunjukkan bahwa ragam ke-1 memiliki periode sebesar 0,953 detik dengan dominasi pergerakan translasi pada arah sumbu X sebesar 74,91%. Sementara itu, respons translasi dominan pada sumbu Y terjadi pada ragam ke-2 yang memiliki periode 0,891 detik. Berdasarkan evaluasi terhadap partisipasi massa, ketentuan minimum 90% yang disyaratkan dalam SNI 1726:2019 berhasil dipenuhi pada ragam ke-8. Pada ragam ini, akumulasi partisipasi massa telah mencapai 95,38% pada arah sumbu X dan 94,63% pada arah sumbu Y. Oleh karena itu, waktu getar alami pada ragam tersebut, yakni sebesar 0,166 detik, ditetapkan sebagai periode acuan untuk batas bawah. Sementara itu, periode fundamental pada ragam ke-1, yakni sebesar 0,953 detik, digunakan sebagai acuan untuk batas atas. Merujuk pada ketentuan SNI, rentang target dalam kalibrasi penyesuaian spektral ditetapkan mulai dari $0,8T_{lower}$ hingga $1,2T_{upper}$. Kalibrasi model

dapat terbukti berpengaruh signifikan terhadap respons seismik yang dihasilkan (Demir, dkk 2016). Dengan demikian diperoleh bahwa proses modifikasi rekaman gerakan tanah akan difokuskan pada rentang periode 0,133 detik hingga 1,144 detik.

Pemilihan rekaman gerakan tanah

Berdasarkan hasil pemilihan dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia tahun

2022 untuk wilayah Surabaya, diperoleh parameter target magnitudo (M) dan jarak sumber gempa (R) yang merepresentasikan potensi ancaman seismik di lokasi studi. Rekapitulasi rentang nilai target deagregasi berdasarkan mekanisme sumber gempanya, yang meliputi Benioff, *Shallow Crustal*, dan Megathrust, ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Magnitudo dan Jarak Hasil Deagregasi

Sumber Gempa	Periode Ulang	Magnitudo (PGA)	Magnitudo (0.2 dtk)	Magnitudo (3 dtk)	Jarak PGA (km)	Jarak 0.2 dtk (km)	Jarak 3 dtk (km)
Benioff	100	6.4-6.6	6.4-6.6	6.8-7	150-200	200-250	150-200
	1000	7-7.2	7-7.2	7.4-7.6	150-200	120-150	150-200
	2500	7.2-7.4	7-7.2	7.4-7.6	120-150	120-150	150-200
Shallow Crustal	100	5.2-5.4	5.6-5.8	6.8-7	60-70	60-70	50-60
	1000	5.8-6	6-6.2	7-7.2	40-50	40-50	20-30
	2500	5.6-5.8	5.8-6	7-7.2	30-40	30-40	30-40
Megathrust	100	8.4-8.6	8.2-8.4	8.2-8.4	200-250	200-250	250-300
	1000	8.6-8.8	8.6-8.8	8.4-8.6	200-250	200-250	250-300
	2500	8.6-8.8	8.6-8.8	8.4-8.8	200-250	200-250	250-300

Berdasarkan batasan parameter deagregasi tersebut, tahapan selanjutnya adalah memilih tujuh pasang rekaman gerakan tanah historis dari basis data *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD) yang merupakan bagian dari jaringan rekaman gempa NGA-West2 Ancheta, dkk (2014). Ketujuh gempa ini dipilih karena memiliki karakteristik M

dan R yang paling mendekati target ancaman seismik Kota Surabaya, serta direkam pada stasiun pemantau yang memiliki klasifikasi situs tanah lunak (SE), sesuai dengan kondisi tanah pada lokasi Gedung BKD Provinsi Jawa Timur. Daftar ketujuh gempa terpilih dapat dilihat pada Tabel 6.

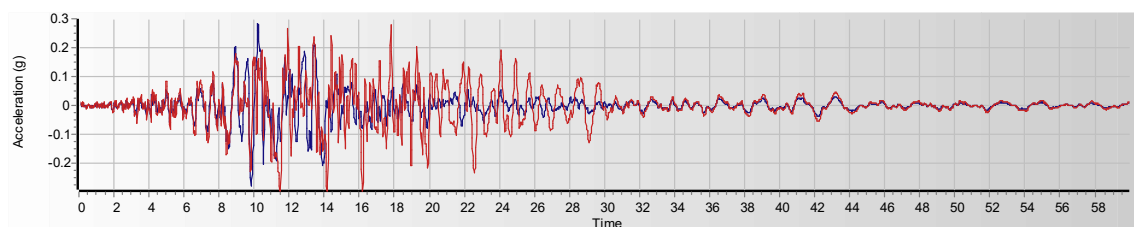
Tabel 6. Daftar Rekaman Gempa Terpilih

Sumber Gempa	Nama Gempa	Stasiun Perekam	Tahun	Magnitudo	Jarak (km)	Kelas Situs
Shallow Crustal	Hokkaido, Jepang	HKD070	2004	6.7	65.2	SE
Shallow Crustal	Loma Prieta, US	58375	1989	7.1	34.3	SE
Shallow Crustal	Morgan Hill, US	58375	1984	6.1	53.5	SE
Benioff	Chi-Chi, Taiwan	Kaohsiung (KAU045)	1999	7.6	122.5	SE
Benioff	Duzce, Turkey	Darica (DAR)	1999	7.1	150.7	SE
Megathrust	Tokachi-oki, Jepang	HKD062	2003	8.0	208.6	SE
Megathrust	Michoacan, Mexico	CAYA	1985	8.1	271.6	SE

Penyesuaian spektral

Ketujuh pasang rekaman gerakan tanah yang telah dipilih selanjutnya dimodifikasi menggunakan perangkat lunak SeismoMatch. Proses penyesuaian (*matching*) ini dilakukan menggunakan *time-domain* dengan cara menyisipkan *wavelets* pada rekaman akselerogram. Prosedur penskalaan berbasis modal juga telah dikembangkan oleh Kalkan dan Copra (2011) sebagai alternatif

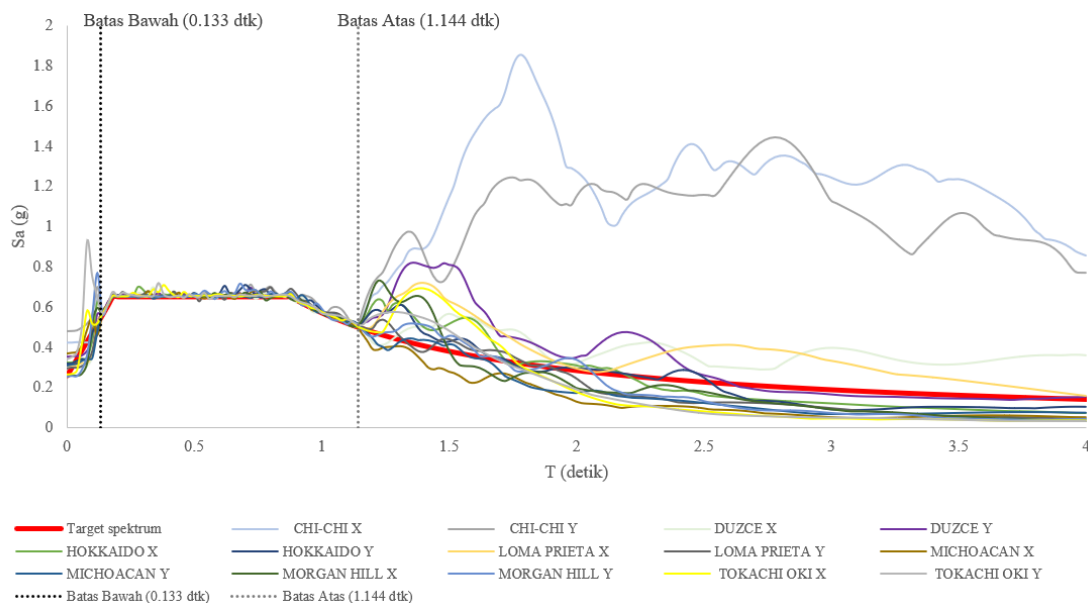
pendekatan. Metode ini dipilih untuk memastikan agar karakteristik asli dari rekaman gempa tidak mengalami perubahan yang signifikan. Sebagai representasi visual, perbandingan antara akselerogram rekaman gempa asli (*unmatched*) dan hasil modifikasi (*matched*) untuk sampel gempa Loma Prieta arah X diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Akselerogram Gempa Loma Prieta Arah X *Unmatched* (Biru) dan *Matched* (Merah)

Melalui modifikasi tersebut, kurva spektrum respons tiap rekaman gempa ditargetkan agar berhimpit dengan spektrum respons desain target. Sesuai dengan batasan evaluasi karakteristik dinamis struktur, hal ini

dikontrol pada rentang periode antara 0,133 detik hingga 1,144 detik. Hasil penyesuaian spektral dari ketujuh *ground motion* terhadap kurva target desain ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva Target dan Spektrum Respons 7 Gempa Hasil *Matching*

Analisis riwayat waktu linear

Ketujuh rekaman gerakan tanah yang telah melalui proses penyesuaian spektral selanjutnya diaplikasikan sebagai beban dinamik pada model struktur.

Gaya geser dasar

Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, parameter gaya geser dasar dinamik ($V_{dinamik}$) hasil simulasi riwayat waktu wajib dievaluasi terhadap gaya geser dasar dari analisis statik atau respons spektrum (V_{statik}). Syarat penerimaan menuntut bahwa respons dinamik rata-rata tidak boleh kurang dari 100% nilai respons statik.

Hasil gaya geser dasar awal (*unscaled*) dari model menunjukkan bahwa seluruh rekaman gempa menghasilkan respons yang jauh melampaui batas minimum tersebut. Untuk menghindari *over-design* pada elemen struktur akibat respons dinamik yang melebihi target minimum, dilakukan penyesuaian menggunakan faktor skala baru dengan Persamaan (1). Penskalaan ini bertujuan agar nilai gaya geser dasar dinamik akhir dari masing-masing gempa ekuivalen dan tepat berada pada rasio 100% terhadap V_{statik} acuan. Rekapitulasi penskalaan gaya geser

dasar pada arah X dan Y ditunjukkan pada Tabel 7.

Berdasarkan Tabel 7, dapat disimpulkan bahwa penggunaan faktor skala yang baru telah berhasil mengoreksi respons struktur. Nilai akhir gaya geser dasar pada arah X menjadi 6681,38 kN, sedangkan pada arah Y menjadi 7635,86 kN, sehingga syarat evaluasi kinerja dinamik telah terpenuhi sepenuhnya.

Simpangan antar-lantai

Setelah evaluasi gaya geser dasar, berikutnya yang dianalisis adalah simpangan antar-lantai (*story drift*). Evaluasi ini penting untuk memastikan kekakuan lateral struktur tingkat desain mampu membatasi deformasi saat diguncang beban dinamik, sehingga keselamatan penghuni dan elemen non-struktural dapat terjamin.

Berdasarkan pedoman NIST GCR 11-917-15, apabila digunakan tujuh atau lebih pasang

rekaman gerakan tanah, maka parameter respons struktur diizinkan untuk diambil berdasarkan nilai rata-rata. Oleh karena itu, penelitian ini menetapkan penggunaan 7 pasang rekaman agar evaluasi kinerja dapat didasarkan pada respons rata-rata yang lebih representatif (NIST, 2011).

Rasio simpangan yang diperoleh dari Persamaan (2) selanjutnya dikontrol terhadap nilai batas toleransi yang dipersyaratkan SNI 1726:2019. Hasil rekapitulasi perhitungan rasio simpangan antar-lantai aktual rata-rata pada arah X dan Y disajikan pada Tabel 8.

Nilai rasio simpangan antar-lantai aktual rata-rata dari ketujuh beban gempa pada arah X dan Y di seluruh tingkat struktur tidak ada

yang melampaui ambang batas izin SNI 1726:2019 sebesar 0,02. Angka simpangan maksimum terjadi pada *story* 5, dengan rasio sebesar 0,0158 untuk arah X dan 0,0117 untuk arah Y. Hal ini menandakan bahwa kekakuan lateral struktur eksisting Gedung BKD Provinsi Jawa Timur sangat memadai dalam meredam deformasi yang terjadi akibat pembebanan riwayat waktu.

Tabel 7. Rekapitulasi Penskalaan Gaya Geser Dasar

Sumber Gempa	Arah	V_{statik} Awal (kN)	$V_{dinamik}$ Awal (kN)	Faktor Skala	$V_{dinamik}$ Akhir (kN)
Loma Prieta	X	6681,38	39309,98	1,67	6681,38
	Y	7635,86	43733,59	1,71	7635,86
Morgan Hill	X	6681,38	39699,03	1,65	6681,38
	Y	7635,86	40407,39	1,85	7635,86
Hokkaido	X	6681,38	41013,05	1,60	6681,38
	Y	7635,86	37839,21	1,98	7635,86
Chi-Chi	X	6681,38	48117,57	1,36	6681,38
	Y	7635,86	45906,16	1,63	7635,86
Duzce	X	6681,38	39541,04	1,66	6681,38
	Y	7635,86	52717,90	1,42	7635,86
Tokachi-oki	X	6681,38	38753,85	1,69	6681,38
	Y	7635,86	40506,90	1,85	7635,86
Michoacan	X	6681,38	37937,30	1,73	6681,38
	Y	7635,86	47851,97	1,57	7635,86

Tabel 8. Rerata Rasio Simpangan Antar-Lantai

Story	Drift Aktual Rerata Arah X	Drift Aktual Rerata Arah Y	Batas Izin SNI	Kesimpulan
1	0,0063	0,005	0,02	Aman
2	0,0094	0,0081	0,02	Aman
3	0,0112	0,0103	0,02	Aman
4	0,0112	0,0108	0,02	Aman
5	0,0158	0,0117	0,02	Aman

Evaluasi level kinerja seismik

Nilai simpangan antar lantai aktual yang dievaluasi pada tahap ini bukanlah simpangan elastis murni dari analisis riwayat waktu linear (LTHA), melainkan telah diamplifikasi menggunakan faktor pembesaran defleksi (C_d) sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Perbesaran ini berfungsi mengonversi respons elastis menjadi estimasi deformasi inelastis (plastis) maksimum yang akan dialami struktur saat diguncang gempa kuat. Oleh karena rasio simpangan yang disajikan pada

Tabel 8 telah merepresentasikan estimasi perilaku inelastis bangunan sesungguhnya.

Penentuan level kinerja dilakukan dengan membandingkan rasio simpangan antar-lantai aktual rata-rata hasil analisis riwayat waktu terhadap kriteria penerimaan simpangan yang ditetapkan dalam pedoman FEMA 356. Kriteria batas kinerja untuk struktur sistem rangka beton disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Batas Simpangan Transien Berdasarkan FEMA 356

Level Kinerja	Batas Simpangan Transien (Rasio)
<i>Immediate Occupancy (IO)</i>	0,01
<i>Life Safety (LS)</i>	0,02
<i>Collapse Prevention (CP)</i>	0,04

(Sumber: FEMA 356)

Untuk mendapatkan gambaran evaluasi secara menyeluruh, nilai simpangan aktual rata-rata dari ketujuh pasang gerakan tanah pada masing-masing tingkat pada Tabel 8 ditinjau terhadap kriteria batas FEMA 356. Hasil evaluasi level kinerja tiap lantai pada arah X dan Y dicantumkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Penentuan Level Kinerja Seismik

Story	Level Kinerja Arah X	Level Kinerja Arah Y
1	IO	IO
2	IO	IO
3	LS	LS
4	LS	LS
5	LS	LS

Berdasarkan Tabel 10 yang mengacu pada data rasio simpangan aktual rata-rata di Tabel 8, terlihat bahwa respons deformasi pada arah X dan Y untuk *story* 1 dan 2 memenuhi kriteria level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) karena seluruh nilainya berada di bawah rasio 0,01. Namun, pada *story* 3 hingga 5, rasio simpangan aktual pada kedua arah telah melewati ambang batas IO. Rasio simpangan tertinggi terjadi di *story* 5, yaitu sebesar 0,0158 untuk arah X dan 0,0117 untuk arah Y, di mana nilai-nilai tersebut secara definitif masuk ke dalam kategori *Life Safety* (LS).

Penentuan level kinerja struktur secara keseluruhan harus didasarkan pada respons deformasi paling kritis yang mengontrol sistem struktur (FEMA, 2000), maka Gedung BKD Provinsi Jawa Timur secara keseluruhan dikategorikan berada pada level kinerja seismik *Life Safety* (LS).

Pencapaian level kinerja *Life Safety* mengindikasikan bahwa apabila gedung diguncang oleh beban gempa, bangunan diprediksi akan mengalami tingkat kerusakan

struktural dan non-struktural dalam kategori sedang. Meskipun demikian, sistem penahan gaya seismik utama tetap memiliki sisa kekakuan yang memadai untuk mencegah terjadinya keruntuhan parsial maupun total, sehingga keselamatan bagi penghuni tetap terjaga dan jalur evakuasi tetap dapat berfungsi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis riwayat waktu linear menggunakan tujuh pasang gerakan tanah yang telah di-*matching*, struktur eksisting Gedung BKD Provinsi Jawa Timur memiliki tingkat kekakuan lateral yang memadai dalam menahan beban gempa dinamik pada kondisi tanah lunak (SE). Pemenuhan syarat ekuivalensi gaya geser dasar dinamik terhadap statik memastikan bahwa pemodelan struktur telah merepresentasikan respons yang valid dan tidak *under-design*. Seluruh simpangan antar-lantai yang terjadi akibat pembebanan dinamik terdistribusi secara aman tanpa melampaui ambang batas toleransi deformasi yang disyaratkan dalam SNI 1726:2019.

Tinjauan lebih lanjut terhadap kriteria penerimaan FEMA 356 menyimpulkan bahwa kinerja seismik bangunan secara keseluruhan terklasifikasi pada tingkat *Life Safety* (LS), yang ditentukan berdasarkan rasio simpangan pada tingkat 3 hingga 5 yang telah melewati batas *Immediate Occupancy* (IO), dengan deformasi paling kritis terjadi pada lantai teratas struktur. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa desain gedung eksisting memiliki kekakuan lateral dan kapasitas deformasi yang memadai. Meskipun berpotensi mengalami kerusakan struktural tingkat sedang apabila terjadi gempa dengan intensitas tinggi, sistem penahan gaya seismik utama mampu mencegah terjadinya keruntuhan parsial maupun total, sehingga keselamatan jiwa penghuni serta kelayakan jalur evakuasi tetap terjamin secara struktural.

Daftar Pustaka

- Ancheta, A. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., & Wooddell, K. E. (2014). NGA-West2 database.

- Earthquake Spectra, 30(3), 989–1005.
<https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. BSN.
- Demir, A., Nohutcu, H., Ercan, E., Hokelekli, E., & Altintas, G. (2016). Effect of model calibration on seismic response of a historical mosque. *Procedia Engineering*, 161, 1744–1749.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.839>
- Federal Emergency Management Agency. (2000). FEMA 356: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. ASCE.
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCoy, E., & Mendis, R. (2006). An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(sup001), 67–89.
<https://doi.org/10.1080/13632460609350629>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. (2020). The 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), 1–27.
<https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Jayalekshmi, B. R., & Chinmayi, H. K. (2016). Effect of soil flexibility on seismic force evaluation of RC framed buildings with shear wall. *Journal of Geotechnical Engineering*, 3(1), 39–55.
<https://doi.org/10.1080/23322764.2016.1155730>
- Kalkan, E., & Chopra, A. K. (2011). Modal-pushover-based ground-motion scaling procedure. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 298–310.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000308)
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- National Institute of Standards and Technology. (2011). NIST GCR 11-917-15: Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses. U.S. Department of Commerce.
- Nugroho, A. M., & Satyarno, I. (2022). Evaluasi kinerja seismik gedung beton bertulang menggunakan analisis riwayat waktu nonlinear. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(2), 143–152.
<https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.2.5>
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2022). Peta deagregasi bahaya gempa Indonesia 2022. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
<https://pusgen.id>
- Putra, F. S., & Saputra, E. (2026). Perbandingan respons struktur gedung dengan variasi bentuk denah menggunakan metode respons spektrum dan time history. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, 5(2), 14–22
- Shahi, S. K., & Baker, J. W. (2014). An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2456–2466.
<https://doi.org/10.1785/0120130191>
- Stafford, P. J., Rodriguez-Marek, A., Edwards, B., Kruiver, P. P., & Bommer, J. J. (2017). Scenario dependence of linear site-effect factors for short-period response spectral ordinates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), 2859–2872.
<https://doi.org/10.1785/0120170084>
- Suharjanto, A., Wisnumurti, & Zaoeob, A. (2023). Seismic performance evaluation of existing reinforced concrete buildings based on SNI 1726:2019 using time history analysis. *CIVILA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan*, 8(2), 101–112.
<https://doi.org/10.30736/cvl.v8i2.1089>