E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 2271-2289
Volume 3 Nomor 3 Tahun 2026

Perencanaan Struktur Gedung Rumah Sakit 8 Lantai Menggunakan Aplikasi ETABS Dengan Analisis Time History

Muhammad Nur Ikhsan[1], Hengky Dwi Christiyanto[2], Bella Saskia Rahma Ayu[3], Hoirudiyanto[4], Danu Fazril Mutaqin[5], Wahyudi[6]

[1,2,3,4,5,6]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tangerang Raya
e-mail: m.nurikhsan@untara.ac.id

Abstrak

Rumah sakit termasuk bangunan Kategori Risiko IV menurut SNI 1726:2019 dan dituntut tetap berfungsi setelah gempa. Penelitian ini mengevaluasi kinerja struktur Gedung Rumah Sakit Ibu dan Anak (RSIA) 8 lantai menggunakan ETABS V.20 melalui analisis riwayat waktu nonlinier pada tiga skenario magnitudo, yaitu M 6,2, M 7,2, dan M 7,9. Rekaman gempa aktual diskalakan melalui spectrum matching terhadap spektrum respons desain SNI 1726:2019. Skenario M 6,2 menggunakan Christchurch (2011) dan Chi-Chi Taiwan-03/04 (1999), M 7,2 menggunakan Sierra El Mayor-Cucapah (2010) dan Kern County (1952), sedangkan M 7,9 menggunakan Denali (2002). Parameter yang dievaluasi meliputi gaya geser dasar, perpindahan maksimum, simpangan antar lantai, dan level kinerja berdasarkan kriteria maximum total drift ATC-40. Hasil menunjukkan simpangan antar lantai terbesar berada pada zona Lantai 5–6. Nilai maksimum mencapai 36,57 mm pada M 6,2 arah X, 30,32 mm pada M 7,2 arah X, dan 41,34 mm pada M 7,9 arah Y. Nilai tersebut setara dengan 91,4%, 75,8%, dan 103,3% dari batas izin 40 mm. Artinya, nilai 91,4% dan 75,8% masih berada di bawah batas izin, sedangkan 103,3% menunjukkan simpangan telah melampaui batas izin. Pada M 7,9, Lantai 5–7 arah Y tidak memenuhi persyaratan simpangan antar lantai SNI 1726:2019. Berdasarkan ATC-40, level kinerja struktur berada pada kategori Immediate Occupancy (IO) untuk M 6,2 dan M 7,2, serta Damage Control untuk M 7,9.

Kata kunci: *Gempa, Riwayat Waktu, Rumah Sakit, Kinerja Struktur, Simpangan Antar Lantai*

E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 2271-2289
Volume 3 Nomor 3 Tahun 2026

Abstract

Hospital buildings are classified as Risk Category IV under SNI 1726:2019 and are required to remain functional after an earthquake. This study evaluates the seismic performance of an 8-story Maternal and Child Hospital (RSIA) building using ETABS V.20 through nonlinear dynamic time history analysis under three earthquake magnitude scenarios: M 6.2, M 7.2, and M 7.9. Actual ground-motion records were scaled through spectrum matching to the SNI 1726:2019 design response spectrum. M 6.2 uses Christchurch (2011) and Chi-Chi Taiwan-03/04 (1999), M 7.2 uses Sierra El Mayor-Cucapah (2010) and Kern County (1952), and M 7.9 uses Denali (2002). The evaluated parameters include base shear, maximum displacement, inter-story drift, and structural performance level based on the ATC-40 maximum total drift criterion. The results show that the largest inter-story drift occurs in the Floors 5–6 zone. The maximum values are 36.57 mm for M 6.2 in the X-direction, 30.32 mm for M 7.2 in the X-direction, and 41.34 mm for M 7.9 in the Y-direction. These values correspond to 91.4%, 75.8%, and 103.3% of the 40 mm allowable limit, respectively. Thus, 91.4% and 75.8% remain below the allowable limit, while 103.3% indicates that the drift exceeds the limit. Under M 7.9, Floors 5–7 in the Y-direction do not satisfy the SNI 1726:2019 inter-story drift requirement. Based on ATC-40, the structural performance level is Immediate Occupancy (IO) for M 6.2 and M 7.2 and Damage Control for M 7.9.

Keywords : *Earthquake, Time History, Hospital Building, Structure Performance, Inter-story Drift*

LATAR BELAKANG

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama (Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik), sehingga memiliki tingkat kerawanan gempa bumi yang tinggi. Ketika gempa bumi terjadi, struktur bangunan dapat mengalami kerusakan yang berpotensi menyebabkan keruntuhan bila beban gempa tidak diperhitungkan secara memadai pada tahap desain. Kondisi ini menuntut perencanaan struktur bangunan gedung, khususnya

bangunan bertingkat, untuk memperhitungkan beban gempa secara cermat agar memberikan keandalan struktural yang memadai.

Gedung rumah sakit termasuk dalam Kategori Risiko IV berdasarkan SNI 1726:2019, yaitu kategori bangunan yang harus tetap berfungsi pascagempa untuk melayani kebutuhan darurat masyarakat, sehingga faktor keutamaan gempa (Ie) untuk rumah sakit ditetapkan lebih tinggi dibandingkan bangunan hunian atau perkantoran biasa. SNI 1726:2019 mensyaratkan analisis gempa dinamik menggunakan metode riwayat waktu (time history analysis) untuk bangunan tertentu, di samping metode respons spektrum. Analisis riwayat waktu memberikan gambaran perilaku struktur yang lebih realistis karena memodelkan struktur berdasarkan catatan rekaman gempa yang berupa gerakan tanah dan respons struktur yang dihitung bertahap pada interval tertentu, sehingga dapat menangkap efek dinamik struktur secara lebih akurat dibandingkan analisis statik ekivalen.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengevaluasi kinerja struktur gedung bertingkat terhadap beban gempa menggunakan analisis riwayat waktu. Novyeremia dkk. (2023) mengevaluasi Gedung Sekolah Nasional Global Nusantara Sampit menggunakan analisis time history dan menemukan bahwa kinerja struktur pada sendi plastis termasuk kategori immediate occupancy sesuai ATC-40. Hasan, Iqbal, Ahammed, dan Ghosh (2023) mengevaluasi kinerja seismik gedung beton bertulang menggunakan analisis riwayat waktu nonlinier dan menemukan bahwa perpindahan maksimum dan simpangan antar lantai dapat melampaui batas izin apabila beban gempa tidak diperhitungkan secara memadai pada tahap desain. Jia, Song, Chen, Liu, dan Zhang (2022) mengevaluasi kinerja seismik gedung bertingkat tinggi dengan ketidakberaturan struktur dan menekankan pentingnya evaluasi lanjutan di luar ketentuan kode desain minimum. Shaaban, Abouelsaad, El Bagalaty, dan El Madawy (2022) serta Saritaş, Bedirhanoglu, Konak, dan Keskin (2023) masing-masing mengkaji pengaruh jenis pondasi dan isolasi seismik terhadap respons riwayat waktu gedung tinggi, sedangkan Prayuda, Maulana, Putra, Salsabila, dan Saleh (2023) menunjukkan bahwa ketidakberaturan bentuk bangunan arah horizontal dan vertikal turut memengaruhi perilaku seismik gedung beton bertulang bertingkat tinggi.

Tujuan utama dari evaluasi kinerja struktur yaitu untuk melihat tingkat kinerja bangunan ketika diberikan gaya gempa. Kinerja seismik digambarkan dengan menetapkan tingkat kerusakan maksimum yang diizinkan (performance level) untuk mengidentifikasi bahaya gempa. Pada praktiknya, pemodelan riwayat waktu di ETABS umumnya memanfaatkan rekaman gempa aktual yang tersedia pada pustaka fungsi (function library) perangkat lunak, dengan magnitudo yang bervariasi. Penelitian ini memanfaatkan lima rekaman gempa aktual yang dikelompokkan pada tiga skenario magnitudo, yaitu M 6,2, M 7,2, dan M 7,9, untuk mengevaluasi perkembangan respons struktur Gedung RSIA 8 lantai seiring peningkatan magnitudo gempa. Pendekatan multi-skenario ini bertujuan memberikan gambaran margin keamanan struktur yang lebih menyeluruh dibandingkan evaluasi pada satu level gempa rencana saja, sekaligus mengidentifikasi skenario magnitudo paling kritis bagi struktur.

METODE

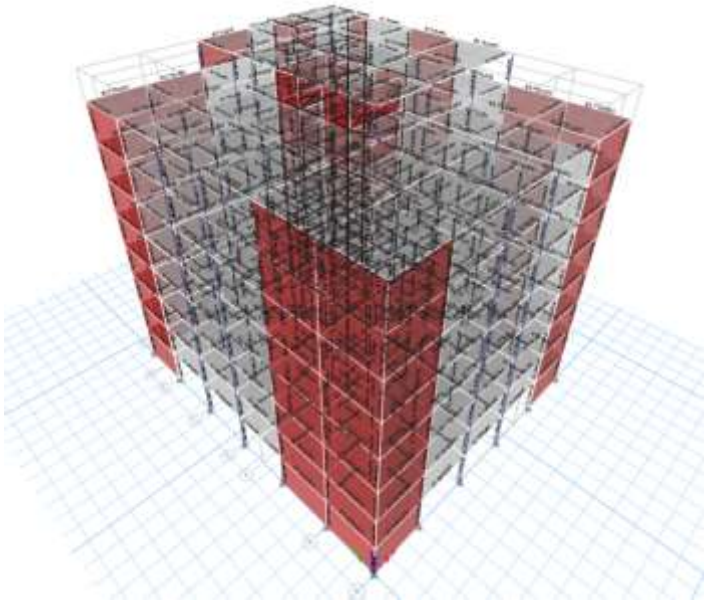
Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik berbantuan ETABS untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung rumah sakit beton bertulang terhadap beban gempa. Tahapan penelitian meliputi: (1) pengumpulan data geometri, material, dan data tanah; (2) penentuan sistem struktur (dual system SRPMK dan dinding geser khusus); (3) pemodelan struktur pada ETABS; (4) analisis pembebanan gravitasi dan gempa; (5) analisis riwayat waktu nonlinier menggunakan lima rekaman gempa aktual pada tiga skenario magnitudo; (6) analisis pushover; serta (7) evaluasi hasil dan penarikan kesimpulan.

Struktur dimodelkan sebagai rangka ruang tiga dimensi dengan elemen balok dan kolom sebagai frame element, pelat lantai sebagai shell element, dan dinding geser sebagai wall element. Denah struktur terdiri atas grid kolom dan balok sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, dengan area dinding geser (diarsir merah) ditempatkan pada zona inti bangunan (core) untuk meningkatkan kekakuan lateral struktur.

E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 2271-2289
Volume 3 Nomor 3 Tahun 2026



Gambar 1. Denah struktur gedung rumah sakit 8 lantai



Gambar 2. Pemodelan struktur 3D gedung rumah sakit 8 lantai pada ETABS Analisis Riwayat Waktu pada Tiga Skenario Magnitudo Gempa

Analisis Modal dan Verifikasi Periode Getar

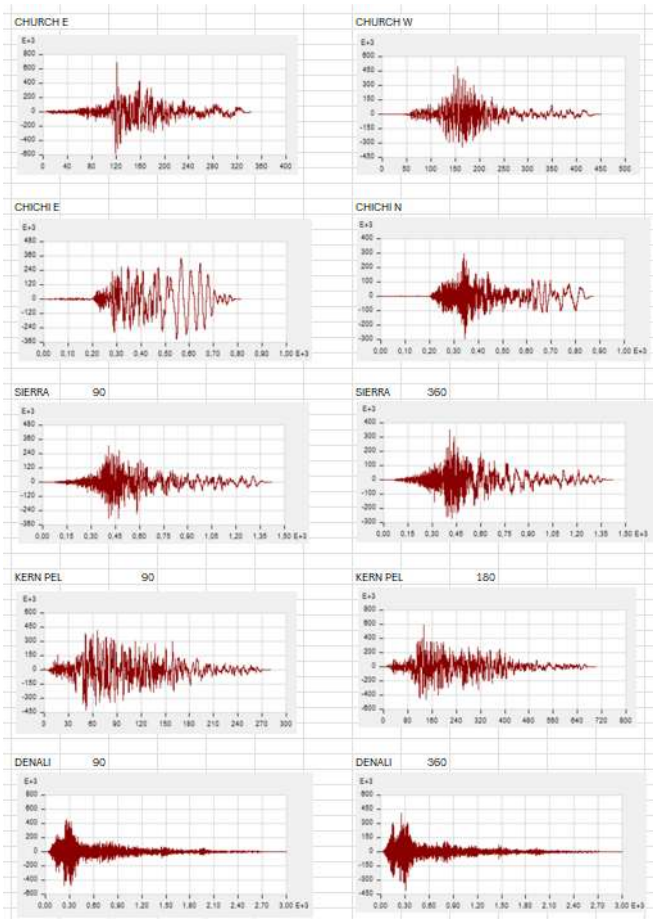
Sebelum analisis riwayat waktu dilakukan, struktur terlebih dahulu dianalisis secara modal (eigenvalue analysis) untuk memperoleh periode getar alami dan pola ragam (mode shape). Jumlah ragam yang ditinjau ditentukan sedemikian rupa sehingga partisipasi massa ragam kumulatif mencapai sekurang-kurangnya 90% dari massa total struktur pada masing-masing arah utama, sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.9.1, dengan massa seismik dihitung dari kombinasi 100% beban mati (D) dan 30% beban hidup (L) sesuai pasal 7.7.2. Sebagai batas pemeriksaan, periode fundamental pendekatan (Ta) dihitung menggunakan formula empiris SNI 1726:2019 pasal 7.8.2.1, Ta = Ct hn^x, dengan Ct = 0,0488 dan x = 0,75 untuk sistem struktur selain rangka pemikul momen murni serta hn = 35 m sebagai tinggi total bangunan, sehingga diperoleh estimasi Ta ≈ 0,70 detik. Periode fundamental hasil analisis program (T1) harus memenuhi Ta ≤ T1 ≤ Cu Ta, dengan Cu ≈ 1,4 untuk SD1 ≥ 0,4 g sesuai SNI 1726:2019 Tabel 14; apabila T1 melampaui batas atas tersebut, nilai T1 yang digunakan pada perhitungan gaya geser dasar statik ekuivalen dibatasi sebesar Cu Ta.

Pemodelan Nonlinearitas Material

Perilaku nonlinear struktur pada analisis riwayat waktu dimodelkan melalui pendefinisian sendi plastis (plastic hinge) pada elemen balok, kolom, dan dinding geser. Elemen balok dimodelkan dengan sendi rotasi momen (M3) pada kedua ujungnya, elemen kolom dimodelkan dengan sendi interaksi aksial-lentur biaksial (P-M2-M3), dan dinding geser dimodelkan sebagai elemen shell nonlinear berlapis (layered shell) atau sendi geser-lentur pada elemen pier/spandrel, dengan kurva backbone dan kriteria penerimaan mengacu pada FEMA 356 (2000) dan ASCE/SEI 41-17 sebagai acuan default pada ETABS. Rasio redaman struktur ditetapkan sebesar 5% dari redaman kritis (Rayleigh damping), nilai yang umum digunakan untuk struktur beton bertulang. Efek P-Delta turut diperhitungkan dalam analisis riwayat waktu untuk menangkap pengaruh nonlinearitas geometri akibat beban gravitasi yang bekerja bersamaan dengan perpindahan lateral struktur, sesuai ketentuan pemeriksaan koefisien stabilitas pada SNI 1726:2019 pasal 7.8.7.

Perlu ditegaskan bahwa simpangan antar lantai (story drift) yang dievaluasi terhadap batas izin Δa pada Tabel 6-8 adalah simpangan yang diperoleh langsung dari analisis riwayat waktu nonlinier, tanpa perlu dikalikan faktor pembesaran defleksi Cd/Ie. Hal ini berbeda dengan hasil analisis linear (statik ekuivalen atau respons spektrum), di mana simpangan elastis hasil analisis harus terlebih dahulu diamplifikasi dengan Cd/Ie sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.8.6 sebelum dibandingkan terhadap Δa, karena analisis linear tidak menangkap deformasi inelastis struktur secara langsung. Karena analisis riwayat waktu nonlinier pada penelitian ini sudah memodelkan perilaku inelastis melalui sendi plastis, nilai simpangan yang dilaporkan pada Tabel 6-8 telah merepresentasikan deformasi inelastis aktual dan dapat langsung dibandingkan terhadap $\Delta a = 0{,}010$ hsx.

Analisis riwayat waktu dilakukan menggunakan pendekatan nonlinear time history analysis dengan integrasi langsung, mengacu pada SNI 1726:2019 pasal 7.9. Penelitian ini meninjau tiga skenario magnitudo gempa yang mewakili seluruh rekaman gempa aktual pada pustaka fungsi ETABS yang digunakan pemodelan, yaitu: (a) Skenario 1 - M 6,2, diwakili oleh rekaman Christchurch, Selandia Baru (2011, fungsi CCHURCH_E/CCHURCH_W) dan Chi-Chi Taiwan-03/04 (1999, fungsi CHICHI.03_E/CHICHI.04_N); (b) Skenario 2 - M 7,2, diwakili oleh rekaman Sierra El Mayor-Cucapah, Meksiko (2010, fungsi RSN5861_SIERRA.MEX_MCY090/MCY360) dan Kern County, California (1952, fungsi RSN12_KERN.PEL_PEL090/PEL180); dan (c) Skenario 3 - M 7,9, diwakili oleh rekaman Denali, Alaska (2002, fungsi RSN2095_DENALI_DOI-90/360 dan RSN2109_DENALI_FAIFS-90/360). Riwayat percepatan tanah (time history) dari kelima rekaman tersebut, sebagaimana diinput pada pustaka fungsi ETABS, disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Riwayat percepatan tanah (time history) rekaman gempa yang digunakan dalam analisis: Christchurch (CHURCH E/W), Chi-Chi Taiwan (CHICHI E/N), Sierra El Mayor-Cucapah (SIERRA 90/360), Kern County (KERN PEL 90/180), dan Denali (DENALI 90/360). Sumber: pustaka fungsi riwayat waktu ETABS penulis.

Prosedur Spectrum Matching

Setiap rekaman gempa diskalakan (spectrum matching) terhadap spektrum respons desain SNI 1726:2019 sesuai kelas situs dan parameter percepatan lokasi. Proses dilakukan dengan menyesuaikan riwayat percepatan tanah terhadap target spektrum pada rentang periode 0,2T1–1,5T1, dengan T1 sebagai periode fundamental struktur pada mode pertama. Rentang ini digunakan sebagai dasar pemeriksaan kesesuaian spektrum respons rekaman terhadap spektrum desain.

Kriteria kesesuaian ditetapkan dengan memastikan rerata spektrum respons seluruh rekaman pada rentang 0,2T1–1,5T1 tidak berada di bawah spektrum desain (batas bawah 100%). Pada periode tunggal, deviasi terhadap ordinat spektrum target dijaga dalam kisaran toleransi 10–20% sesuai prosedur spectrum matching berbasis wavelet yang digunakan. Rekaman yang belum memenuhi kriteria diperbaiki secara iteratif melalui penyesuaian faktor skala dan wavelet hingga memenuhi batas kesesuaian.

Verifikasi hasil penskalaan dilakukan dengan membandingkan kurva spektrum respons setiap rekaman hasil matching terhadap kurva spektrum desain SNI 1726:2019 pada modul Function Library ETABS. Pemeriksaan memastikan bahwa pada rentang periode 0,2T1–1,5T1 tidak terdapat bagian spektrum yang berada di bawah target. Setelah lolos verifikasi, rekaman digunakan dalam analisis riwayat waktu. Respons struktur yang ditinjau meliputi gaya geser dasar (base shear) dan simpangan antar lantai (story drift), dengan nilai envelope diambil dari rekaman pada masing-masing skenario dan dibandingkan terhadap batas izin SNI 1726:2019 Tabel 20, yaitu $\Delta a = 0{,}010hsx$ untuk Kategori Risiko IV.

Parameter Integrasi Waktu dan Faktor Skala

Integrasi persamaan gerak dilakukan menggunakan metode integrasi langsung Hilber-Hughes-Taylor (HHT-α) dengan parameter α mendekati nol untuk menjaga stabilitas numerik sekaligus meredam respons frekuensi tinggi yang tidak realistis secara fisis. Penambahan waktu (Δt) mengikuti interval pencatatan asli rekaman gempa dan dijaga tidak melebihi T1/10 agar respons dinamik struktur pada ragam-ragam yang lebih tinggi tetap terekam secara akurat. Faktor skala awal setiap rekaman ditentukan dari rasio percepatan puncak tanah desain terhadap percepatan puncak tanah rekaman asli, kemudian disempurnakan melalui proses spectrum matching berbasis penyesuaian wavelet pada domain waktu (time-domain matching) agar spektrum respons hasil skala mendekati spektrum target pada rentang periode 0,2T1-1,5T1 sebagaimana diuraikan pada bagian Prosedur Spectrum Matching.

Keterbatasan Jumlah Rekaman Gempa

SNI 1726:2019 pasal 7.9.1 mensyaratkan penggunaan sekurang-kurangnya tiga pasang rekaman gerakan tanah pada setiap analisis riwayat waktu, dengan respons yang

ditinjau diambil dari nilai maksimum (envelope) apabila jumlah rekaman kurang dari tujuh, atau nilai rata-rata apabila jumlah rekaman tujuh atau lebih. Pada penelitian ini, Skenario 1 dan Skenario 2 masing-masing menggunakan dua rekaman gempa, sedangkan Skenario 3 hanya menggunakan satu rekaman (Denali), sehingga secara ketat belum sepenuhnya memenuhi jumlah minimum rekaman yang disyaratkan, khususnya pada Skenario 3. Kondisi ini merupakan keterbatasan metodologis yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil dan menjadi dasar rekomendasi penambahan jumlah rekaman pada penelitian lanjutan (lihat bagian Saran).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Umum Struktur

Objek penelitian berupa gedung rumah sakit beton bertulang setinggi 8 lantai. Spesifikasi umum struktur disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi umum struktur gedung

Parameter	Nilai
Fungsi bangunan	Rumah Sakit (Kategori Risiko IV)
Faktor keutamaan gempa, Ie	1,50
Jumlah lantai	8 lantai
Tinggi antar lantai (tipikal)	4,00 m
Tinggi total bangunan	35,00 m
Mutu beton (f'c)	30 MPa
Tulangan utama	BjTS 420 (fy = 420 MPa)
Tulangan geser/sengkang	BjTP 280 (fy = 280 MPa)
Sistem struktur	SRPMK + Dinding Geser Khusus
Tebal pelat lantai	15 cm
Tebal pelat atap	15 cm
Tebal dinding geser (shear wall)	30 cm

Gedung Rumah Sakit Ibu dan Anak dengan tinggi 35 meter berlantai 8 ini menggunakan kolom, balok, dan dinding geser dengan dimensi pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi struktural gedung

Kolom	Balok	Dinding Geser
K1 900x900	B1 900x650	DB1 30 cm
K2 800x800	B2 700x550	
K3 700x700		

Data Percepatan Tanah

Parameter percepatan tanah desain ditentukan berdasarkan spektrum respons desain SNI 1726:2019 pada kelas situs SD (tanah sedang). Data percepatan tanah yang digunakan sebagai parameter desain adalah parameter percepatan spektra periode pendek (SDS) sebesar 0,8513 g dan parameter percepatan spektra periode 1 detik (SD1) sebesar 0,4205 g, dengan faktor keutamaan gempa Ie = 1,5 (Kategori Risiko IV) dan koefisien modifikasi respons R = 7 (Sistem Ganda SRPMK dan Dinding Geser Khusus Beton Bertulang, sesuai SNI 1726:2019 Tabel 9).

Koefisien respons seismik (Cs) untuk gaya geser dasar statik ekuivalen dihitung mengikuti prosedur SNI 1726:2019 pasal 7.8.1.1, dengan tiga tahap berikut:

1. Nilai awal: Cs = SDS / (R/Ie) = 0,8513 / (7/1,5) = 0,8513 / 4,667 = 0,1824.
2. Nilai maksimum (dibatasi oleh SD1, berlaku untuk T ≤ TL): Cs_maks = SD1 / [T (R/Ie)]. Dengan menggunakan periode fundamental pendekatan T = Ta ≈ 0,70 detik (lihat bagian Analisis Modal dan Verifikasi Periode Getar), diperoleh Cs_maks = 0,4205 / [0,70 × 4,667] = 0,4205 / 3,267 = 0,1287.
3. Nilai minimum: Cs_min = maks(0,044 SDS Ie ; 0,01) = maks(0,044 × 0,8513 × 1,5 ; 0,01) = maks(0,0562 ; 0,01) = 0,0562.

Karena Cs_maks (0,1287) lebih kecil daripada nilai awal (0,1824) dan lebih besar daripada Cs_min (0,0562), maka nilai Cs yang digunakan pada perhitungan gaya geser dasar statik ekuivalen (V = Cs W) adalah nilai yang dibatasi oleh SD1, yaitu Cs ≈ 0,129. Nilai gaya geser dasar statik ekuivalen (V = Cs W) inilah yang menjadi acuan pembanding (100% V) pada evaluasi gaya geser dasar hasil analisis respons spektrum maupun riwayat waktu sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.9.4 (lihat pembahasan Tabel 5).

Kombinasi Pembebanan

Analisis struktur mempertimbangkan kombinasi beban mati (DL), beban mati tambahan (SIDL), beban hidup (LL), dan beban gempa arah X/Y (Ex/Ey) sesuai SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kombinasi pembebanan

No	Kombinasi	DL	SIDL	LL	Ex	Ey
1	1,4D	1,4	1,4	-	-	-
2	1,2D + 1,6L + 0,5Lr	1,2	1,2	1,6	-	-
3	1,2D + 1,0L + 1,0Ex + 0,3Ey	1,2	1,2	1,0	1,0	0,3
4	1,2D + 1,0L + 0,3Ex + 1,0Ey	1,2	1,2	1,0	0,3	1,0
5	0,9D + 1,0Ex + 0,3Ey	0,9	0,9	-	1,0	0,3
6	0,9D + 0,3Ex + 1,0Ey	0,9	0,9	-	0,3	1,0

Hasil Analisis Riwayat Waktu pada Tiga Skenario Magnitudo Gempa

Kelima rekaman gempa yang digunakan, dikelompokkan menjadi tiga skenario magnitudo, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Skenario magnitudo gempa dan rekaman acuan

Skenario	M	Rekaman Gempa Acuan	Fungsi ETABS
1a	6,2	Christchurch, Selandia Baru (2011)	CCHURCH_E, CCHURCH_W
1b	6,2	Chi-Chi Taiwan-03/04 (1999)	CHICHI.03_E, CHICHI.04_N
2a	7,2	Sierra El Mayor-Cucapah, Meksiko (2010)	RSN5861_SIERRA.MEX_MCY090/360
2b	7,2	Kern County, California (1952)	RSN12_KERN.PEL_PEL090/180
3	7,9	Denali, Alaska, Amerika Serikat (2002)	RSN2095_DENALI, RSN2109_DENALI

Rekapitulasi gaya geser dasar hasil analisis riwayat waktu (nilai envelope tiap skenario) dibandingkan hasil analisis respons spektrum (RSA) disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan gaya geser dasar

Metode / Skenario	Vx (kN)	Vy (kN)	Vx/Vrsa	Vy/Vrsa
Respons Spektrum (RSA)	11098,17	20059,66	100%	100%
Skenario 1 (M 6,2)	21153,80	20295,90	190%	101%
Skenario 2 (M 7,2)	25671,07	27915,19	231%	139%
Skenario 3 (M 7,9)	21959,81	48466,15	197%	241%

Menurut SNI 1726:2019 pasal 7.9.4, apabila gaya geser dasar hasil analisis riwayat waktu (Vdinamik) pada suatu arah lebih kecil dari 100% gaya geser dasar statik ekuivalen (Vstatik = Cs W, dengan Cs ≈ 0,129 sebagaimana diturunkan pada bagian Data Percepatan Tanah) untuk struktur beraturan, seluruh parameter respons (gaya dalam, simpangan, dan reaksi perletakan) wajib diskalakan dengan faktor 100% Vstatik/Vdinamik. Ketentuan yang sama juga berlaku pada tahap analisis respons spektrum (RSA) terhadap Vstatik, sehingga nilai Vrsa pada Tabel 5 pada dasarnya telah melalui pemeriksaan tersebut sebelum digunakan sebagai acuan pembanding bagi hasil riwayat waktu. Berdasarkan Tabel 5, rasio Vx/Vrsa dan Vy/Vrsa pada seluruh skenario bernilai lebih besar dari 100%, sehingga tidak diperlukan penskalaan tambahan terhadap hasil analisis riwayat waktu. Gaya geser dasar riwayat waktu secara konsisten melampaui hasil analisis respons spektrum, mengindikasikan respons dinamik yang lebih konservatif dibandingkan pendekatan statik ekuivalen, khususnya pada Skenario 3 arah Y yang mencapai 241% Vrsa akibat karakteristik pulsa rekaman gempa Denali yang kaya kandungan frekuensi rendah (long-period pulse).

Simpangan antar lantai (story drift) maksimum tiap lantai untuk masing-masing skenario disajikan pada Tabel 6-8, dengan batas izin $\Delta a = 0{,}010\ hsx = 40$ mm sesuai SNI 1726:2019 Tabel 20 untuk Kategori Risiko IV.

Tabel 6. Simpangan antar lantai - Skenario 1 (M 6,2, envelope Christchurch & Chi-Chi Taiwan-03/04)

Lantai	Arah X (mm)	Arah Y (mm)	Δ a (mm)	Ket.
Dak	19,422	13,776	40	Aman
8	32,58	19,06	40	Aman
7	35,12	19,784	40	Aman
6	36,568	20,288	40	Aman
5	36,572	19,892	40	Aman
4	34,66	18,216	40	Aman
3	30,508	15,112	40	Aman
2	23,86	10,644	40	Aman
1	13,104	4,788	40	Aman

Tabel 7. Simpangan antar lantai - Skenario 2 (M 7,2, envelope Sierra El Mayor-Cucapah & Kern County)

Lantai	Arah X (mm)	Arah Y (mm)	Δ a (mm)	Ket.
Dak	15,96	16,05	40	Aman
8	26,84	22,16	40	Aman
7	29,08	23,32	40	Aman
6	30,32	24,16	40	Aman
5	30,2	24,04	40	Aman
4	28,4	22,48	40	Aman
3	24,68	19,12	40	Aman
1	16,6	-	40	Aman

Catatan: nilai simpangan Lantai 2 pada Skenario 2 belum tersedia pada naskah sumber. Nilai tersebut harus diambil dari hasil ETABS sebelum naskah disubmit; angka tidak diisi dalam revisi ini untuk menghindari penambahan data yang tidak tersedia.

Tabel 8. Simpangan antar lantai - Skenario 3 (M 7,9, Denali)

Lantai	Arah X (mm)	Arah Y (mm)	Δ a (mm)	Ket.
Dak	8,793	27,657	40	Aman
8	14,064	38,608	40	Aman
7	15,324	40,104	40	Tidak Aman
6	16,18	41,336	40	Tidak Aman
5	16,464	41,216	40	Tidak Aman
4	15,932	38,9	40	Aman
3	14,36	33,568	40	Aman
2	11,604	24,86	40	Aman
1	6,704	11,548	40	Aman

Perbandingan ketiga skenario menunjukkan bahwa simpangan pada arah Y meningkat konsisten seiring bertambahnya magnitudo: 20,29 mm (Skenario 1) menjadi 24,16 mm (Skenario 2) dan 41,34 mm (Skenario 3) di Lantai 6. Pada Skenario 3, simpangan arah Y pada Lantai 5, 6, dan 7 melampaui batas izin 40 mm (mencapai 103% dari batas izin di Lantai 6), sehingga struktur dinyatakan Tidak Aman pada level tersebut dan memerlukan perkuatan kekakuan lateral tambahan, seperti penebalan dinding geser atau penambahan bracing, khususnya pada zona Lantai 5-7. Pada Skenario 2, seluruh simpangan masih memenuhi batas izin dengan nilai envelope maksimum 30,32 mm (75,8% dari batas izin). Pada Skenario 1, simpangan envelope maksimum mencapai 36,57 mm (91,4% dari batas izin), sehingga meskipun struktur secara nominal masih aman, margin keamanan yang tersisa relatif tipis (sekitar 8,6%).

Perlu dicatat bahwa peningkatan simpangan tidak selalu monoton pada kedua arah utama apabila ditinjau terpisah. Pada arah X, simpangan maksimum di Lantai 6 justru menurun seiring peningkatan magnitudo, dari 36,57 mm (Skenario 1) menjadi 30,32 mm (Skenario 2) dan 16,18 mm (Skenario 3), sedangkan pada arah Y simpangan meningkat tajam dari 20,29 mm menjadi 41,34 mm. Pola yang berbeda ini terjadi karena karakteristik masing-masing rekaman gempa aktual - termasuk orientasi komponen fault-normal/fault-parallel, kandungan frekuensi, dan durasi kuat guncangan - berbeda-beda meskipun telah

diskalakan terhadap spektrum desain yang sama, sehingga distribusi energi terhadap kedua arah utama struktur tidak identik antar-skenario. Sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.9.2, respons yang digunakan untuk evaluasi kinerja struktur adalah nilai envelope (maksimum) dari kedua arah pada setiap lantai, sebagaimana telah diterapkan pada Tabel 6-8.

Analisis Penyebab Simpangan Maksimum Konsisten di Zona Lantai 5-6

Data pada Tabel 6–8 menunjukkan bahwa simpangan maksimum berada pada zona Lantai 5–6, bukan selalu pada satu lantai. Pada M 6,2, nilai maksimum Lantai 5 dan Lantai 6 hampir sama, masing-masing 36,572 mm dan 36,568 mm. Pada M 7,2 dan M 7,9, nilai maksimum terjadi di Lantai 6, masing-masing 30,32 mm dan 41,336 mm. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh kontribusi mode getar pertama terhadap respons struktur pada ketinggian menengah-atas, perubahan relatif kekakuan elemen struktural, serta karakteristik frekuensi dan durasi rekaman gempa. Apabila dimensi kolom, balok, dan dinding geser tidak seragam sepanjang ketinggian, konsentrasi simpangan dapat muncul pada lantai dengan perubahan kekakuan. Kondisi tersebut perlu diverifikasi melalui pemeriksaan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (soft-storey irregularity) sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.3.2.1 dengan membandingkan kekakuan lateral tiap tingkat terhadap tingkat di atasnya.

Temuan ini sejalan dengan Jia, Song, Chen, Liu, dan Zhang (2022) yang menekankan bahwa ketidakberaturan kekakuan vertikal pada gedung bertingkat tinggi dapat menyebabkan konsentrasi simpangan pada level tertentu. Prayuda, Maulana, Putra, Salsabila, dan Saleh (2023) juga menunjukkan bahwa ketidakberaturan bentuk bangunan, baik horizontal maupun vertikal, dapat memengaruhi perilaku seismik gedung beton bertulang bertingkat tinggi. Hasil penelitian ini memperkuat pentingnya evaluasi story drift pada setiap lantai secara individual, bukan hanya menggunakan nilai maksimum global, agar lokasi konsentrasi simpangan dapat teridentifikasi.

Evaluasi Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40

Level kinerja struktur dievaluasi menggunakan kriteria maximum total drift ATC-40 (1996), sebagaimana disajikan pada Tabel 9. Rasio simpangan (drift ratio) dihitung dari simpangan antar lantai maksimum dibagi tinggi antar lantai tipikal (hsx = 4.000 mm).

Tabel 9. Kriteria batas maximum total drift menurut ATC-40 dan hasil evaluasi tiap skenario

Level Kinerja (ATC-40)	Batas Rasio Drift	Skenario Terkait	Rasio Drift Hasil Analisis
Immediate Occupancy (IO)	≤ 0,010	M 6,2 / M 7,2	0,00914 / 0,00758
Damage Control	0,010 - 0,020	M 7,9	0,01033
Life Safety (LS)	≤ 0,020	-	-
Structural Stability	≤ 0,33 Vi/Pi	-	-

Skenario M 6,2 dan M 7,2 menghasilkan rasio drift 0,00914 dan 0,00758, keduanya berada di bawah batas 0,010 sehingga termasuk kategori Immediate Occupancy (IO), yaitu kondisi bangunan yang dapat langsung difungsikan kembali pascagempa dengan kerusakan struktural minimal. Skenario M 7,9 menghasilkan rasio drift 0,01033, sedikit melampaui batas atas kategori IO, sehingga termasuk kategori Damage Control (0,010-0,020). Pada kategori ini bangunan mengalami kerusakan yang lebih signifikan dan berpotensi memerlukan perbaikan struktural sebelum dapat difungsikan kembali secara penuh, meskipun keruntuhan (collapse) belum diperkirakan terjadi. Temuan ini konsisten dengan hasil evaluasi simpangan antar lantai pada Tabel 8 yang menunjukkan pelampauan batas izin SNI 1726:2019 pada Lantai 5-7 arah Y untuk skenario M 7,9, sehingga kedua kriteria (SNI 1726:2019 dan ATC-40) secara bersama-sama mengindikasikan perlunya perkuatan tambahan bagi struktur RSIA yang ditinjau apabila terpapar gempa setara M 7,9.

SIMPULAN

Evaluasi kinerja struktur Gedung RSIA 8 lantai menggunakan ETABS V.20 melalui analisis riwayat waktu non-linear pada tiga skenario magnitudo gempa menunjukkan hasil sebagai berikut: (1) Gaya geser dasar hasil analisis riwayat waktu pada seluruh skenario melampaui 100% gaya geser dasar respons spektrum (Vx/Vrsa dan Vy/Vrsa > 100%), sehingga memenuhi syarat SNI 1726:2019 pasal 7.9.4 tanpa memerlukan penskalaan tambahan. (2) Simpangan antar lantai terbesar berada pada zona Lantai 5–6. Pada M 6,2, nilai maksimum mencapai 36,57 mm atau 91,4% dari batas izin 40 mm, sedangkan pada M 7,2 mencapai 30,32 mm atau 75,8%. Kedua skenario masih memenuhi batas izin SNI

1726:2019. Pada M 7,9, simpangan arah Y pada Lantai 5, 6, dan 7 mencapai 41,22 mm, 41,34 mm, dan 40,10 mm, atau sekitar 103,1%, 103,3%, dan 100,3% dari batas izin. Dengan demikian, struktur pada zona tersebut belum memenuhi persyaratan simpangan antar lantai SNI 1726:2019. (3) Level kinerja struktur menurut kriteria maximum total drift ATC-40 berada pada kategori Immediate Occupancy (IO) untuk skenario M 6,2 (rasio drift 0,00914) dan M 7,2 (rasio drift 0,00758), tetapi turun ke kategori Damage Control untuk skenario M 7,9 (rasio drift 0,01033).

Berdasarkan temuan tersebut, struktur RSIA yang ditinjau dapat diandalkan untuk tetap beroperasi segera pascagempa pada rentang magnitudo M 6,2 hingga M 7,2. Namun, pada kondisi setara M 7,9, struktur eksisting belum memenuhi syarat simpangan antar lantai SNI 1726:2019 dan berpotensi mengalami kerusakan yang memerlukan perbaikan struktural (kategori Damage Control), sehingga tidak dapat diandalkan sepenuhnya untuk tetap beroperasi segera pascagempa pada magnitudo tersebut - suatu kondisi yang kritis mengingat fungsi rumah sakit yang dipersyaratkan tetap beroperasi pascagempa (Kategori Risiko IV).

Untuk penelitian selanjutnya dan tindak lanjut perencanaan, disarankan: (1) melengkapi jumlah rekaman gempa pada setiap skenario menjadi sekurang-kurangnya tiga pasang sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.9.1, dan bila memungkinkan tujuh pasang atau lebih agar respons dapat dievaluasi menggunakan nilai rata-rata; (2) mengkaji alternatif penambahan kekakuan lateral, seperti penebalan dinding geser, penambahan bracing, atau penambahan dinding geser baru, khususnya pada zona Lantai 5–7 yang teridentifikasi sebagai lokasi kritis pada skenario M 7,9; (3) melakukan pemeriksaan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (soft-storey) sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.3.2.1 pada zona kritis; (4) melengkapi data simpangan Lantai 2 pada Skenario 2 sebelum naskah disubmit; dan (5) melakukan verifikasi hasil pemodelan menggunakan data tanah, arsitektur, dan spektrum desain lokasi aktual.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Civil Engineers. (2017). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-17). ASCE.

Applied Technology Council. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volume 1 (ATC-40). Applied Technology Council.

Badan Standardisasi Nasional. (2019a). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung (SNI 1726:2019). BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2019b). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 2847:2019). BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020). BSN.

Federal Emergency Management Agency. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356). FEMA.

Hasan, A., Iqbal, K. I. M., Ahammed, S., & Ghosh, A. (2023). Nonlinear time history analysis for seismic effects on reinforced concrete building. Nigerian Journal of Technological Development, 19(4), 391-399.

Jia, H., Song, Y., Chen, X., Liu, S., & Zhang, B. (2022). Seismic performance evaluation of a high-rise building with structural irregularities. Buildings, 12(9), 1484.

Novyeremia, D., Baru, F. H. R. H., & Meilawaty, O. (2023). Evaluasi kinerja struktur gedung terhadap gempa dengan analisis time history (studi kasus: Sekolah Nasional Global Nusantara Sampit Kab. Kotawaringin Timur). Jurnal Serambi Engineering, 8(4), 6983–6990. https://doi.org/10.32672/jse.v8i4.6713

Prayuda, H., Maulana, T. I., Putra, F. M. Y., Salsabila, B., & Saleh, F. (2023). Pengaruh ketidakberaturan bentuk bangunan beton bertulang bertingkat tinggi terhadap perilaku seismik. Jurnal Teknik Sipil ITB, 30(2), 307-320.

Saritaş, F., Bedirhanoglu, I., Konak, A., & Keskin, M. S. (2023). Effect of seismic isolation on the performance of high-rise buildings with torsional instability. Sustainability, 15(1), 36.

Shaaban, M., Abouelsaad, M. N., El Bagalaty, S., & El Madawy, M. E. (2022). Seismic analysis of RC high-rise buildings rested on cellular raft. Buildings, 12(11), 1924.