

Kajian Evaluasi Struktur Gedung Rumah Sakit Beton Bertulang 5 Lantai Berdasarkan Metode *Tier 1* ASCE 41-17

N.Z. Priyono¹, A.F. Setiawan^{1*}, I. Satyarno¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: angga.fajar.s@ugm.ac.id

INTISARI

Keandalan bangunan rumah sakit dalam menghadapi gempa bumi merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan, dikarenakan fungsinya yang vital pada saat terjadi dan setelah bencana. Oleh karena itu, bangunan rumah sakit perlu dipastikan tetap dapat difungsikan pascagempa, terutama bagi bangunan yang berfungsi sebagai fasilitas layanan kesehatan. Evaluasi dalam penelitian ini dilakukan pada suatu bangunan gedung rumah sakit lima lantai. Bangunan ini memiliki tambahan atap rangka baja dengan ketinggian total 24,345 meter dengan target kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* sesuai ASCE 41-17 melalui metode *Tier 1 Screening*. Evaluasi meliputi observasi visual, pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak untuk pemodelan numerik, serta pemeriksaan elemen struktural melalui *checklist*. Hasil menunjukkan bahwa beberapa komponen seperti distribusi massa, torsi, tegangan geser kolom serta sistem pelat datar tidak memenuhi kriteria (*non-compliant*). *Drift ratio* terbesar teridentifikasi pada lantai 5 dengan arah dominan respon struktur terhadap gempa berada pada sumbu X. Tegangan geser kolom menunjukkan nilai tertinggi pada lantai 4. Selain itu, tegangan aksial akibat guling menunjukkan dominasi respons terhadap gaya gempa pada arah X. Meski demikian, dinding geser menunjukkan kinerja efektif sebagai elemen penahan gaya lateral utama. Berdasarkan temuan ini, diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk memastikan kelayakan struktur dan mempertahankan fungsinya dalam mendukung pelayanan medis pascabencana.

Kata kunci: evaluasi struktur, rumah sakit, *Tier 1*, *quick check*, kinerja seismik.

1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada jalur Cincin Api Pasifik dan tergolong wilayah dengan aktivitas seismik tinggi akibat pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi ini menuntut bangunan memiliki ketahanan terhadap beban gempa, terutama bangunan vital seperti rumah sakit. Bangunan rumah sakit harus tetap dapat digunakan untuk pelayanan medis pascagempa untuk memberikan pelayanan medis kepada korban bencana. Kerusakan struktur maupun non-struktur pada bangunan rumah sakit dapat menyebabkan fasilitas tidak dapat beroperasi pascagempa sehingga berdampak besar pada penanganan korban bencana (Satyarno, 2011). Standar desain seismik Indonesia dan peta gempa telah berkembang seiring berjalannya waktu dan sudah terdapat 5 periode standar yang berbeda (Imran dkk., 2024). Pada tahun 2018, terjadi dua gempa besar di Lombok dan Palu yang memberikan dampak kerusakan infrastruktur publik seperti jembatan dan rumah sakit (Nugroho dkk., 2022). Melihat kondisi tersebut, perlu dilakukan evaluasi struktural bangunan rumah sakit yang sudah lama berdiri untuk memastikan bangunan tetap layak digunakan dalam mendukung pelayanan medis di Indonesia.

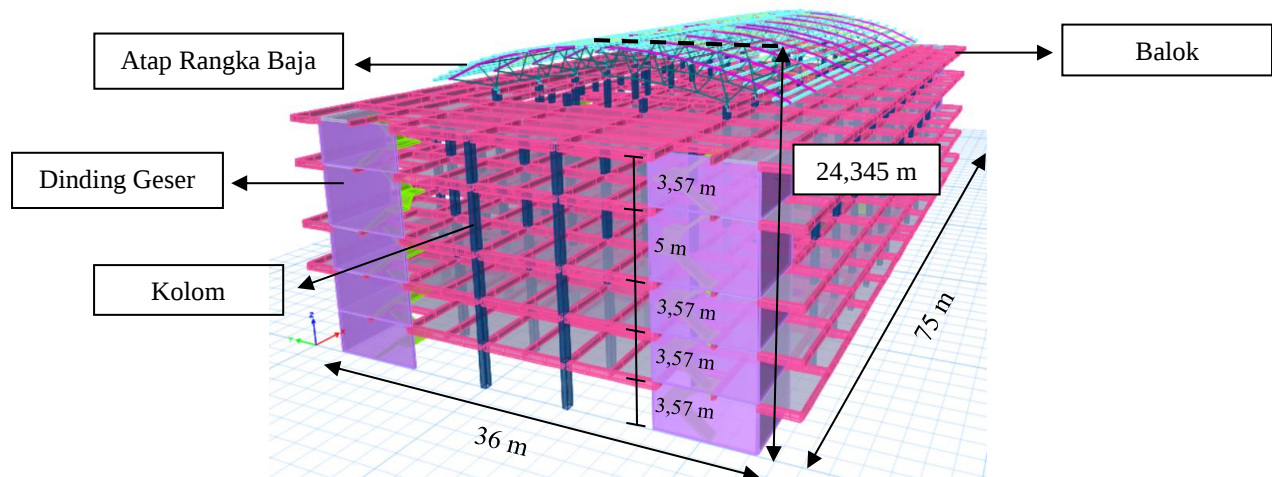
Suatu bangunan rumah sakit eksisting lima lantai, diketahui dirancang menggunakan standar dan peraturan lama, yaitu SNI 1726:2002 tentang ketahanan gempa dan SNI 2847:2002 tentang struktur beton bertulang. Kedua peraturan tersebut saat ini telah digantikan dengan peraturan terbaru, yaitu SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Seiring diberlakukannya standar baru tersebut, evaluasi terhadap bangunan eksisting menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa kinerja struktur masih sesuai dengan persyaratan dalam peraturan terkini. Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung eksisting menggunakan metode *Tier 1 Screening* berdasarkan standar ASCE 41-17, dengan berfokus pada komponen struktural. Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi kekurangan dan kerentanan struktur terhadap gaya gempa, terutama pada bangunan lama yang dibangun berdasarkan standar desain terdahulu yang belum tentu sesuai dengan kondisi seismik terkini (Imran dkk., 2024). Dalam standar ini, digunakan pendekatan *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE) yang mencakup gempa desain BSE-1E (periode ulang 250 tahun) dan BSE-2E (periode ulang 1000 tahun), dengan target kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* (ASCE 41-17, 2017). Dengan mempertimbangkan usia bangunan serta potensi penurunan kinerja struktur akibat perubahan kebutuhan maupun kondisi aktual di lapangan, kajian ini diperlukan untuk memastikan bangunan tetap layak dan aman terhadap peningkatan beban gempa berdasarkan peraturan terbaru.

Proses evaluasi pada penelitian ini dilakukan melalui observasi visual, pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak untuk pemodelan numerik, serta pemeriksaan elemen struktur utama berdasarkan *checklist* sesuai standar ASCE 41-17. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar analisis awal dalam mengidentifikasi ketidaksesuaian struktur terhadap kriteria kinerja minimum. Jika ditemukan defisiensi, maka evaluasi lanjutan menggunakan metode *Tier 2* atau *Tier 3* sesuai ketentuan ASCE 41-17 perlu dilakukan untuk memperoleh gambaran kinerja struktur yang lebih menyeluruh.

2 METODE

2.1 Pemodelan Struktur Gedung

Pada dasarnya, evaluasi *Tier 1* dalam ASCE 41-17 tidak mewajibkan pemodelan numerik karena pendekatannya bersifat kualitatif dan berbasis *checklist*. Namun, dalam penelitian ini pemodelan struktur tetap dilakukan untuk memberikan gambaran visual mengenai konfigurasi struktur bangunan dan mendukung tahapan evaluasi lanjutan. Gedung yang menjadi objek penelitian ini merupakan suatu bangunan gedung rumah sakit lima lantai. Bangunan ini memiliki tambahan atap rangka baja dengan total ketinggian mencapai 24,345 meter sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pemodelan struktur gedung dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk mendukung proses evaluasi kinerja seismik bangunan.



Gambar 1. Hasil pemodelan bangunan tampak 3D.

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memperoleh pemahaman mengenai evaluasi kinerja struktur bangunan terhadap gempa berdasarkan standar ASCE 41-17, serta referensi terkait pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak ETABS. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data sekunder yang meliputi gambar *As Built Drawing* (ABD) struktur gedung dan data parameter gempa berdasarkan lokasi bangunan. Tahap selanjutnya adalah evaluasi menggunakan metode *Tier 1* (*Screening*) berdasarkan standar ASCE 41-17, yang dilakukan dengan memeriksa daftar periksa (*checklist*) terhadap komponen struktural dan sistem bangunan. Evaluasi dilakukan melalui observasi visual, pemodelan struktur, serta peninjauan elemen-elemen struktur utama. Hasil dari evaluasi ini menentukan ada atau tidaknya defisiensi struktural. Jika ditemukan defisiensi, maka hasil tersebut menjadi dasar dalam menyusun rekomendasi lebih lanjut terhadap kondisi struktur.

2.3 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gambar struktur dan arsitektur (denah, tampak, potongan, dan detail), dan spesifikasi material. Data percepatan tanah dan parameter spektrum respons percepatan yang digunakan didasarkan pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa (2022) sesuai SNI 1726:2019, dengan mempertimbangkan nilai koefisien risiko pada lokasi penelitian.

2.3.1 Data teknis

Data teknis bangunan yang diperoleh dari gambar perencanaan adalah sebagai berikut.

- Struktur bangunan : sistem dinding geser beton bertulang khusus

- b. Fungsi bangunan : bangunan fasilitas kesehatan
- c. Kategori risiko : IV
- d. Jumlah lantai : 5 lantai dan atap rangka baja (ketinggian total bangunan 24,3451 m)
- e. Jenis tanah : tanah sedang (SD)
- f. Material yang digunakan adalah sebagai berikut.
 - 1) Material beton
 - Berat jenis beton : 24 kN/m³
 - Mutu beton, f'_c : 25 MPa
 - Modulus elastisitas beton : $4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{25} = 23500$ MPa
 - 2) Material baja tulangan
 - Baja tulangan (BJTS 40)
 - Berat jenis baja : 76,9729 kN/m³
 - Mutu baja, f_y dan f_u : 400 MPa dan 570 MPa
 - Modulus elastisitas baja : $1,999 \times 10^5$ MPa

2.3.2 Tingkat kegempaan

Menurut ASCE 41-17, tingkat kegempaan dapat dikategorikan menjadi 4 yaitu sangat rendah, rendah, sedang, dan tinggi. Penentuan tingkat kegempaan berdasarkan parameter percepatan respons spektra pada periode pendek (S_{DS}) dan parameter percepatan respons spektra pada periode 1 detik (S_{D1}). Berdasarkan lokasi penelitian, diperoleh nilai S_{DS} sebesar 0,7403 dan nilai S_{D1} sebesar 0,5761. Nilai tersebut memenuhi kriteria tingkat kegempaan tinggi, seperti didefinisikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi perhitungan gaya gempa pseudo

Tingkat kegempaan	S_{DS}	S_{D1}
Sangat rendah	< 0,167 g	< 0,067 g
Rendah	0,167-0,33 g	0,067-0,133 g
Sedang	0,33-0,50 g	0,133-0,20 g
Tinggi	$\geq 0,50$ g	$\geq 0,20$ g

2.4 Metode Evaluasi

Proses evaluasi *Tier 1* mencakup dua aspek utama, yaitu pemeriksaan cepat (*quick check*) terhadap kekuatan dan kekakuan struktur, serta evaluasi menggunakan daftar periksa (*checklist*) untuk menilai kondisi komponen struktur maupun nonstruktur. Setiap butir pernyataan dalam checklist harus ditandai dengan salah satu dari tiga kategori, yaitu "Compliant" (C), "Non-compliant" (NC), atau "Not Applicable" (N/A), serta dilakukan pengecekan terhadap gaya geser, tegangan geser, dan gaya aksial sesuai dengan ketentuan dalam ASCE 41-17. Kategori "Compliant" mengindikasikan bahwa elemen yang diperiksa telah memenuhi kriteria standar yang ditetapkan, sedangkan "Non-compliant" menunjukkan adanya ketidaksesuaian yang memerlukan evaluasi lanjutan melalui tahapan *Tier 2*, sebagaimana akan diterapkan pada kasus bangunan gedung rumah sakit lima lantai ini.

2.4.1 Kekuatan pseudo seismik

Gaya lateral pseudo pada arah horizontal bangunan harus dihitung menggunakan persamaan (1).

$$V = CS_a W \quad (1)$$

Pada persamaan (1), V adalah gaya gempa pseudo, C adalah faktor modifikasi berkaitan dengan perpindahan inelastis maksimum rencana dengan perpindahan untuk respon elastis, S_a adalah respons spektra percepatan pada periode fundamental bangunan, dan W adalah beban gempa efektif bangunan, terdiri dari beban mati dan beban hidup yang direduksi menjadi 25% dari beban hidup lantai.

2.4.2 Gaya geser tingkat

Gaya pseudo lateral dihitung sesuai dengan persamaan (2) dan (3).

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V \quad (2)$$

$$V_j = \sum_{x=j}^n F_x \quad (3)$$

Pada persamaan (2) dan (3), V_j adalah gaya geser tingkat pada lantai j , n adalah jumlah total lantai diatas tanah dasar, j adalah jumlah lantai pada tingkat lantai yang ditinjau, W adalah total berat seismik efektif bangunan, V adalah gaya gempa pseudo, w_i adalah total berat seismik efektif bangunan pada lantai i , w_x adalah total berat seismik efektif bangunan pada lantai x , h_i adalah tinggi bangunan dari lantai dasar I, h_x adalah tinggi bangunan dari lantai dasar x , F_x adalah kekuatan lateral pseudo, dan k adalah eksponen distribusi gaya lateral. Pada evaluasi ini, rumus tersebut tidak digunakan karena perhitungan gaya geser tingkat diperoleh langsung dari hasil *output* ETABS akibat kondisi gedung yang kompleks, dengan adanya elemen dinding geser sebagai bagian dari sistem penahan lateral.

2.4.3 Percepatan spektra

Percepatan spektra, S_a , yang digunakan untuk menghitung gaya gempa pseudo harus dihitung sesuai dengan persamaan (4).

$$S_a = \frac{S_{X1}}{T} \quad (4)$$

Pada persamaan (4), S_a adalah percepatan respons spektra pada periode fundamental bangunan, T adalah periode fundamental bangunan, dan S_{X1} adalah parameter percepatan respons spektra pada periode 1 detik.

Percepatan spektra respons, S_a , ditentukan dari percepatan spektra pada periode pendek S_{XS} dan periode 1 detik S_{X1} , dengan pemilihan rumus berdasarkan rentang periode fundamental struktur (T) sesuai ASCE 7-16.

1. Untuk $T < T_0$, respon spektrum percepatan, S_a , harus diambil dari persamaan (5).

$$S_a = S_{XS} \left[\left(\frac{5}{B_1} - 2 \right) \frac{T}{T_S} + 0,4 \right] \quad (5)$$

$$B_1 = 4 / [5,6 - \ln(100\beta)] \quad (6)$$

2. Untuk $T_0 \leq T \leq T_S$, respon spektrum percepatan, S_a , harus diambil dari persamaan (7).

$$S_a = S_{XS} / B_1 \quad (7)$$

3. Untuk $T_S < T \leq T_L$, respon spektrum percepatan, S_a , harus diambil dari persamaan (8).

$$S_a = S_{X1} / (B_1 T) \quad (8)$$

4. Untuk $T > T_L$, respon spektrum percepatan, S_a , harus diambil dari persamaan (9).

$$S_a = T_1 S_{X1} / (B_1 T^2) \quad (9)$$

Dengan T merupakan periode fundamental bangunan, B_1 merupakan koefisien redaman 5% untuk menyesuaikan respon spektrum terhadap pengaruh *viscous damping*, dan β merupakan rasio viskositas redaman efektif sistem struktur (5%).

2.4.4 Waktu getar alami

Periode fundamental bangunan, sesuai dengan arah yang ditentukan, harus dihitung sesuai dengan persamaan (10).

$$T = C_t h_n^\beta \quad (10)$$

Pada persamaan (10), T adalah periode fundamental bangunan, C_t adalah koefisien empiris tergantung sistem struktur, h_n adalah tinggi bangunan dari dasar bangunan ke tingkat atap, dan β adalah eksponen empiris yang mengontrol pengaruh tinggi bangunan terhadap periode. Persamaan tersebut digunakan untuk perhitungan percepatan spektra pada tahap awal. Namun, gaya geser yang diperoleh dari perhitungan ini tidak digunakan dalam analisis selanjutnya karena untuk *quick check pseudo seismic*, *story shear force*, serta *strength and stiffness* dilakukan menggunakan hasil *output* ETABS.

2.4.5 Rasio simpangan rangka momen

Rasio simpangan dari rangka momen regular, *multi-story*, *multi-bay* dengan kolom menerus diatas dan dibawah lantai yang ditinjau, dihitung menggunakan persamaan (11). *Drift ratio* bergantung pada simpangan yang terjadi akibat perpindahan lentur pada kolom, termasuk efek rotasi akhir akibat dari lentur pada balok.

$$DR = \left(\frac{k_b + k_c}{k_b k_c} \right) \left(\frac{h}{12E} \right) V_c \quad (11)$$

Pada persamaan (11), DR adalah rasio simpangan, yaitu simpangan antar lantai dibagi tinggi lantai, k_b adalah I/L representasi balok, k_c adalah I/h representasi kolom, h adalah tinggi lantai tingkat, I adalah momen inersia, L adalah panjang balok dari pusat ke pusat kolom, E adalah modulus elastisitas, dan V_c adalah gaya geser kolom. Persamaan ini hanya berlaku untuk sistem rangka momen tanpa kontribusi dari elemen dinding geser. Oleh karena itu, rumus ini tidak digunakan dalam evaluasi bangunan studi kasus yang memiliki elemen dinding geser sebagai bagian dari sistem penahan lateral. Pada penelitian ini, nilai DR tidak dihitung secara manual menggunakan persamaan tersebut, melainkan diperoleh langsung dari *output* ETABS. Selanjutnya, evaluasi kinerja dilakukan dengan membandingkan nilai *drift ratio* hasil analisis terhadap batas kriteria yang ditetapkan oleh FEMA 356, yaitu 0,5% untuk tingkat kinerja *Immediate Occupancy* dan 1,0% untuk *Life Safety*.

2.4.6 Tegangan geser pada kolom rangka beton

Tegangan geser rata-rata, V_j^{avg} , pada kolom dari rangka beton dapat dihitung menggunakan persamaan (12).

$$V_j^{avg} = \frac{1}{M_s} \left(\frac{n_c}{n_c - n_f} \right) \left(\frac{V_j}{A_c} \right) \quad (12)$$

Pada persamaan (12), V_j^{avg} adalah tegangan geser rata-rata pada kolom, n_c adalah jumlah total kolom, n_f adalah jumlah total rangka pada arah pembebanan, A_c adalah penjumlahan luas penampang melintang dari semua kolom pada lantai tingkat yang ditinjau, V_j adalah gaya geser tingkat, dan M_s adalah faktor modifikasi sistem bergantung pada level kinerja struktur yang dianalisis. Persamaan ini dikembangkan untuk menghitung tegangan geser rata-rata pada kolom dalam sistem struktur rangka momen murni. Karena bangunan studi kasus memiliki dinding geser sebagai elemen struktural utama terhadap gaya lateral, maka perhitungan ini tidak diterapkan secara langsung. Nilai V_j pada penelitian ini diperoleh langsung dari *output* ETABS.

2.4.7 Tegangan geser pada dinding geser

Tegangan geser rata-rata pada dinding geser, V_j^{avg} , dihitung sesuai dengan persamaan (13) sebagai berikut.

$$V_j^{avg} = \frac{1}{M_s} \left(\frac{V_j}{A_w} \right) \quad (13)$$

Pada persamaan (13), V_j adalah gaya geser lantai pada tingkat j , A_w adalah jumlah total dari luas penampang horizontal seluruh dinding geser pada arah pembebanan, dan nilai M_s dipilih berdasarkan jenis komponen struktur (misalnya kolom atau dinding geser), tipe material, serta tingkat kinerja. Nilai V_j pada penelitian ini diperoleh langsung dari *output* ETABS.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gaya Seismik

Analisis gaya seismik dilakukan untuk dua level kinerja bangunan, yaitu *Immediate Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS), mengacu pada ASCE 41-17. Pada level IO (BSE-1E), digunakan nilai percepatan spektral S_{XS} sebesar 0,65 dan S_{X1} sebesar 0,45. Sedangkan pada level LS (BSE-2E), digunakan nilai S_{XS} sebesar 0,95 dan S_{X1} sebesar 0,755. Nilai percepatan spektral S_a diperoleh dari rasio S_{X1}/T dan dibatasi oleh nilai S_{XS} jika melebihi batas. Gaya gempa pseudo dihitung berdasarkan nilai S_a , berat seismik efektif W , dan faktor modifikasi C . Parameter lainnya seperti T merupakan periode fundamental struktur yang dihitung dengan Persamaan (10), W merupakan berat seismik efektif bangunan, faktor modifikasi $C = 1,0$ mengacu pada ASCE 41-17 untuk bangunan tipe *shear wall* dengan jumlah lantai ≥ 4 , dan V dihitung berdasarkan Persamaan (1). Rekapitulasi parameter dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi perhitungan gaya gempa pseudo

Parameter	BSE-1E (<i>Immediate Occupancy</i>)	BSE-2E (<i>Life Safety</i>)
S_{xs}	0,65 g	0,95 g
S_{x1}	0,45 g	0,755 g
T	0,465 detik	0,465 detik
S_{x1}/T	0,8421 g	1,4129 g
S_a	0,65 g (karena $S_{x1}/T > S_{xs}$)	0,95 g (karena $S_{x1}/T > S_{xs}$)
C	1,0	1,0
W	120.565,71 kN	120.565,71 kN
V	78367,71 kN	114.537,42 kN

3.2 Gaya Geser Tingkat

Gaya gempa pseudo akan didistribusikan secara vertikal melalui Persamaan (2) dan (3) yang dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut. Hasil gaya geser ini tidak digunakan untuk analisis lanjut karena perhitungan utama telah mengacu pada *output* ETABS yang mempertimbangkan keberadaan dinding geser.

Tabel 3. Gaya geser tingkat *Immediate Occupancy*

Lantai	$j=i=x$	w_x kN	h_x m	h_x^k m	$w_x h_x^k$	$F_x IO$ kN	V_j kN
Atap 1	6	396,55	20,25	21,32	8455,92	535,36	535,36
Atap	5	10.079,26	19,28	20,29	204.459,62	12.944,76	13.480,12
5	4	25.511,77	15,71	16,47	420.205,17	26.604,05	40.084,17
4	3	27.900,50	10,71	11,16	311.234,84	19.704,91	59.789,08
3	2	25.997,69	7,14	7,39	191.997,39	12.155,75	71.944,83
2	1	27.802,45	3,57	3,65	101.448,01	6422,88	78.367,71
		117.688,22			1.237.800,95	78.367,71	

Tabel 4. Gaya geser tingkat *Life Safety*

Lantai	$j=i=x$	w_x kN	h_x m	h_x^k m	$w_x h_x^k$	$F_x LS$ kN	V_j kN
Atap 1	6	396,55	20,25	21,32	8455,92	782,45	782,45
Atap	5	10.079,26	19,28	20,29	204.459,62	18.919,26	19.701,71
5	4	25.511,77	15,71	16,47	420.205,17	38.882,84	58.584,55
4	3	27.900,50	10,71	11,16	311.234,84	28.799,49	87.384,04
3	2	25.997,69	7,14	7,39	191.997,39	17.766,09	105.150,13
2	1	27.802,45	3,57	3,65	101.448,01	9387,29	114.537,42
		117.688,22			1.237.800,95	114.537,42	

3.3 Quick Check kekakuan dan kekuatan komponen

Quick check merupakan evaluasi awal untuk menilai kapasitas kekuatan dan kekakuan struktur berdasarkan parameter kritis. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi potensi ketidaksesuaian terhadap kriteria performa dalam ASCE 41-17. Hasil *quick check* akan menjadi dasar penentuan perlunya evaluasi lanjutan pada *Tier 2* atau *Tier 3*.

3.3.1 Rasio simpangan pada rangka momen

Simpangan lateral antar tingkat (*interstory drift*) berperan penting dalam menjaga stabilitas dan kenyamanan struktur selama gempa. Dalam penelitian ini, *drift ratio* dihitung berdasarkan rasio selisih perpindahan antar lantai terhadap tinggi lantai (Δ/h), di mana nilai Δ merupakan selisih perpindahan absolut lantai atas dan bawah pada arah analisis. Hasil perhitungan *story drift* pada masing-masing lantai untuk arah X dan Y dengan kinerja *immediate occupancy* dan *life safety* dapat dilihat pada Tabel 5 hingga Tabel 8. Nilai *drift ratio* maksimum pada kedua arah dan level kinerja terjadi di lantai 5, yang menandakan bahwa lantai ini memiliki kekakuan relatif paling rendah, sehingga menjadi titik kritis dalam respons struktur terhadap beban gempa. Selain itu, arah X menunjukkan nilai *drift* yang lebih tinggi dibandingkan arah Y, sehingga arah X menjadi arah dominan dalam respons struktur terhadap beban gempa.

Tabel 5. Rasio simpangan untuk rangka momen arah X pada kinerja *Immediate Occupancy*

Lantai	h_{sx} (mm)	δ_x (mm)	Δ (mm)	Drift Ratio (mm)	Drift Ratio %	Max. Drift Ratio* %	Ket
L. Atap 1	970	65,68	0,81	0,0008	0,08%	0,50%	OK
L. Atap	3570	64,87	4,71	0,0013	0,13%	0,50%	OK
Lantai 5	5000	60,15	22,99	0,0046	0,46%	0,50%	OK
Lantai 4	3570	37,16	14,55	0,0041	0,41%	0,50%	OK
Lantai 3	3570	22,62	13,96	0,0039	0,39%	0,50%	OK
Lantai 2	3570	8,66	8,66	0,0024	0,24%	0,50%	OK

*Batas maksimum *drift ratio* sesuai ketentuan FEMA 356Tabel 6. Rasio simpangan untuk rangka momen arah Y pada kinerja *Immediate Occupancy*

Lantai	h_{sy} (mm)	δ_y (mm)	Δ (mm)	Drift Ratio (mm)	Drift Ratio %	Max. Drift Ratio* %	Ket
L. Atap 1	970	61,61	4,09	0,0042	0,42%	0,50%	OK
L. Atap	3570	65,70	0,36	0,0001	0,01%	0,50%	OK
Lantai 5	5000	65,34	23,09	0,0046	0,46%	0,50%	OK
Lantai 4	3570	42,26	14,63	0,0041	0,41%	0,50%	OK
Lantai 3	3570	27,63	15,90	0,0045	0,45%	0,50%	OK
Lantai 2	3570	11,73	11,73	0,0033	0,33%	0,50%	OK

*Batas maksimum *drift ratio* sesuai ketentuan FEMA 356Tabel 7. Rasio simpangan untuk rangka momen arah X pada kinerja *Life Safety*

Lantai	h_{sx} (mm)	δ_x (mm)	Δ (mm)	Drift Ratio (mm)	Drift Ratio %	Max. Drift Ratio* %	Ket
L. Atap 1	970	96,00	1,19	0,0012	0,12%	1,00%	OK
L. Atap	3570	94,81	6,89	0,0019	0,19%	1,00%	OK
Lantai 5	5000	87,93	33,61	0,0067	0,67%	1,00%	OK
Lantai 4	3570	54,32	21,26	0,0060	0,60%	1,00%	OK
Lantai 3	3570	33,06	20,40	0,0057	0,57%	1,00%	OK
Lantai 2	3570	12,66	12,66	0,0035	0,35%	1,00%	OK

*Batas maksimum *drift ratio* sesuai ketentuan FEMA 356Tabel 8. Rasio simpangan untuk rangka momen arah Y pada kinerja *Life Safety*

Lantai	h_{sy} (mm)	δ_y (mm)	Δ (mm)	Drift Ratio (mm)	Drift Ratio %	Max. Drift Ratio* %	Ket
L. Atap 1	970	90,05	5,98	0,0062	0,62%	1,00%	OK
L. Atap	3570	96,03	0,52	0,0001	0,01%	1,00%	OK
Lantai 5	5000	95,50	33,74	0,0067	0,67%	1,00%	OK
Lantai 4	3570	61,76	21,38	0,0060	0,60%	1,00%	OK
Lantai 3	3570	40,38	23,24	0,0065	0,65%	1,00%	OK
Lantai 2	3570	17,14	17,14	0,0048	0,48%	1,00%	OK

*Batas maksimum *drift ratio* sesuai ketentuan FEMA 356

3.3.2 Tegangan geser pada kolom rangka beton

Tegangan geser pada kolom merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kemampuan elemen struktur kolom dalam menahan gaya lateral akibat gempa. Evaluasi ini dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan geser yang terjadi masih berada dalam batas kapasitas yang diperbolehkan. Dalam penelitian ini, nilai tegangan geser rata-rata ($V_{j Avg}$) pada kolom dihitung dengan membagi jumlah total gaya geser kolom (V_j) pada setiap lantai dengan luas total

penampang kolom (A_c) di lantai tersebut. Perhitungan dilakukan berdasarkan arah pembebanan X dan Y dengan level kinerja *immediate occupancy* dan *life safety* seperti ditunjukkan pada Tabel 9 dan Tabel 10. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan geser tertinggi terjadi pada lantai 3 dan lantai 4 untuk seluruh kondisi arah dan level kinerja. Hal ini menunjukkan adanya konsentrasi gaya lateral signifikan di lantai tersebut.

Tabel 9. Tegangan geser rerata kolom *Immediate Occupancy*

Lantai	n_c	M_s	A_c (mm ²)	Arah X		Arah Y		Ket	Arah X	Arah Y
				V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	$0,167 \sqrt{f'_c}$ Mpa	Ket	Ket
L. Atap 1	20	1	5.000.000	768.954,4	0,15	790.924,9	0,16	0,84	C	C
L. Atap	56	1	13.640.000	4.583.432,0	0,34	2.257.737,2	0,17		C	C
Lantai 5	72	1	17.480.000	8.684.240,6	0,50	5.592.977,6	0,32		C	C
Lantai 4	72	1	17.480.000	10.819.230,9	0,62	8.237.130,6	0,47		C	C
Lantai 3	72	1	17.480.000	10.692.038,6	0,61	8.305.984,5	0,48		C	C
Lantai 2	72	1	17.480.000	10.447.564,8	0,60	8.082.228,7	0,46		C	C

Tabel 10. Tegangan geser rerata kolom *Life Safety*

Lantai	n_c	M_s	A_c (mm ²)	Arah X		Arah Y		Ket	Arah X	Arah Y
				V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	$0,167 \sqrt{f'_c}$ Mpa	Ket	Ket
L. Atap 1	20	1,5	5.000.000	1.123.856,4	0,15	1.155.967,3	0,15	0,84	C	C
L. Atap	56	1,5	13.640.000	6.698.862,1	0,33	3.299.769,6	0,16		C	C
Lantai 5	72	1,5	17.480.000	12.692.352,1	0,48	8.174.351,8	0,31		C	C
Lantai 4	72	1,5	17.480.000	15.812.722,2	0,60	12.038.883,8	0,46		C	C
Lantai 3	72	1,5	17.480.000	15.626.826,1	0,60	12.139.515,5	0,46		C	C
Lantai 2	72	1,5	17.480.000	15.269.518,0	0,58	11.812.488,5	0,45		C	C

3.3.3 Tegangan geser pada dinding geser

Tegangan geser pada dinding geser merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kemampuan sistem struktur vertikal dalam menahan gaya lateral akibat gempa. Dalam penelitian ini, nilai tegangan geser rata-rata ($V_{j\text{ Avg}}$) dihitung dengan membagi total gaya geser (V_j) pada dinding geser di tiap lantai dengan luas total penampang dinding geser (A_w) pada masing-masing lantai. Tegangan geser ditinjau pada arah X dan arah Y dengan level kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* seperti ditunjukkan pada Tabel 11 dan Tabel 12. Berdasarkan hasil evaluasi, tegangan geser tertinggi pada kedua arah terjadi di lantai 2 untuk untuk kedua level kinerja. Hal ini menunjukkan adanya distribusi gaya lateral yang lebih besar pada lantai tersebut. Distribusi ini mengindikasikan bahwa konfigurasi distribusi massa dan kekakuan lateral berperan besar dalam menentukan respons geser vertikal, dengan lantai bawah sebagai area kritis utama.

Tabel 11. Tegangan geser rerata pada dinding geser pada level kinerja *Immediate Occupancy*

Lantai	M_s	A_{wX} mm ²	A_{wY} mm ²	Arah X		Arah Y		Ket	Arah X	Arah Y
				V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	V_j (N)	$V_{j\text{ Avg}}$ (MPa)	$0,167 \sqrt{f'_c}$ Mpa	Ket	Ket
L. Atap	1,5	44.260.000	53.560.000	6.119.079,9	0,09	9.267.292,3	0,12	0,84	C	C
Lantai 5	1,5	62.000.000	75.000.000	20.803.397,6	0,22	25.318.488,3	0,23		C	C
Lantai 4	1,5	44.260.000	53.560.000	31.440.541,1	0,47	35.941.797,5	0,45		C	C
Lantai 3	1,5	44.260.000	53.560.000	39.888.415,9	0,60	44.666.443,1	0,56		C	C
Lantai 2	1,5	44.260.000	53.560.000	44.178.525,6	0,67	49.131.555,1	0,61		C	C

Tabel 12. Tegangan geser rerata pada dinding geser pada level kinerja *Life Safety*

Lantai	M_s	A_{wX} mm ²	A_{wY} mm ²	Arah X		Arah Y		Ket $0,167 \sqrt{f'_c}$ Mpa	Arah X	Arah Y
				V_j (N)	$V_{j\ Avg}$ (MPa)	V_j (N)	$V_{j\ Avg}$ (MPa)		Ket	Ket
L. Atap	3	44.260.000	53.560.000	8.943.270,8	0,07	13.544.504,1	0,08		C	C
Lantai 5	3	62.000.000	75.000.000	30.404.965,7	0,16	37.003.944,7	0,16		C	C
Lantai 4	3	44.260.000	53.560.000	45.951.560,3	0,35	52.530.319,6	0,33	0,84	C	C
Lantai 3	3	44.260.000	53.560.000	58.298.454,0	0,44	65.281.724,6	0,41		C	C
Lantai 2	3	44.260.000	53.560.000	64.568.614,5	0,49	71.807.657,3	0,45		C	C

3.4 Checklist Komponen Struktural

3.4.1 Basic configuration checklist

Checklist ini mencakup evaluasi terhadap aspek umum bangunan, seperti sistem struktur, konfigurasi bangunan, serta penilaian risiko kegagalan yang berkaitan dengan kondisi geologi dan geoteknik. Hasil dari pemeriksaan konfigurasi dasar ditunjukkan pada Tabel 13. Berdasarkan hasil evaluasi, mayoritas komponen dalam *basic configuration checklist* dinyatakan memenuhi (*Compliant*), antara lain lintasan beban, bangunan yang berdekatan, ketidakberaturan vertikal, geometri, torsi, serta konfigurasi mezzanine yang tidak ada (*N/A*). Namun demikian, ditemukan beberapa aspek yang dikategorikan sebagai *Non-Compliant (NC)*, yaitu pada komponen massa. Hal ini menunjukkan adanya potensi ketidakseimbangan distribusi massa yang perlu dikaji lebih lanjut.

Tabel 13. Hasil pemeriksaan *basic configuration checklist*

No	Checklist	Keterangan
<i>Building System - General</i>		
1	Lintasan beban (<i>Load Path</i>)	C
2	Bangunan yang berdekatan (<i>Adjacent Buildings</i>)	C
3	Mezanin (<i>Mezzanines</i>)	N/A
<i>Building System - Building Configuration</i>		
4	Tingkat lemah (<i>Weak Story</i>)	C
5	Tingkat lunak (<i>Soft Story</i>)	C
6	Ketidakberaturan Vertikal (<i>Vertical Irregularities</i>)	C
7	Geometri (<i>Geometry</i>)	C
8	Massa (<i>Mass</i>)	NC
9	Torsi (<i>Torsion</i>)	C

3.4.2 Immediate occupancy checklist

Checklist ini merupakan tahap evaluasi lebih mendalam terhadap elemen-elemen struktural utama bangunan untuk menilai kesesuaian terhadap target kinerja *Immediate Occupancy* sesuai ASCE 41-17. Objek bangunan merupakan struktur beton bertulang dengan klasifikasi tipe C2 untuk kondisi seismik tinggi. Hasil dari pemeriksaan ditunjukkan pada Tabel 14.. Berdasarkan hasil evaluasi, diketahui bahwa beberapa komponen berada dalam kondisi *Compliant* seperti redundansi sistem, tulangan baja, ketebalan dinding geser, dan pengekang tulangan kolom. Namun demikian, terdapat elemen yang tergolong *Non-Compliant (NC)*, seperti pelat datar (*flat slab beam*) yang menunjukkan bahwa elemen-elemen ini memerlukan perhatian lebih dalam upaya perkuatan.

Tabel 17. Hasil pemeriksaan *immediate occupancy checklist* pada bangunan C2

No	Checklist	Keterangan
<i>Low, Moderate, and High Seismicity</i>		
<i>Seismic-Force-Resisting System</i>		
1	Kompatibilitas Defleksi (<i>Deflection Compatibility</i>)	N/A
2	Pelat Datar (<i>Flat Slabs</i>)	NC
3	Balok Penghubung (<i>Coupling Beams</i>)	N/A
4	Pembalikan Mata Angin (<i>Overtuning</i>)	C
5	Pengikat untuk Kekuatan Geser (<i>Confinement Reinforcing</i>)	N/A
6	Penguatan Dinding Di Sekitar Bukaannya (<i>Wall Reinforcing at Openings</i>)	N/A
7	Ketebalan Dinding Penahan (<i>Wall Thickness</i>)	C
<i>Diaphragms (Stiff or Flexible)</i>		
8	Kontinuitas Diafragma (<i>Diaphragm Continuity</i>)	N/A
9	Pembukaan Di Sekitar Dinding Geser (<i>Openings at Shear Walls</i>)	N/A
10	<i>Plan Irregularities</i>	N/A
11	Perkuatan Diafragma Pada Pembukaan (<i>Diaphragm Reinforcement at Openings</i>)	N/A

4 KESIMPULAN

1. Pemeriksaan awal melalui *basic configuration checklist* dan *immediate occupancy checklist* ditemukan bahwa beberapa komponen tidak memenuhi persyaratan (*Non-Compliant*). Pada *basic configuration checklist*, komponen massa (*mass*) dinyatakan *Non-Compliant*, yang mengindikasikan adanya potensi ketidakseimbangan distribusi massa pada struktur. Sementara itu, pada *immediate occupancy checklist*, pelat datar (*flat slab beam*) juga dinyatakan *Non-Compliant*.
2. Nilai *drift ratio* maksimum terjadi pada lantai 5 dengan arah dominan X. Pada level *Immediate Occupancy* (0,5%) maupun *Life Safety* (1,0%), seluruh lantai masih berada dalam batas kriteria FEMA 356. Namun, lantai 5 menunjukkan simpangan relatif terbesar sehingga berperan sebagai lantai paling lemah yang perlu diperhatikan pada evaluasi lanjutan.
3. Pada perhitungan tegangan geser kolom, nilai tegangan geser rata-rata tertinggi terjadi pada lantai 3 dan 4, baik pada arah X maupun Y. Meskipun demikian, seluruh nilai tegangan masih berada di bawah ambang batas ($0,167 \sqrt{f'_c}$), sehingga kondisi kolom dapat dinyatakan aman.
4. Nilai tegangan geser tertinggi pada dinding geser terjadi di lantai 2, baik pada level *Immediate Occupancy* maupun *Life Safety*. Distribusi gaya lateral meningkat ke arah bawah struktur, namun seluruh nilai tegangan masih dalam batas izin sehingga dinding geser berfungsi efektif sebagai elemen penahan gaya lateral utama.
5. Secara umum, struktur bangunan rumah sakit ini masih memenuhi kriteria kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. Meskipun demikian, keberadaan elemen *Non-Compliant* menandakan perlunya evaluasi lebih lanjut menggunakan metode *Tier 2* atau *Tier 3* untuk memastikan keandalan seismik bangunan secara menyeluruh.
6. Penggunaan standar ASCE 41-17 dalam evaluasi struktur memerlukan ketelitian dan penyesuaian, khususnya pada bangunan dengan konfigurasi kompleks. Rumus dan pendekatan yang tersedia tidak selalu mencerminkan kondisi aktual, sehingga modifikasi perhitungan sering kali diperlukan agar hasil evaluasi lebih representatif terhadap respons struktur yang sebenarnya. Dengan demikian, hasil evaluasi dapat lebih akurat dan relevan untuk mendukung pengambilan keputusan teknis terkait kondisi struktur.

REFERENSI

- ASCE. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-16)*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASCE. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE 41-17)*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 8899:2020 Tata Cara Pemilihan dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Daei, A., & Zarrin, M. (2023). *Assessing seismic performance of code-compliant steel special moment frames using ASCE 41-17*. *Structures*, 54, 764–784. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.067>
- FEMA. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Imran, I., Siringoringo, D. M., & Rainyana, S. S. (2024). *Seismic evaluation and retrofit of a typical reinforced concrete hospital building in Indonesia with DCFP isolation system*. *Structures*, 64, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106953>
- Nugroho, W. C. (2022). *The evolution of Indonesian seismic and concrete building codes: From the past to the present*. *Structures*, 41, 1092–1108. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.032>
- Satyarno, I. (2011). *Seismic Risk of Important Buildings (Case: Hospitals in Indonesia – Recent Earthquakes)*. Proceedings of The 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM-II), Surabaya, Indonesia.