



Tersedia secara online di <http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jatiunik/index>

JATI UNIK

Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri



Evaluasi Struktur Bangunan Eksisting Menggunakan FMEA- Fishbone Diagram Untuk Keperluan Pemeriksaan Kelaikan Fungsi Bangunan

(Studi Kasus: Gedung Toko, Jl. Persada, Desa/Kelurahan Kerobokan Kelod, Kec.
Kuta Utara, Kab.Badung, Bali)

I Kadek Yoga Dwi Mahendra^{*1}, I Gede Adi Susila², Ida Ayu Made Budiwati³

dwiyoga499@gmail.com^{*1}, adiari2007@gmail.com², idabudiwati@unud.ac.id³

^{1,2,3}Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Informasi Artikel

Riwayat Artikel :

Received : 8 – Nopember - 2025

Revised : 25 – Nopember - 2025

Accepted : 21 – Februari- 2026

Keywords :

accident risk assessment; ETABS; FMEA; nonlinear pushover analysis; structural performance

Abstract

This study examines the integration of structural performance analysis and occupational accident risk assessment in a multi-storey building project using a quantitative approach based on nonlinear pushover analysis and FMEA. Structural evaluation is commonly conducted separately from safety risk analysis, resulting in non-integrated technical decision-making and risk control. This study aims to identify the seismic performance of the structure and determine accident risk priorities based on the Risk Priority Number (RPN). Nonlinear pushover analysis was performed using ETABS to obtain drift and base shear values; risk evaluation applied FMEA (Severity, Occurrence, Detection); and root causes were analyzed using a Fishbone Diagram. The maximum drift reached 216.317 mm with a base shear of 45,737.96 kN (Infilled Frame, Y-direction) and 206.337 mm with 10,199.32 kN (Open Frame, Y-direction). The highest risk occurred in foundation work with an RPN of 174,857.14. Strengthening lower-storey stiffness and implementing performance-based high-priority risk control are required. This research proposes an integrated evaluation model linking structural response and construction safety risk management quantitatively and systematically.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji integrasi analisis kinerja struktur dan risiko kecelakaan kerja pada proyek gedung bertingkat menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pushover nonlinier dan FMEA. Evaluasi struktur umumnya terpisah dari analisis risiko keselamatan, sehingga keputusan teknis dan pengendalian risiko belum terintegrasi. Studi ini akan mengidentifikasi kinerja seismik struktur serta menentukan prioritas risiko kecelakaan berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Analisis pushover nonlinier menggunakan ETABS untuk memperoleh drift dan base shear; evaluasi risiko menggunakan FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*); serta analisis akar penyebab melalui *Fishbone Diagram*. Drift maksimum mencapai 216,317 mm dengan *base shear* 45.737,96 kN (IF arah Y) dan 206,337 mm dengan 10.199,32 kN (OF arah Y). Risiko tertinggi terjadi pada pekerjaan pondasi dengan RPN 174.857,14. Diperlukan penguatan kekakuan lantai bawah dan pengendalian risiko prioritas tinggi berbasis kinerja. Penelitian ini menawarkan model evaluasi terpadu yang

Untuk melakukan sitasi pada penelitian ini dengan format: I. K. Y. D. Mahendra, I. G. A. Susila, and I. A. M. Budiwati, "Evaluasi Struktur Bangunan Eksisting Menggunakan FMEA-*Fishbone Diagram* untuk Keperluan Pemeriksaan Kelaikan Fungsi Bangunan (Studi Kasus: Gedung Toko, Jl. Persada, Desa/Kelurahan Kerobokan Kelod, Kec. Kuta Utara, Kab. Badung, Bali)," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri*, vol. 9, no. 2, pp. 25–37.

menghubungkan respons struktural dan manajemen risiko keselamatan secara kuantitatif dan sistematis.

1. Pendahuluan

Bangunan gedung yang sudah berdiri untuk melakukan operasionalnya harus mempunyai Sertifikat Laik Fungsi sesuai PP 16/2021. PP 16/2021 dan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2018 menyatakan bahwa Sertifikat Laik Fungsi (SLF) diterbitkan oleh pemerintah untuk menyatakan kelaikan fungsi bangunan gedung sebagai syarat pemanfaatan; SLF mencakup persyaratan administratif maupun teknis [1]. Dalam aspek teknis, kriteria keandalan bangunan meliputi keselamatan, kesehatan, kenyamanan, dan kemudahan pemanfaatan [2]. Khusus pada aspek struktur, persyaratan keselamatan merujuk pada kemampuan struktur menahan beban yang direncanakan sepanjang masa layanannya. Namun, selama masa layanan, bangunan eksisting terutama yang dibangun 5–50 tahun lalu rentan terhadap degradasi akibat beban gempa, perubahan fungsi, kondisi lingkungan, dan faktor operasional lainnya sehingga memerlukan evaluasi berkala [3], [4].

Di Indonesia belum terdapat dokumen standar nasional yang komprehensif untuk evaluasi struktur eksisting terhadap beban gempa; praktik umum seringkali mengasumsikan model rangka terbuka yang kurang mewakili kondisi aktual karena keberadaan dinding pengisi. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi struktur eksisting dengan pemodelan kondisi *open frame* dan *infilled frame* serta menetapkan level kinerja yang diharapkan; bila tidak terpenuhi, dilakukan perencanaan perkuatan [5], [6]. Prosedur evaluasi mengacu pada langkah-langkah ASCE 41-17 [7], [8], [9], [10], dimulai dari peninjauan awal secara visual dan verifikasi dokumen as-built [11], [12], penentuan tujuan kinerja, pengumpulan data lapangan termasuk NDT, hingga analisis struktur menggunakan pendekatan linear maupun nonlinier sesuai kebutuhan.

Kebutuhan evaluasi kinerja seismik bangunan eksisting secara komprehensif, khususnya pada struktur rangka beton bertulang dengan konfigurasi *open frame* dan *infilled frame* yang menunjukkan respons berbeda terhadap beban gempa. *Drift* OF arah Y > 200 mm dengan *base shear* >10000 kN, serta transisi kinerja IF arah Y >200 mm dan >45000 kN (mencapai level LS–CP). Kondisi ini mengindikasikan potensi kerusakan non-struktural hingga risiko kerusakan struktural saat gempa ekstrem. Kekakuan lantai 1 yang lebih rendah (X: 156.859 kN/m; Y: 110.811 kN/m) dibanding lantai atas menimbulkan kecenderungan konsentrasi *drift* bawah. Tanpa evaluasi berbasis *pushover nonlinier*, FMEA, dan

identifikasi akar penyebab, risiko kegagalan parsial dapat terabaikan. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk meningkatkan akurasi penilaian kinerja, mitigasi risiko, serta dasar rekomendasi perkuatan yang terukur dan berbasis kinerja.

Studi empiris menyatakan proyek konstruksi memiliki risiko kecelakaan signifikan di setiap tahap, namun integrasi analisis risiko FMEA (RPN tertinggi 174.857,14 pada pekerjaan pondasi) dengan evaluasi kinerja struktur berbasis perangkat lunak masih terbatas [3], [6], [13], [14]. Belum optimalnya pendekatan terpadu yang menghubungkan analisis risiko kecelakaan kerja dan analisis struktural berbasis ETABS untuk mendukung keputusan teknis dan keselamatan proyek [2], [15], [16], [17]. Belum terdapat studi pada gedung lantai 4 dengan basis level IO–LS–CP kuantifikasi risiko, model evaluasi terpadu yang menghubungkan analisis risiko kecelakaan kerja (*Severity, Occurrence, Detection*) dengan hasil analisis teknis struktur (gaya geser, momen, reaksi pondasi, dan kapasitas elemen), sehingga pengambilan keputusan teknis dan manajemen keselamatan masih berjalan parsial. Penelitian ini diperlukan untuk mengembangkan kerangka integratif yang mampu menyinergikan aspek keselamatan konstruksi dan kinerja struktural secara kuantitatif.

Penelitian ini menawarkan pendekatan terintegrasi antara analisis pushover nonlinier, evaluasi kinerja berbasis level IO–LS–CP, serta kuantifikasi risiko menggunakan FMEA yang dipadukan dengan *Fishbone Diagram*. Kombinasi evaluasi numerik (drift 206,337–216,317 mm; base shear hingga 45.737,96 kN) dan analisis akar penyebab memberikan kerangka penilaian kinerja yang tidak hanya menilai kapasitas struktur, tetapi juga memetakan risiko kegagalan secara sistematis. Integrasi Open Frame dan Infilled Frame dalam satu model komparatif juga menjadi aspek kebaruan dalam memahami interaksi kekakuan, kekuatan, dan risiko.

Studi ini berupaya untuk mengevaluasi kinerja seismik struktur menggunakan analisis pushover nonlinier berbasis level kinerja (IO, LS, CP), potensi *failure mode* melalui parameter drift, kekakuan, dan kekuatan struktur, mengkuantifikasi tingkat risiko menggunakan FMEA untuk memperoleh nilai RPN, menganalisis akar penyebab kerentanan struktur menggunakan *Fishbone Diagram* strategi rekomendasi mitigasi berbasis kinerja dan risiko. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metode evaluasi bangunan eksisting yang lebih komprehensif dengan menggabungkan pendekatan kinerja struktur dan manajemen risiko teknik. Ini akan memperkaya literatur evaluasi seismik dengan model integratif yang mampu menghubungkan respons struktural (*drift, base shear, kekakuan*) dengan prioritas risiko teknis, sehingga mendukung pengambilan keputusan retrofit yang lebih presisi dan berbasis data kuantitatif.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain evaluatif-kuantitatif dengan pendekatan analisis kinerja seismik berdasarkan prosedur ASCE 41-17 [10]. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi tingkat kinerja seismik bangunan toko empat lantai terhadap beban gempa dengan mempertimbangkan level bahaya BSE-2N (MCER) sesuai SNI 1726:2019, yang merepresentasikan gempa dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun [18].

2.2 Populasi dan Sampel

Populasi penelitian mencakup seluruh bangunan toko bertingkat di wilayah studi yang memiliki karakteristik struktur beton bertulang empat lantai dengan sistem rangka terbuka. Sampel penelitian ditetapkan secara *purposive sampling*, yaitu satu bangunan toko empat lantai yang memiliki dokumen perencanaan lengkap dan dapat diakses untuk inspeksi struktural serta uji material. Pemilihan sampel ini dilakukan untuk memperoleh representasi kondisi struktur eksisting secara faktual serta memungkinkan validasi langsung terhadap model numerik.

2.3 Instrumen Penelitian

Instrumen yang dipakai mencakup alat pengukuran struktur seperti meteran laser, waterpass, dan kaliper digital untuk memverifikasi dimensi aktual kolom, balok, pelat, serta dinding; lembar *checklist* Tier 1 dari ASCE 41-17 untuk identifikasi awal defisiensi; perangkat uji non-destruktif (*hammer test* dan *ultrasonic pulse velocity*) guna menilai mutu material tanpa merusak elemen [2], [19]; perangkat lunak ETABS untuk analisis pushover nonlinier [15], [16], [20]; lembar analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) berdasarkan Severity, Occurrence, dan Detection; serta *Fishbone Diagram* sebagai alat kualitatif dalam menelusuri akar penyebab kerusakan berdasarkan bangunan lantai 4 [3], [21], [22].

2.4 Prosedur Penelitian

Tahap pertama dengan pengukuran langsung dimensi struktur, pemeriksaan visual elemen struktural dan non-struktural, serta pengujian mutu material dengan metode NDT, untuk memastikan kesesuaian antara kondisi lapangan dan dokumen perencanaan. Pendekatan bertingkat (Tier 1, Tier 2, dan Tier 3) sesuai ASCE 41-17.

- a. Tier 1: Penerapan checklist untuk identifikasi awal defisiensi struktur.
- b. Tier 2: Analisis kuantitatif dilakukan apabila ditemukan ketidaksesuaian pada Tier 1, mencakup evaluasi respons struktural terhadap beban gempa rencana.

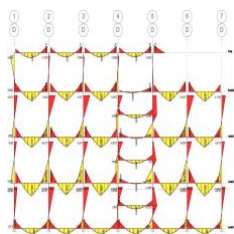
- c. Tier 3: Dilakukan jika hasil Tier 2 menunjukkan defisiensi signifikan, menggunakan analisis *nonlinier pushover* di ETABS dengan peningkatan gaya lateral hingga mencapai simpangan maksimum representatif dari perilaku nonlinier struktur.

Tahap FMEA- *Fishbone Diagram*, pada Tier 2 dan Tier 3 untuk mengidentifikasi *failure mode* untuk potensi menurunkan kinerja struktur [4], [23]. Nilai RPN dihitung untuk menentukan elemen paling kritis, sedangkan *Fishbone Diagram* digunakan untuk menelusuri akar penyebab kerusakan lantai pada gedung [14]. Analisis numerik dan evaluasi risiko, ditentukan tingkat kinerja struktur dan dirumuskan rekomendasi perkuatan struktural atau inspeksi lanjutan pada elemen dengan risiko tertinggi [13].

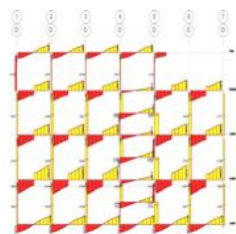
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Gaya dalam Struktur

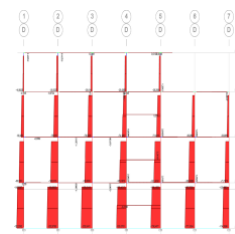
Analisis gaya dalam struktur mencakup gaya momen, gaya geser, dan gaya aksial (normal) yang bekerja pada elemen-elemen portal, dengan fokus pada nilai maksimum yang terjadi akibat kombinasi beban yang diterapkan (Gambar 1, 2, 3, 4, 5, dan 6) [10], [24].



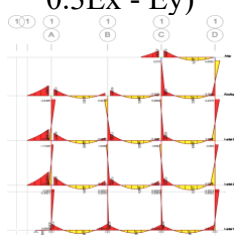
Gambar 1. Bidang Momen Portal D-D (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)



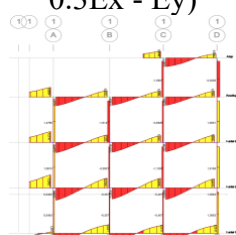
Gambar 2. Bidang Geser Portal D-D (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)



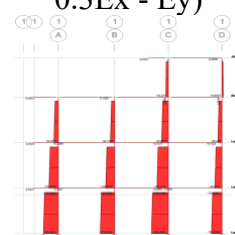
Gambar 3. Bidang Normal Portal D-D (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)



Gambar 4. Bidang Momen Portal 1-1 (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)



Gambar 5. Bidang Geser Portal 1-1 (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)



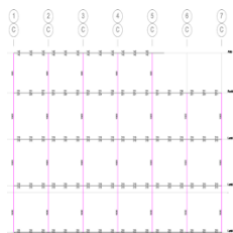
Gambar 6. Bidang Normal Portal 1-1 (1.2D + L - 0.3Ex - Ey)

Sumber: olah data peneliti, 2025

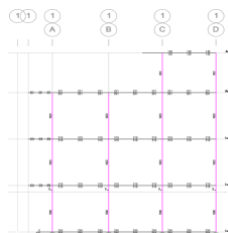
3.2 Analisa Tulangan pada Struktur

Penulangan pada elemen struktur diperoleh melalui pemodelan menggunakan program ETABS. Kebutuhan tulangan lentur, tulangan geser, serta rasio tulangan pada setiap elemen, yang disajikan dalam bentuk visual. Portal yang dianalisis merupakan portal

dengan kebutuhan tulangan terbesar, yaitu pada Portal C-C arah Y yang dianalisa menggunakan hasil ETABS (Gambar 7, dan 8) [1], [25], [26].



Gambar 7. Hasil Analisis Tulangan Portal C-C



Gambar 8. Hasil Analisis Tulangan Portal 1-1

Sumber: olah data peneliti, 2025

3.3 Pushover berbasis SNI 1726:2019 dan ASCE

Rasio *drift* 1,000–1,165 (<1,2); drift maksimum 0,472 mm dan 0,405 mm. Kekakuan X 405.345–156.859 kN/m, Y 234.111–110.811 kN/m (>70%). Massa seragam 50.000 kg (<150%). Tinggi 14 m. Kekuatan X 4.904–5.534 kN, Y 9.825–10.461 kN (>80%). Struktur teratur tanpa soft/ weak story (Tabel 1) [18], [27], [28], [29].

Tabel 1. Kriteria Evaluasi pada Parameter tiap Lantai

Kategori	Parameter	Lantai	Arah	Nilai	Kriteria Evaluasi	Status
Horizontal (Torsi)	<i>Max Drift</i> (mm)	Atap	X	0,472	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK
	<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,405		
	Rasio <i>Drift</i>		X	1,165		
	<i>Max Drift</i> (mm)	Rooftop	X	0,114	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK
	<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,093		
	Rasio <i>Drift</i>		X	1,155		
	<i>Max Drift</i> (mm)	Lantai 3	X	0,087	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK
	<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,077		
	Rasio <i>Drift</i>		X	1,134		
	<i>Max Drift</i> (mm)	Lantai 2	X	0,085	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK
	<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,088		
	Rasio <i>Drift</i>		X	1,040		
	<i>Max Drift</i> (mm)	Dak Lt.1	X	0,293	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK
	<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,199		
	Rasio <i>Drift</i>		X	1,010		
<i>Max Drift</i> (mm)	Lantai 1	X	0,042	Rasio < 1,2 dan < 1,4	OK	
<i>Avg Drift</i> (mm)		X	0,027			
Rasio <i>Drift</i>		X	1,000			< 1,2
Vertikal – Kekakuan (<i>Soft Story</i>)	Kekakuan (kN/m)	4	X	405.345	Tidak < 70% lantai atas	OK
		3	X	507.541		OK
		2	X	693.211		OK
		1	X	156.859		OK
		4	Y	234.111		OK
		3	Y	331.233		OK
		2	Y	471.432		OK
1	Y	110.811	OK			
Vertikal – Massa	Massa (kg)	4	-	50	Tidak > 150% lantai bawah	OK
		3	-	50		OK
		2	-	50		OK
		1	-	50		OK
Vertikal – Geometri	Tinggi Lantai (mm)	4	-	14	Konsisten antar lantai	OK
		3	-	14		OK
		2	-	14		OK
		1	-	14		OK
Vertikal – Kekuatan	Kekuatan (kN)	4	X	4.904	Tidak < 80% lantai atas	OK
		3	X	5.21		OK

(Weak Story)	2	X	5.439	Tidak < 80% lantai atas	OK
	1	X	5.534		OK
	4	Y	9.825		OK
	3	Y	10.156		OK
	2	Y	10.376		OK
	1	Y	10.461		OK

Sumber: olah data peneliti, 2025

3.4 Mekanisme Sendi Plastis

OF arah X, Step 2 tercapai 4,174 mm dan 2.237,56 kN, meningkat pada Step 3 menjadi 12,153 mm dan 5.983,03 kN ($\geq 355,8$ kN). Pada OF arah Y, perpindahan 131,483–206,337 mm dengan gaya 7.240,14–10.199,32 kN. IF arah X mencapai 35,058–35,063 mm dengan gaya 25.258,63–25.266,27 kN, menunjukkan kapasitas jauh lebih besar (Tabel 2).

Tabel 2. Mekanisme Sendi Plastis Struktur IF arah Y

Step	Monitored Displ mm	Base Force kN	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0	0	576	0	0	0	0	576	0	0	0	576
1	64,878	140,904,678	575	1	0	0	0	576	0	0	0	576
2	139,835	300,458,136	527	49	0	0	0	576	0	0	0	576
3	216,317	457,379,602	491	85	0	0	0	547	29	0	0	576
4	261,903	549,537,403	468	107	1	0	0	520	56	0	0	576
5	261,91	549,354,346	468	107	0	1	0	519	56	1	0	576
6	266,301	558,180,091	468	106	1	1	0	518	56	2	0	576
7	266,309	557,904,798	468	106	0	2	0	518	56	2	0	576
8	267,74	560,807,351	468	105	1	2	0	518	56	2	0	576
9	267,747	560,635,699	468	105	0	3	0	518	55	3	0	576
10	276,453	578,175,671	467	105	1	3	0	517	56	3	0	576
11	267,961	559,847,949	467	105	1	2	1	517	55	4	0	576

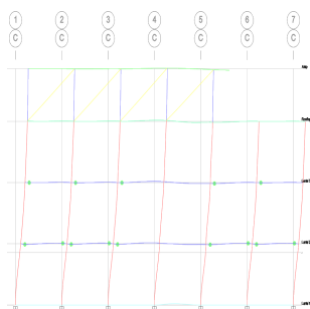
Sumber: olah data peneliti, 2025

Step 2 terjadi perpindahan sebesar 139,835 mm dengan gaya lateral 30045,8136 kN. Pada tahap ini, sebagian besar komponen struktur berada pada kinerja B (*yield point*), yang dikategorikan sebagai *Immediate Occupancy* (IO) karena deformasi masih dalam batas aman dan kerusakan yang terjadi bersifat minimal.

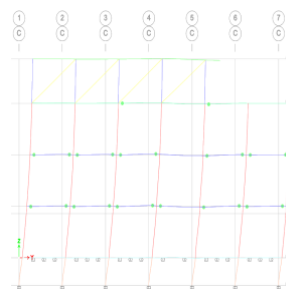
Pada Step 3 yang merupakan titik batas, tercatat perpindahan sebesar 216,317 mm dengan gaya lateral 45737,9602 kN, Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian komponen struktur berada pada rentang kinerja A–B (*initial point* hingga *yield point*), sementara sebagian lainnya telah mencapai kinerja B (*yield point*), Life Safety (LS), dan bahkan C–D (*Collapse Prevention*, CP). Apabila dibandingkan dengan ketentuan batas drift pada SNI 1726 (umumnya $0,02-0,025 \times$ tinggi lantai, tergantung kategori bangunan), nilai perpindahan pada Step 3 menunjukkan bahwa struktur telah melampaui tahap IO dan memasuki tahap LS hingga mendekati CP.

Hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa nilai gaya geser dasar hasil *pushover* ($V_{pushover}$) = 45737,9602 kN, lebih besar daripada nilai gaya geser dasar metode statik ekuivalen

($V_{staticequivalent}$), sehingga kapasitas geser dasar struktur secara umum memenuhi bahkan melampaui tuntutan beban gempa rencana (Gambar 9 dan 10).



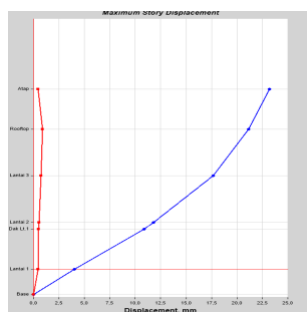
Gambar 9. Mekanisme Sendi Plastis Pushover Step 2 (Titik Kinerja) Arah Y Grid C



Gambar 10. Mekanisme Sendi Plastis Pushover Step 16 (Titik batas) Arah Y Grid C

Sumber: olah data peneliti, 2025

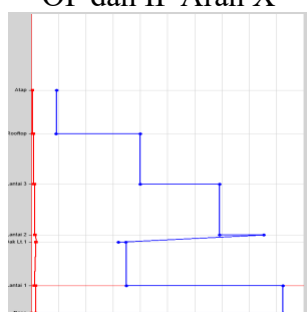
Dinding pengisi secara signifikan meningkatkan kekakuan dan kinerja struktur terhadap beban gempa, terutama pada lantai bawah hingga menengah. Model open frame tanpa dinding pengisi mengalami simpangan dan drift ratio yang jauh lebih besar, sehingga lebih fleksibel dan lebih rentan terhadap deformasi lateral (Gambar 11, 12, 13, 14; Tabel 3).



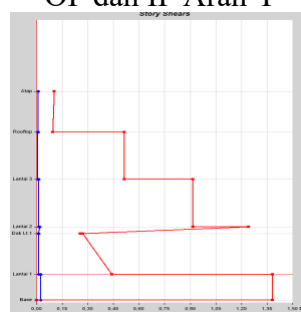
Gambar 11. Kurva Perpindahan Struktur OF dan IF Arah X



Gambar 12. Kurva Perpindahan Struktur OF dan IF Arah Y



Gambar 13. Drift Ratio OF dan IF Arah X
Sumber: olah data peneliti, 2025



Gambar 14. Drift Ratio OF dan IF Arah Y

Tabel 3. Kurva Perpindahan Struktur dan Drift Ratio

Tingkat	Kurva Perpindahan Struktur OF dan IF Arah X ; Y (mm)		Drift Ratio Struktur OF dan IF Arah X ; Y (mm)	
	Simpangan Open Frame	Simpangan Infilled Frame	Simpangan Open Frame	Simpangan Infilled Frame
Lantai 1	3; 2,5	1,2 ; 0,4	0,45 ; 0,45	0,01 ; 0,01
Dak Lantai 1	11 ; 6	1,2 ; 1,1	0,29 ; 0,29	0,01 ; 0,01
Lantai 2	11,5 ; 6,5	1,3 ; 0,5	0,91 ; 0,91	0,01 ; 0,01
Lantai 3	18 ; 8,5	1,4 ; 0,5	0,50 ; 0,50	0,01 ; 0,01

Rooftop	21,5 ; 9,8	1,5 ; 0,5	0,11 ; 0,11	0,5 ; 0,5
Atap	23 ; 10,8	1,5 ; 0,6	0,13 ; 0,13	0,6 ; 0,6

Sumber: olah data peneliti, 2025

3.5 FMEA – Fishbone Diagram

Perpindahan 206,337 mm dengan 10.199,32 kN dan drift 0,91 mm (IF 0,01 mm) menunjukkan fleksibilitas ekstrem, meningkatkan risiko kerusakan non-struktural signifikan dan instabilitas lateral progresif. Perpindahan 216,317 mm; 45.737,96 kN; 29 elemen IO–LS dan 1 LS–CP menandakan kapasitas tinggi namun mulai memasuki batas daktilitas kritis saat gempa ekstrem [4], [13]. Portal dengan kebutuhan tulangan maksimum berisiko kegagalan lentur/geser lokal bila detailing kurang optimal, meskipun probabilitas rendah dan masih terkontrol desain (Tabel 4) [6], [14], [17], [30].

Tabel 4. Kategori Risiko

No	Failure Mode	Pemicu	Dampak	S	O	D	RPN	Kategori Risiko
1	Drift berlebih Open Frame (OF) arah Y	Step 3: 206,337 mm; 10.199,32 kN; Drift lantai 2–3: 0,91 mm (IF: 0,01 mm)	Kerusakan non-struktural, penurunan serviceability, potensi deformasi berlebih	8	6	4	192	Tinggi
2	Transisi kinerja ke LS–CP (IF arah Y)	Step 3: 216,317 mm; 45.737,96 kN; 29 elemen IO–LS; 1 elemen LS–CP	Risiko kerusakan struktural saat gempa ekstrem	9	4	5	180	Tinggi
3	Potensi soft story lantai 1	Kekakuan X: 156.859 kN/m (atas: 693.211 kN/m); Y: 110.811 kN/m	Konsentrasi drift bawah saat gempa besar	7	3	3	63	Sedang
4	Overstress portal kritis (C-C arah Y)	Portal dengan kebutuhan tulangan terbesar	Risiko under-reinforcement & kegagalan lentur/geser lokal	8	3	2	48	Rendah

Sumber: olah data peneliti, 2025

Akar risiko kinerja seismik bukan berasal dari ketidakberaturan global (massa 50.000 kg seragam, tinggi 14 m konsisten, rasio drift 1,000–1,165 < 1,2), melainkan dari kombinasi faktor material, metode analisis, dan konfigurasi sistem struktur. Faktor dominan adalah fleksibilitas Open Frame (drift 0,91 mm; perpindahan 206,337 mm pada 10.199,32 kN) serta transisi kinerja IF menuju LS–CP (216,317 mm; 45.737,96 kN). Kekakuan lantai 1 yang lebih rendah (156.859 kN/m; 110.811 kN/m) juga berpotensi memusatkan deformasi bawah.

Risiko utama bersifat lokal dan mekanistik (drift dan sendi plastis), bukan akibat irregularitas struktur secara keseluruhan [3], [23]. Strateginya adalah meningkatkan mutu beton dan baja dan detailing confinement pada Portal C-C untuk mencegah overstress lentur/geser, mengoptimalkan distribusi infill agar tidak terkonsentrasi, memperkuat kekakuan lantai 1 (156.859 kN/m; 110.811 kN/m), mengendalikan drift OF (0,91 mm < 0,02h), serta memastikan kapasitas geser melampaui 45.737,96 kN secara terkontrol dan daktil (Tabel 5).

Tabel 5. Akar Masalah dan Dampak

Penyebab	Faktor	Pendukung	Dampak
Material	Mutu beton & baja tulangan	Portal C-C kebutuhan tulangan terbesar	Potensi overstress lentur/geser
	Dinding AAC ($E = 2-3 \text{ GPa}$; $f_c' = 3-4 \text{ MPa}$; $600-700 \text{ kg/m}^3$)	Interaksi rangka-infill	Konsentrasi sendi plastis pada infill
Metode Analisis	Pushover nonlinier (SNI 1726 & ASCE 41)	Step 3 IF Y: 216,317 mm; 45.737,96 kN	Transisi IO \rightarrow LS-CP
	Drift limit 0,02h	Drift OF = 0,91 mm	Risiko deformasi berlebih
Desain Struktur	Open Frame (OF) lebih fleksibel	OF Y: 206,337 mm; 10.199,32 kN	Drift tinggi & kerusakan non-struktural
	Infilled Frame (IF) lebih kaku	IF X: 25.266,27 kN	Kapasitas geser meningkat signifikan
Kekakuan & Kekuatan	Kekakuan Lt 1 lebih rendah	X: 156.859 kN/m; Y: 110.811 kN/m	Potensi konsentrasi drift bawah
	Kekuatan memenuhi >80%	X: 4.904-5.534 kN; Y: 9.825-10.461 kN	Tidak terjadi weak story
Pembebanan Gempa	Kombinasi 1.2D+L-0.3Ex-Ey	Base shear IF Y: 45.737,96 kN	Tuntutan gaya lateral tinggi
Geometri dan Massa	Massa seragam 50.000 kg	<150% antar lantai	Tidak ada irregularitas massa
	Tinggi lantai 14 m konsisten	Rasio drift 1,000-1,165 (<1,2)	Struktur reguler

Sumber: olah data peneliti, 2025

4. Kesimpulan

Hasil pemeriksaan awal (Tier 1) menunjukkan bahwa bangunan telah memenuhi kriteria *benchmark building* sesuai ASCE/SEI 41-17 tanpa ditemukannya ketidaksesuaian signifikan pada aspek geometri, distribusi massa, maupun elemen non-struktural. Pada tahap analisis struktural (Tier 2), model *open frame* menunjukkan deformasi lateral dan *drift ratio* yang lebih tinggi sehingga berpotensi menimbulkan risiko kerusakan, sedangkan model *infilled frame* memperlihatkan peningkatan kekakuan lateral dan perilaku seismik yang lebih stabil pada seluruh tingkat bangunan. Risiko utama berasal dari drift OF 206,337 mm (RPN 192) dan transisi LS-CP IF 216,317 mm (RPN 180); faktor dominan fleksibilitas struktur, kekakuan lantai 1 rendah, serta tuntutan geser 45.737,96 kN. Implikasinya menekankan penguatan kekakuan lantai bawah, kontrol drift, dan detailing daktilitas infill. Riset lanjut perlu optimasi distribusi infill, analisis *time-history nonlinear*, serta evaluasi eksperimental performa pascagempa ekstrem.

Daftar Pustaka

- [1] K. P. U. dan P. Rakyat, "Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2018 tentang Sertifikat Laik Fungsi Gedung," Jakarta, 2018.
- [2] I. Hidayat, A. F. S. Rahardhani, and G. A. Suhardjo, "Utilizing hammer tests and ultrasonic pulse velocity to ascertain the compressive strength of concrete," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1324, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1324/1/012006.
- [3] Meylinda Sabrinawati and I Nyoman Dita Pahang Putra, "Analysis of the Risk of Work Accidents in High-Story Building Construction Projects using the FMEA

- (Failure Modes and Effects Analysis) Method,” *Formosa J. Multidiscip. Res.*, vol. 3, no. 5, pp. 1391–1406, 2024, doi: 10.55927/fjmr.v3i5.9520.
- [4] A. Reza, I. Vanany, and Machsus, “Risk assessment for apartment building maintenance using Fuzzy-FMEA methods,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1072, no. 1, p. 012001, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1072/1/012001.
- [5] M. Dlimi, R. Agounoun, I. Kadiri, R. Saadani, and M. Rahmoune, “Thermal performance assessment of double hollow brick walls filled with hemp concrete insulation material through computational fluid dynamics analysis and dynamic thermal simulations,” *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 3, no. November 2022, p. 100124, 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100124.
- [6] S. F. Lahmadi, B. Ridhosari, I. W. K. Suryawan, and A. Sarwono, “Risk Assessment in 13-Story Building Projects With the Failure Mode and Effect Analysis (Fmea) Method and the Domino Effect,” *J. Kesehat. Masy. Dan Lingkungan. Hidup*, vol. 6, no. 2, pp. 83–95, 2021, doi: 10.51544/jkmlh.v6i2.2206.
- [7] N. Kokkaew and A. Rakprasong, “Modelling an Extension Decision of BOT Transportation Infrastructure: A Risk-Adjusted Approach,” in *ICCREM 2020: Intelligent Construction and Sustainable Buildings - Proceedings of the International Conference on Construction and Real Estate Management 2020*, W. Y., O. T., and S. G.Q.P., Eds., Center of Excellence in Infrastructure Management, Dept. of Civil Engineering, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2020, pp. 435–444. doi: 10.1061/9780784483237.052.
- [8] J. Liu, P. E. D. Love, P. R. Davis, J. Smith, and M. Regan, “Conceptual framework for the performance measurement of public-private partnerships,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 21, no. 1, 2015, doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000210.
- [9] I. K. Smout and S. D. Gorantiwar, “Productivity and equity of different irrigation schedules under limited water supply,” *J. Irrig. Drain. Eng. - ASCE*, vol. 132, no. 4, pp. 349–358, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:4(349).
- [10] A. S. of C. Engineers, *ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [11] L. J. Goodwin Robbins, K. M. Rodgers, B. Walsh, R. Ain, and R. E. Dodson, “Pruning chemicals from the green building landscape,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 30, no. 2, pp. 236–246, 2020, doi: 10.1038/s41370-019-0174-x.
- [12] N. Rasheed, W. Shahzad, M. Khalfan, and J. O. B. Rotimi, “Risk Identification, Assessment, and Allocation in PPP Projects: A Systematic Review,” *Buildings*, vol. 12, no. 8, 2022, doi: 10.3390/buildings12081109.
- [13] M. I. Martadinata *et al.*, “RISK-BASED MAINTENANCE WITH FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) METHOD TO IMPROVE THE RELIABILITY OF AIR CONDITIONING SYSTEMS IN COMMERCIAL BUILDINGS,” *J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, vol. 8, pp. 1750–1758, 2025.
- [14] D. Lee, H. Lim, D. Lee, H. Cho, and K. I. Kang, “Assessment of Delay Factors for Structural Frameworks in Free-form Tall Buildings Using the FMEA,” *Int. J. Concr.*

- Struct. Mater.*, vol. 13, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s40069-018-0309-9.
- [15] B. F. Supervised, “Designing A 4- Story Commercial Building usiang ETABS,” no. May, 2009.
- [16] K. Naga Sai Gopal and N. Lingeshwaran, “Analysis and design of G+5 residential building by using E-Tabs,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 2098–2103, 2017.
- [17] N. S. G. MURUGESAN, “Risk Assessment in Construction Using FMEA to Improve Quality: A Multi-Level Analysis,” *Iarjset*, vol. 12, no. 8, pp. 356–368, 2025, doi: 10.17148/iarjset.2025.12847.
- [18] B. S. Nasional, “SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain,” Jakarta, 2020.
- [19] T. Tumingan, S. Alwi, and F. I. H, “Kapasitas Nilai Kuat Tekan Beton Dengan Hammer Test Dan Ultrasonic Pulse Velocity (Upv) Jembatan Loa Haur,” *Sebatik*, vol. 26, no. 2, pp. 582–592, 2022, doi: 10.46984/sebatik.v26i2.2026.
- [20] S. Husein and M. Darwis, “Implementasi Software ETABS(Extended Three Dimensional Analysis of Building System) Untuk Struktur Gedung Kos 3 Lantai Kab.Gowa,” *J. Bangunan Konstr.*, vol. 2, no. 2, pp. 104–109, 2024, doi: 10.63877/jbk.v2i2.98.
- [21] R. M. Wagner, H. Taroepratjeka, and F. H. Mustofa, “Usulan Peningkatan Kualitas Produk E-House Menggunakan Metode Failure Mode and Error Analysis (FMEA) di PT X,” *Reka Integr.*, vol. 3, no. 2, pp. 24–36, 2015.
- [22] A. Zuniawan, “A Systematic Literature Review of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation in Industries,” *IJIEM - Indones. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 1, no. 2, p. 59, 2020, doi: 10.22441/ijiem.v1i2.9862.
- [23] A. F. Bin Basri, A. F. A. Ghani, M. S. F. Hussin, A. R. Bin Saleman, and A. Faishal, “Pareto Analysis and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Central Melaka Power Distribution Plant Maintenance Strategies,” *J. Power Energy Eng.*, vol. 13, no. 10, pp. 87–110, 2025, doi: 10.4236/jpee.2025.1310007.
- [24] A. International, *ASTM C805/C805M-18: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- [25] C. V. N. P. Desain, “Perencanaan Arsitektur dan Struktur Toko Lantai 4,” Badung, Bali, 2022.
- [26] F. E. M. Agency, “FEMA 310: Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings—A Prestandard,” Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1998.
- [27] B. S. Nasional, “SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung,” Jakarta, 2019.
- [28] B. S. Nasional, “SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan,” Jakarta, 2019.

- [29] B. S. Nasional, “SNI 6889:2022 Tata Cara Penilaian Kelaikan Fungsi Bangunan Gedung,” Jakarta, 2022.
- [30] A. Nielsen, “Failure modes and effects analysis (FMEA) used on moisture problems,” *Indoor Air*, p. p.38-43, 2002, [Online]. Available: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7293.pdf>