



Perbandingan Perilaku Struktur Gedung Kantor Pelindo Teluk Bayur Akibat Beban Gempa dan Beban Gempa-Tsunami Berdasarkan Analisis Simpangan Antar Lantai dan Efek P-Delta

(Comparative Analysis of the Structural Behavior of the Pelindo Teluk Bayur Office Building due to Earthquake Loads and Earthquake-Tsunami Loads Based on Story Drift and P-Delta Effects)

Muhammad Sodri Renjani¹, Rehni Setiati², Sucitra Wijaya³, Doli Jumat Rianto⁴, Irfan Satria Permana⁵, Randy M Oswara⁶

^{1,2,3} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muara Bungo, Indonesia

^{4,5,6} Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Muara Bungo, Indonesia

¹ mohdsodri007@gmail.com, ² setiatirehni@gmail.com, ³ sucitra.wijaya19@gmail.com, ⁴ dolijumatrianto08@gmail.com,

⁵ irfansatriapermana011@gmail.com, ⁶ randymo.lagdata@gmail.com

Penulis Korespondensi: Muhammad Sodri Renjani | Email: mohdsodri007@gmail.com

Diterima (Received): 21/01/2026 Direvisi (Revised): 04/08/2026 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 05/08/2026

ABSTRAK

Indonesia memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi dengan potensi gempa dan tsunami besar. Namun, peraturan nasional belum mengatur secara rinci prosedur beban tsunami, sehingga bangunan di daerah pesisir umumnya hanya dirancang untuk beban gempa tanpa memperhitungkan dampak beban tsunami dalam perencanaan struktur bangunan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja struktur bangunan beton bertulang yang dikenai beban gempa dan tsunami berdasarkan analisis simpangan antar lantai dan efek P-Delta. Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan perangkat lunak ETABS v18. Analisis beban gempa mengacu pada SNI 1726:2019. Sementara beban tsunami dihitung berdasarkan FEMA P-646. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur yang hanya menerima beban gempa masih memenuhi persyaratan deviasi dan stabilitas menurut SNI 1726:2019. Namun, penambahan beban tsunami menyebabkan peningkatan signifikan pada respons struktur, seperti yang ditunjukkan oleh peningkatan perpindahan maksimum dari 38,885 mm menjadi 660,891 mm. Nilai koefisien stabilitas (θ) juga meningkat dari 0,05229 menjadi 0,82164, melebihi batas yang diizinkan sehingga struktur tidak lagi memenuhi persyaratan stabilitas. Temuan ini menunjukkan bahwa beban tsunami memiliki pengaruh signifikan terhadap perilaku struktur. Oleh karena itu, evaluasi dan perencanaan bangunan di daerah pesisir perlu mempertimbangkan kombinasi beban gempa dan tsunami untuk meningkatkan tingkat keamanan dan keandalan struktur.

Kata Kunci: Efek P-Delta, Gempa Bumi, Perilaku Struktur, Simpangan Antar Lantai, Tsunami

ABSTRACT

Indonesian has a high level of seismic activity with the potential for large earthquakes and tsunamis. However, national regulations have not yet regulated the details of tsunami load procedures, so coastal buildings are generally only designed for earthquake loads without taking into account the effects of tsunami loads in building structural planning. This study aims to compare the performance of reinforced concrete building structures subjected to earthquake and tsunami loads based on the analysis of story drift and P-Delta effects. This research uses a numerical method with ETABS v18 software. The earthquake load analysis refers to SNI 1726:2019, while the tsunami load is calculated based on FEMA P-646. The results of the study show that structures that only receive earthquake loads still meet the deviation and stability requirements according to SNI 1726:2019. However, the addition of the tsunami load caused a significant increase in the structural response, as indicated by an increase in the maximum drift from 38,885 mm to 660,891 mm. The stability coefficient value (θ) also increased from 0,05229 to 0,82164, exceeding the permissible limit so that the structure no longer meets the stability requirements. These findings indicate that tsunami loads have a significant influence on structural behavior. Therefore, evaluation and planning of buildings in coastal areas need to consider the combination of earthquake and tsunami loads to increase the level of safety and reliability of the structure.

Keywords: Earthquake, P-Delta Effects, Story Drift, Structural Behavior, Tsunami

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana alam karena lokasinya di titik pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi tektonik ini menyebabkan Indonesia mengalami aktivitas seismik yang intens, yang mengakibatkan seringnya terjadi gempa bumi tektonik. Menurut (Nugraheni, 2025) gempa bumi adalah getaran di permukaan bumi yang disebabkan oleh pelepasan energi dari batuan setelah regangan yang terakumulasi melampaui batas elastisitasnya. Selain itu, juga berpotensi memicu tsunami, terutama di daerah pesisir yang langsung berbatasan dengan zona subduksi. Tsunami besar, seperti tsunami Aceh 2004, tsunami Pengandaran 2026, dan tsunami Mentawai 2010, yang dipicu oleh gempa bumi di zona subduksi, dan tsunami Palu 2018, yang dipengaruhi oleh aktivitas seismik dan longsor bawah laut, menunjukkan bahwa tsunami tidak hanya menyebabkan hilangnya nyawa tetapi juga menyebabkan kerusakan infrastruktur yang luas (Krautwald et al., 2021)(Del Zoppo et al., 2025). Oleh karena itu, perencanaan bangunan di daerah pesisir rawan tsunami perlu mempertimbangkan efek gabungan beban gempa dan tsunami untuk meningkatkan keamanan dan keandalan struktur. Menurut (T Ramadhani, Yuslinda, 2026) perencanaan struktur gedung harus mengacu pada standar nasional yang berlaku agar bangunan memiliki tingkat keamanan yang memadai dalam menghadapi beban gempa. Sejalan dengan pendapat tersebut (Ambia & Rani, 2026) menyatakan bahwa perencanaan struktur gedung di Indonesia perlu berpedoman pada peraturan yang berlaku sehingga struktur mampu menahan beban vertikal maupun lateral melalui penerapan sistem rangka pemikul momen.

Di Indonesia, Desain struktur bangunan untuk ketahanan gempa diatur dalam (SNI 1726:2019, 2019) tentang Prosedur Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan dan Non-Bangunan. Sementara itu, beban gravitasi mengacu pada (SNI 1727:2020, 2020), dan desain struktur beton bertulang mengikuti ketentuan (2847:2019, 2019). Namun hingga saat ini, belum ada standar nasional yang secara khusus mengatur prosedur pembebanan tsunami untuk bangunan. Berbagai studi umumnya menggunakan FEMA P-646: Pedoman Desain untuk Struktur Evakuasi Vertikal dari Tsunami sebagai referensi dalam menentukan beban tsunami. Pedoman ini mencakup perhitungan gaya hidrodinamik, gaya hidrostatik, gaya impuls, gaya apung (angkat), gaya tumbukan debris, tahanan debris, gaya *uplift*, dan beban genangan air, (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2019). Sejumlah penelitian sebelumnya telah meneliti respons bangunan terhadap beban gempa dan tsunami secara terpisah. Menurut (Fauzan, Kurniawan, et al., 2023) dinyatakan bahwa gaya tsunami dapat menghasilkan tekanan lateral yang jauh lebih besar

daripada beban gempa, sehingga berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan gaya di dalam suatu struktur. Menurut (Del Zoppo et al., 2022) dijelaskan bahwa bangunan beton bertulang yang dirancang hanya berdasarkan beban gempa belum tentu memiliki kapasitas yang memadai ketika menerima beban tsunami karena karakteristik mekanisme pembebanannya berbeda. Lebih lanjut, (Kumar et al., 2025) menunjukkan bahwa kombinasi beban gempa dan tsunami dapat secara signifikan meningkatkan deformasi struktural, terutama pada bangunan bertingkat di daerah pesisir. Menurut (Harati & van de Lindt, 2024) juga dinyatakan bahwa tingkat kerusakan struktural akibat tsunami dipengaruhi oleh ketinggian genangan, kecepatan aliran, sifat material penyusun dan konfigurasi bangunan.

Di sisi lain, penelitian tentang analisis struktur menggunakan perangkat lunak umumnya lebih berfokus pada evaluasi pergeseran lantai, rasio stabilitas dan pengaruh efek orde kedua (*P-Delta*) akibat beban gempa sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, (Baiguera et al., 2022); (Lorito et al., 2021). Nilai simpangan antar lantai merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kinerja struktur terhadap beban lateral karena menggambarkan besarnya deformasi bangunan selama proses pembebanan. Selain itu, efek *P-Delta* merupakan aspek penting yang harus dipertimbangkan pada bangunan bertingkat, mengingat gaya aksial yang bekerja pada struktur yang telah mengalami perpindahan lateral akan menghasilkan momen tambahan yang berpotensi meningkatkan deformasi, sehingga hasil analisis menjadi kurang akurat dalam menggambarkan kekakuan dan stabilitas struktur.

Sebagian besar penelitian sebelumnya masih membahas respons struktur terhadap beban gempa dan beban tsunami secara terpisah. Penelitian yang secara langsung membandingkan respons struktur akibat beban gempa dengan kombinasi beban gempa dan tsunami menggunakan parameter simpangan antar lantai dan efek *P-Delta* masih relatif terbatas, terutama pada bangunan beton bertulang yang dianalisis berdasarkan kombinasi ketentuan SNI 1726:2019 dan FEMA P-646. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa analisis karakteristik struktur bangunan gedung dengan dua skenario pembebanan, yaitu (1) struktur yang menerima beban gempa sesuai SNI 1726:2019 dan (2) struktur yang menerima kombinasi beban gempa dan beban tsunami berdasarkan FEMA P-646. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter simpangan antar lantai dan efek *P-Delta*, sehingga dapat diperoleh gambaran perubahan karakteristik struktur akibat penambahan beban tsunami. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang pengaruh beban tsunami terhadap stabilitas bangunan bertingkat di daerah pesisir.

Permasalahan yang diteliti dalam penelitian ini adalah bagaimana penambahan beban tsunami memengaruhi karakteristik struktur bangunan yang awalnya dirancang hanya berdasarkan beban gempa, dilihat dari nilai simpangan antar lantai dan efek *P-Delta*. Berdasarkan permasalahan tersebut, hipotesis penelitian menyatakan bahwa penambahan beban tsunami akan meningkatkan nilai simpangan antar lantai dan meningkatkan pengaruh efek *P-Delta* dibandingkan dengan struktur yang hanya menerima beban gempa, sehingga berpotensi mempengaruhi tingkat stabilitas struktur. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik struktur bangunan akibat beban gempa dan kombinasi beban gempa dan tsunami melalui analisis simpangan antar lantai (*story drift*) dan efek *P-Delta*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh beban tsunami tambahan terhadap karakteristik struktur dan berfungsi sebagai referensi dalam pengembangan rencana bangunan di daerah rawan tsunami, mengingat hingga saat ini peraturan nasional belum mengatur secara detail prosedur pembebanan tsunami pada struktur bangunan gedung.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Lokasi penelitian ini berada di Gedung Kantor Pelindo Teluk Bayur yang terletak di Teluk Bayur, Kota Padang, Sumatera Barat, yang merupakan salah satu daerah pesisir Indonesia dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap gempa bumi dan tsunami akibat aktivitas zona subduksi Mentawai. Data penelitian berupa data sekunder yang meliputi gambar struktur, dimensi elemen, kualitas material, serta parameter pembebanan yang diperoleh dari dokumen perencanaan bangunan.



Gambar 1 Gedung kantor pelindo teluk bayur di kota padang

2.2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik dengan perangkat lunak ETABS v18 untuk mengevaluasi perilaku struktur gedung akibat kombinasi beban gempa dan beban tsunami. Objek penelitian berupa gedung beton bertulang 4 lantai. Sistem struktur yang digunakan adalah Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sesuai dengan ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019. Struktur dimodelkan dengan mendefinisikan elemen-elemen utama yang terdiri atas kolom, balok, pelat lantai, dan fondasi berdasarkan data rencana bangunan. Elemen struktur menggunakan material beton bertulang dengan mutu beton $f'c = 24,9$ MPa, sedangkan baja tulangan utama menggunakan BJTD 40 dan tulangan geser menggunakan BJTP 24. Dimensi elemen struktur mengikuti gambar rencana bangunan yang digunakan sebagai objek penelitian. Kondisi batas (*boundary condition*) pada fondasi struktur dimodelkan sebagai tumpuan jepit (*fixed support*), sehingga seluruh perpindahan translasi dan rotasi pada titik tumpuan dianggap tertahan sepenuhnya.



Gambar 2 Model 3D gedung kantor pelindo teluk bayur

Tabel 1 Detail bangunan Gedung kantor Pelindo teluk bayur

	Beam		Column		
	Code	Dimension (mm)	Code	Dimension (mm)	Main Bars (mm)
Tie Beam	TB2	300x600			
Story 1	B1	400X600	K1	450X450	16D22
	B3	250X500	K2	500X500	20D22
	B4	250X400			
	B5	300X550			
Story 2	B1	400X600	K1	450X450	16D22
	B3	250X500	K2	500X500	20D22
	B4	250X400			
	B5	300X550			
Story 3	B1	400X600	K1	450X450	16D22
	B3	250X500	K2	500X500	20D22
	B4	250X400			
	B5	300X550			
Story 4	B2	300X550	K1	450X450	16D22
	B3	250X500			
	B4	250X400			
	B5	300X550			

Beban gravitasi diterapkan dengan mengacu pada SNI 1727:2020, sedangkan desain elemen beton bertulang mengacu pada SNI 2847:2019. Analisis dampak gempa bumi dilakukan menggunakan metode spektrum respons Kota Padang sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Selain beban gempa bumi, beban tsunami juga dihitung berdasarkan pedoman FEMA P-646 yang meliputi gaya hidrodinamik, gaya hidrostatik, gaya impuls, gaya apung (angkat), gaya tumbukan debris, tahanan debris, gaya *uplift*, dan beban genangan air. Semua jenis beban kemudian dimasukkan ke dalam model struktur sebagai beban lateral dan vertikal sesuai dengan mekanisme pembebanan.

Penelitian ini menggunakan dua skenario analisis struktur. Skenario pertama memodelkan struktur yang hanya dibebani oleh kombinasi beban gravitasi dan beban gempa sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Sementara itu, skenario kedua memodelkan struktur dengan kombinasi beban gravitasi, beban gempa, dan beban tsunami mengacu pada FEMA P-646. Kedua model dirancang dengan dimensi, dan beban tsunami mengacu pada FEMA P-646. Kedua model dirancang dengan dimensi, kualitas material, kondisi penempatan dan konfigurasi struktural yang identik, sehingga setiap perbedaan respons yang muncul dapat dikaitkan dengan peningkatan beban tsunami dan interaksinya dengan karakteristik struktur, termasuk perubahan efek P-Delta yang dipengaruhi oleh peningkatan deformasi lateral.

Nilai simpangan antar lantai diperoleh dari hasil analisis menggunakan ETABS v18, kemudian dievaluasi dengan membandingkannya dengan batas deviasi yang diizinkan berdasarkan SNI 1726:2019. Selanjutnya, pengaruh efek *P-Delta* dipelajari melalui analisis orde kedua untuk menilai kontribusi gaya aksial terhadap peningkatan deformasi struktural. Hasil analisis dari kedua skenario tersebut kemudian dibandingkan secara deskriptif menggunakan tabel dan grafik untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik struktur yang terjadi akibat beban tsunami tambahan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Simpangan Antar Lantai (*Story Drift*)

Simpangan antar lantai (*story drift*) merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi perilaku karakteristik struktur terhadap beban lateral karena mencerminkan deformasi relatif yang terjadi antara dua lantai yang berurutan. Besarnya simpangan tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya gaya lateral yang bekerja, tetapi juga oleh distribusi kekakuan struktur, konfigurasi geometrik bangunan, serta mekanisme penyaluran gaya dari elemen struktur menuju fondasi. Oleh karena itu, evaluasi *story drift* menjadi indikator penting untuk menilai tingkat keamanan struktur sekaligus potensi kerusakan pada elemen nonstruktural.

Pada Model A, yang hanya mempertimbangkan kombinasi beban gravitasi dan gempa, seluruh nilai simpangan masih berada di bawah batas yang diizinkan menurut SNI 1726:2019. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem struktur masih memiliki kekakuan lateral yang memadai untuk mengendalikan deformasi akibat gaya inersia gempa. Distribusi simpangan meningkat secara bertahap dari lantai bawah menuju lantai atas, yang merupakan karakteristik umum bangunan bertingkat dengan respons yang didominasi oleh mode getar pertama. Pada kondisi ini, gaya gempa didistribusikan secara proporsional terhadap massa dan kekakuan struktur, sehingga deformasi terjadi secara relatif merata sepanjang tinggi bangunan.

Perilaku struktur berubah secara signifikan ketika beban tsunami dimasukkan ke dalam analisis pada Model B. Berbeda dengan beban gempa yang menghasilkan gaya inersia akibat percepatan massa bangunan, beban tsunami bekerja sebagai tekanan hidrodinamik dan hidrostatik yang langsung mengenai elemen struktur pada bagian bangunan yang terendam. Akibatnya, distribusi gaya lateral tidak lagi mengikuti distribusi massa bangunan, tetapi terkonsentrasi pada lantai-lantai bawah yang berinteraksi langsung dengan aliran tsunami. Konsentrasi gaya tersebut menyebabkan peningkatan tuntutan deformasi yang sangat besar pada lantai dasar sehingga distribusi simpangan menjadi tidak lagi linier terhadap tinggi bangunan.

Tabel 2 Analisis simpangan struktur beban gempa

Story	hsx (mm)	h (mm)	δx (mm)	Δ (mm)	Δx (mm)	Δijin (mm)	Ket
Story 4	15500	3500	34.502	126.507	13.482	70	OK
Story 3	12000	4000	30.852	113.025	30.103	80	OK
Story 2	8000	4000	22.615	82.922	44.037	80	OK
Story 1	4000	4500	10.605	38.885	38.885	90	OK

Tabel 3 Analisis simpangan struktur beban gempa+tsunami

Story	hsx (mm)	h (mm)	δx (mm)	Δ (mm)	Δx (mm)	Δijin (mm)	Ket
Story 4	15500	3500	173.093	634.674	-29.894	70	OK
Story 3	12000	4000	181.246	664.569	-54.560	80	OK
Story 2	8000	4000	196.126	719.129	58.238	80	OK
Story 1	4000	4500	180.243	660.891	660.891	90	NOT OK

Fenomena tersebut menunjukkan adanya perubahan mekanisme distribusi gaya lateral pada struktur. Pada pembebanan gempa, gaya lateral diteruskan melalui seluruh sistem rangka secara bertahap sehingga kekakuan global bangunan masih mampu mendistribusikan deformasi secara relatif seragam. Sebaliknya, pada kombinasi beban gempa dan tsunami, gaya lateral yang

terkonsentrasi pada lantai bawah menghasilkan gradien gaya geser (*story shear*) yang jauh lebih besar dibandingkan dengan kondisi gempa saja. Akibatnya, elemen kolom dan balok pada lantai bawah menerima tuntutan momen lentur dan gaya geser yang lebih tinggi sehingga terjadi peningkatan deformasi lokal yang kemudian memengaruhi respons global struktur.

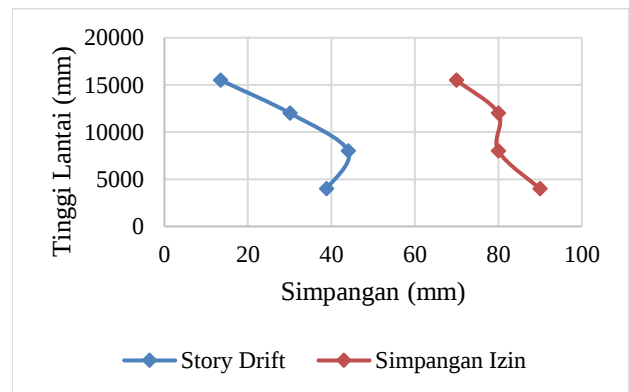
Peningkatan deformasi pada lantai bawah juga mengindikasikan terjadinya penurunan kekakuan lateral efektif struktur. Secara mekanis, semakin besar deformasi yang terjadi, semakin besar pula kontribusi deformasi lentur pada kolom dan balok, sehingga kemampuan struktur dalam menahan gaya lateral tambahan menjadi berkurang. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa respons struktur pada Model B mengalami peningkatan simpangan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan Model A meskipun konfigurasi struktur, dimensi elemen, mutu material, dan sistem struktur yang digunakan tetap sama.

Selain meningkatkan deformasi, kombinasi beban gempa dan tsunami juga mengubah pola distribusi perpindahan struktur. Perubahan arah perpindahan yang terjadi pada beberapa lantai menunjukkan bahwa struktur mengalami redistribusi gaya internal akibat interaksi antara gaya inersia gempa dan tekanan lateral tsunami. Kondisi ini menunjukkan bahwa respons struktur terhadap pembebanan multibahaya (*multi-hazard loading*) tidak dapat diprediksi hanya berdasarkan karakteristik respons gempa, karena kedua jenis beban memiliki mekanisme kerja yang berbeda dan saling memengaruhi selama proses analisis.

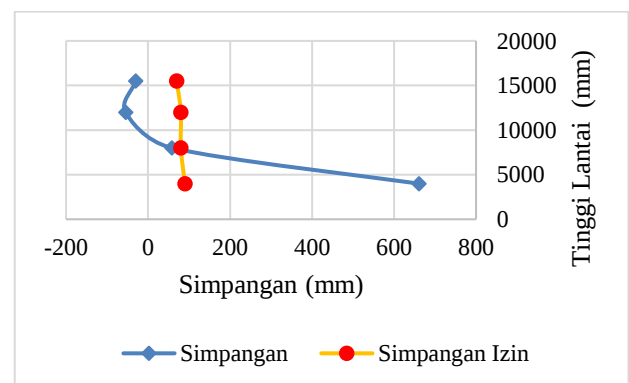
Hasil penelitian ini sejalan dengan (Tagle et al., 2021) yang menyatakan bahwa beban tsunami menghasilkan peningkatan deformasi lateral yang lebih besar dibandingkan dengan pembebanan gempa karena adanya tekanan fluida yang bekerja langsung pada elemen struktur. Temuan ini juga konsisten dengan penelitian (Fauzan, et al., 2023) yang menunjukkan bahwa bangunan yang telah memenuhi persyaratan desain gempa masih dapat mengalami peningkatan simpangan yang signifikan setelah menerima beban tsunami berdasarkan FEMA P-646. (Zapata et al., 2023) juga menjelaskan bahwa kombinasi beban gempa dan tsunami menghasilkan respons struktur yang lebih kompleks akibat interaksi antara kerusakan awal yang ditimbulkan oleh gempa dengan tekanan hidrodinamik yang terjadi selama tsunami.

Dari sudut pandang perencanaan struktur, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemenuhan batas simpangan berdasarkan peraturan desain gempa belum menjamin kinerja struktur terhadap kombinasi beban gempa dan tsunami. Bangunan yang berlokasi di kawasan pesisir memerlukan evaluasi tambahan terhadap distribusi gaya lateral pada lantai bawah karena bagian tersebut menerima tekanan tsunami paling besar. Oleh sebab itu, desain elemen kolom, balok, sambungan, serta sistem

penahan gaya lateral pada lantai dasar perlu mempertimbangkan peningkatan gaya geser, momen lentur, dan deformasi akibat pembebanan tsunami. Pendekatan desain berbasis *multi-hazard* menjadi penting agar struktur tidak hanya memenuhi persyaratan ketahanan gempa, tetapi juga mampu mempertahankan stabilitas dan integritasnya ketika mengalami pembebanan gempa yang diikuti oleh tsunami.



Gambar 3 *Story drift* akibat beban gempa terhadap simpangan izin



Gambar 4 *Story drift* struktur akibat beban gempa-tsunami terhadap simpangan izin

3.2. Analysis Efek *P-Delta*

Hasil analisis efek *P-Delta* pada struktur dengan pembebanan gempa dan kombinasi beban gempa-tsunami disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4, sedangkan distribusi koefisien stabilitas (θ) ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pada model yang hanya menerima beban gempa, seluruh lantai masih memenuhi persyaratan stabilitas menurut SNI 1726:2019, yang menunjukkan bahwa pengaruh efek orde kedua masih relatif kecil terhadap respons struktur. Hal ini mengindikasikan bahwa kekakuan lateral global struktur masih cukup untuk mengendalikan deformasi, sehingga momen tambahan akibat interaksi

gaya aksial dan perpindahan lateral belum memberikan pengaruh yang signifikan.

Tabel 4 Analisis P-Delta beban gempa

Story	hsx (mm)	Δ (mm)	P (KN)	Vx (KN)	θ	θ_{max}	Ket
Story 4	15500	13.482	2214.613	271.2602	0.00194	0.09091	Stabil
Story 3	12000	30.103	22515.082	1708.3017	0.00902	0.09091	Stabil
Story 2	8000	44.037	43651.067	2771.1784	0.02365	0.09091	Stabil
Story 1	4000	38.885	64787.052	3285.0669	0.05229	0.09091	Stabil

Tabel 5 Analisis P-Delta beban gempa+tsunami

Story	hsx (mm)	Δ (mm)	P (KN)	Vx (KN)	θ	θ_{max}	Ket
Story 4	15500	-29.894	2214.613	328.3569	0.00355	0.09091	Stabil
Story 3	12000	-54.560	22515.08	1867.834	0.01495	0.09091	Stabil
Story 2	8000	58.238	43651.06	3007.116	0.02882	0.09091	Stabil
Story 1	4000	660.891	64787.05	3553.0842	0.82164	0.09091	Tidak Stabil

Perilaku struktur berubah ketika beban tsunami dimasukkan ke dalam kombinasi pembebanan. Tidak seperti beban gempa yang menghasilkan gaya inersia yang terdistribusi sepanjang tinggi bangunan sesuai distribusi massa, beban tsunami bekerja secara langsung pada bagian bangunan yang terendam sehingga menghasilkan konsentrasi gaya lateral pada lantai bawah. Konsentrasi gaya tersebut menyebabkan distribusi gaya geser antarlantai (*story shear*) menjadi tidak merata dan meningkatkan tuntutan gaya dalam pada kolom-kolom lantai dasar. Akibatnya, kekakuan lateral efektif struktur pada bagian bawah mengalami penurunan relatif terhadap kondisi pembebanan gempa saja, sehingga deformasi lokal meningkat secara signifikan.

Peningkatan deformasi tersebut berpengaruh langsung terhadap besarnya efek P-Delta. Secara mekanis, efek P-Delta merupakan momen sekunder yang timbul akibat interaksi antara gaya aksial vertikal (P) dengan perpindahan lateral (Δ). Semakin besar perpindahan lateral yang terjadi pada struktur, semakin besar pula momen sekunder yang dihasilkan. Oleh karena itu, peningkatan koefisien stabilitas (θ) pada Model B bukan hanya disebabkan oleh bertambahnya gaya lateral akibat tsunami, tetapi juga merupakan konsekuensi dari meningkatnya deformasi struktur yang memperbesar kontribusi analisis orde kedua. Kondisi ini menunjukkan bahwa penurunan

kekakuan global struktur memiliki peranan penting dalam meningkatkan sensitivitas struktur terhadap efek P-Delta.

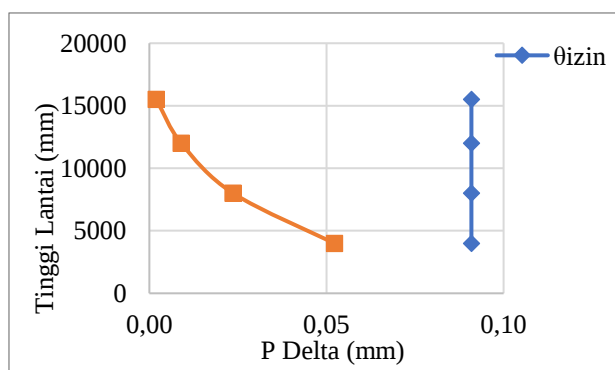
Hasil analisis menunjukkan bahwa simpangan lateral pada lantai dasar mencapai 660,891 mm setelah struktur menerima kombinasi beban gempa dan tsunami. Nilai tersebut menunjukkan peningkatan deformasi yang sangat besar dibandingkan dengan kondisi pembebanan gempa saja. Namun demikian, perlu ditegaskan bahwa penelitian ini menggunakan analisis linier elastis dengan metode respons spektrum pada ETABS v18. Dengan pendekatan tersebut, hasil analisis menggambarkan respons elastis struktur terhadap kombinasi pembebanan dan belum dapat digunakan untuk menyimpulkan terjadinya plastisitas elemen, terbentuknya mekanisme keruntuhan, maupun kapasitas pasca-leleh struktur. Oleh karena itu, besarnya simpangan yang diperoleh harus diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa tuntutan deformasi struktur telah meningkat secara signifikan dan berpotensi melampaui rentang perilaku elastis yang menjadi dasar analisis. Untuk memastikan apakah struktur telah mengalami pelelehan, terbentuknya sendi plastis, atau mekanisme keruntuhan, diperlukan analisis nonlinier, seperti *pushover analysis* atau *nonlinear time history analysis*.

Selain meningkatkan deformasi, kombinasi gaya hidrostatik, gaya hidrodinamik, gaya tumbukan debris, gaya apung (*uplift*), serta beban tambahan akibat genangan menghasilkan distribusi gaya lateral yang berbeda dibandingkan dengan pembebanan gempa. Interaksi seluruh komponen gaya tersebut meningkatkan momen guling (*overturning moment*) pada struktur dan memperbesar gaya aksial pada elemen-elemen vertikal di lantai bawah. Kondisi ini menyebabkan rasio antara gaya aksial dan kekakuan lateral meningkat, sehingga pengaruh efek orde kedua menjadi lebih dominan dibandingkan dengan struktur yang hanya menerima beban gempa. Dengan kata lain, peningkatan nilai koefisien stabilitas (θ) merupakan akibat dari kombinasi antara bertambahnya gaya lateral, meningkatnya deformasi, dan berkurangnya kemampuan struktur dalam mempertahankan kekakuan global terhadap pembebanan tambahan.

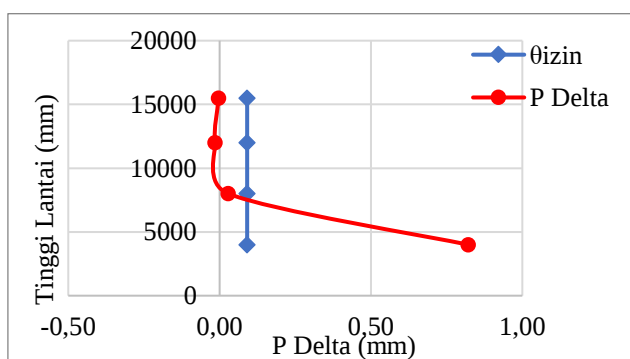
Dari sudut pandang perencanaan struktur, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa struktur yang telah memenuhi persyaratan stabilitas berdasarkan kombinasi beban gempa belum tentu memiliki tingkat keamanan yang sama ketika menerima kombinasi beban gempa dan tsunami. Pada bangunan di kawasan pesisir, elemen kolom, balok, sambungan, serta sistem penahan gaya lateral pada lantai dasar merupakan bagian yang menerima tuntutan gaya terbesar sehingga memerlukan perhatian khusus dalam proses desain. Selain peningkatan kapasitas lentur dan geser elemen struktur, perencanaan juga perlu mempertimbangkan peningkatan kekakuan sistem penahan gaya lateral agar deformasi dan efek P-Delta tetap

berada dalam batas yang dapat diterima ketika terjadi pembebanan multibahaya (*multi-hazard loading*).

Temuan ini sejalan dengan penelitian (Del Zoppo et al., 2022) yang menyatakan bahwa gaya lateral akibat tsunami dapat meningkatkan deformasi struktur dan memperbesar pengaruh efek ordo kedua pada bangunan beton bertulang. Selanjutnya, menurut (Kumar et al., 2025) ditunjukkan bahwa penerapan beban tsunami berdasarkan FEMA P-646 dapat secara signifikan meningkatkan respons struktur, terutama pada elemen yang terletak di sekitar permukaan tanah. Selain itu, menurut (Del Zoppo et al., 2025) dijelaskan bahwa kombinasi bahaya gempa bumi dan tsunami menghasilkan kondisi pembebanan yang lebih kritis dibandingkan dengan gempa tunggal, karena kerusakan awal yang disebabkan oleh gempa bumi dapat diperparah oleh tekanan hidrodinamik tsunami yang menyebabkan peningkatan deformasi dan penurunan tingkat kestabilan struktur.



Gambar 5 Efek *P-Delta* akibat beban gempa terhadap (θ) izin



Gambar 6 Efek *P-Delta* akibat beban gempa+ tsunami terhadap (θ) izin

4. Kesimpulan

Struktur yang hanya dikenai beban gempa masih memenuhi kriteria batas simpangan yang ditetapkan dalam SNI 1726:2019, dinyatakan aman. Seluruh nilai *story drift* yang diperoleh berada di bawah batas simpangan yang

diizinkan, sehingga struktur masih dikategorikan memiliki tingkat keamanan yang memadai terhadap beban gempa. Hal ini berbeda dengan struktur yang menerima kombinasi beban gempa dan tsunami, di mana terjadi peningkatan deformasi yang signifikan, terutama pada lantai dasar. Peningkatan ini menyebarkan nilai simpangan di luar batas yang diizinkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban tsunami memiliki efek gaya lateral yang lebih besar daripada beban gempa, sehingga menghasilkan respons deformasi struktural yang lebih besar. Efek *P-Delta* menunjukkan bahwa struktur dengan beban gempa saja masih memenuhi persyaratan stabilitas, yang ditunjukkan oleh semua nilai koefisien stabilitas (θ) yang berada di bawah batas maksimum yang disyaratkan. Namun, pada struktur dengan kombinasi beban gempa dan tsunami, nilai koefisien stabilitas mengalami peningkatan yang signifikan hingga melebihi batas yang diizinkan, terutama pada lantai dasar. Hal ini menunjukkan bahwa adanya beban tsunami dapat meningkatkan pengaruh efek orde kedua yang berpotensi mengurangi stabilitas struktur dan meningkatkan risiko kegagalan jika tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas elemen dan sistem penahan gaya lateral. Penambahan beban tsunami berpengaruh pada peningkatan simpangan antar lantai dan peningkatan efek *P-Delta* dibandingkan dengan struktur yang hanya dirancang untuk beban gempa. Dengan demikian, bangunan yang telah memenuhi persyaratan desain gempa belum tentu mampu memberikan kinerja struktural yang optimal ketika menghadapi kombinasi beban gempa dan tsunami. Oleh karena itu, untuk bangunan yang terletak di daerah pesisir dengan potensi bahaya tsunami, analisis dan evaluasi struktur perlu mempertimbangkan tidak hanya beban gempa berdasarkan SNI 1726:2019, tetapi juga beban tsunami sesuai dengan pedoman FEMA P-646 untuk meningkatkan tingkat keselamatan, keandalan dan ketahanan struktur.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Universitas Muara Bungo, Muara Bungo, Jambi, Indonesia. Selanjutnya, para penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat yang telah mendukung pendanaan dan jalannya penelitian ini.

6. Referensi

- 2847:2019, S. (2019). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Sni 2847-2019*, 8, 720.
- Ambia, D., & Rani, C. M. (2026). Analisis Perencanaan Struktur Kolom Dan Balok Pada Gedung Serbaguna Universitas Sains Cut Nyak Dhien. *Princes*, 5(1), 875–885.
- Baiguera, M., Rossetto, T., Robertson, I. N., & Petrone, C. (2022). *A Procedure for Performing Nonlinear Pushover Analysis for Tsunami Loading to ASCE 7*.

- Journal of Structural Engineering*, 148(2), 1–32. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003256](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003256)
- Del Zoppo, M., Belliazzi, S., Lignola, G. P., Di Ludovico, M., & Prota, A. (2022). *Analytical Structural Vulnerability and Classification of Italian Residential Building Stock to Tsunami Hazard*. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 63(4), 555–574. <https://doi.org/10.4430/bgo00398>
- Del Zoppo, M., Di Ludovico, M., Lignola, G. P., & Prota, A. (2025). *Time-Dependent Tsunami Fragility Analysis for Reinforced Concrete Building Stock*. *Engineering Structures*, 330(January), 119931. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119931>
- Fauzan, Ikhwan, F. M., Nugraha, M. D. A., Syandriadi, D., & Al Jauhari, Z. (2023). *The Effect of Tsunami Loads on The Prayoga Foreign Language College Building in Padang City, Indonesia*. *International Journal of GEOMATE*, 25(112), 115–122. <https://doi.org/10.21660/2023.112.S8624>
- Fauzan, Kurniawan, R., Syahdiza, N., Al Jauhari, Z., & Nugraha, M. D. A. (2023). *Fragility Curve of School Building in Padang City With and Without Retrofitting Due To Earthquake and Tsunami Loads*. *International Journal of GEOMATE*, 24(101), 102–109. <https://doi.org/10.21660/2023.101.g12251>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2019). *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation From Tsunamis 3rd Edition*. *Jetty.Ecn.Purdue.Edu*, August, 176.
- Harati, M., & van de Lindt, J. W. (2024). *Impact of Long-Duration Earthquakes on Successive Earthquake-Tsunami Fragilities for Reinforced Concrete Frame Archetypes*. *Journal of Structural Engineering*, 150(10), 1–19. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-13018>
- Krautwald, C., Stolle, J., Robertson, I., Achiari, H., Mikami, T., Nakamura, R., Takabatake, T., Nishida, Y., Shibayama, T., Esteban, M., Goseberg, N., & Nistor, I. (2021). *Engineering Lessons from September 28, 2018 Indonesian Tsunami: Scouring Mechanisms and Effects on Infrastructure*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000620](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000620)
- Kumar, P., Madhuri, S., & Ahmed, M. (2025). *Sequential Nonlinear Time History Analysis of Asymmetric Reinforced Concrete Buildings Under the 2011 Great Japan Earthquake and Tsunami*. *Buildings*, 15(13), 1–31. <https://doi.org/10.3390/buildings15132170>
- Lorito, S., Behrens, J., Løvholt, F., Rossetto, T., & Selva, J. (2021). *Editorial: From Tsunami Science to Hazard and Risk Assessment: Methods and Models*. *Frontiers in Earth Science*, 9(October), 8–11. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.764922>
- Nugraheni, A. S. (2025). *Nilai Peak Ground Acceleration Pada Kecamatan Berbah, Kabupaten Sleman*. *JITS: Jurnal Ilmiah Teknik Dan Sains*, 3(2), 242–247.
- SNI 1726:2019. (2019). *Standar Nasional Indonesia 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*, 8, 254.
- SNI 1727:2020. (2020). *SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur lain*. *Jakarta*, 8, 1–336.
- T Ramadhani, Yuslinda, R. M. (2026). *Analisis Struktur Kolom dan Balok Pada Perencanaan Gedung Fakultas Universitas Sains Cut Nyak Dhien*. *Prince*, 5(1), 865–874.
- Tagle, S. J., Jünemann, R., Vásquez, J., de la Llera, J. C., & Baiguera, M. (2021). *Performance of a reinforced concrete wall building subjected to sequential earthquake and tsunami loading*. *Engineering Structures*, 238(March 2019). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111995>
- Zapata, J. C. G., Pittore, M., Brinckmann, N., Lizarazo-Marriaga, J., Medina, S., Tarque, N., & Cotton, F. (2023). *Scenario-Based Multi-Risk Assessment from Existing Single-Hazard Vulnerability Models. An Application to Consecutive Earthquakes and Tsunamis in Lima, Peru*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 2203–2228. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2203-2023>