

Analisis Kerentanan *Shelter* Tsunami terhadap Beban Gempa dan Tsunami Menggunakan Metode *Time History* dan *Incremental Dynamic Analysis*

Mohamad Daffa Rivansyah, Muhammad Fauzan, dan Heriansyah Putra

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian,

Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

1827rivansyah@apps.ipb.ac.id, fauzan@apps.ipb.ac.id, heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Palabuhanratu merupakan lokasi dengan risiko tinggi terhadap gempa berkekuatan 8,9 M_w dan tsunami setinggi 20 meter, dengan populasi sekitar 119.347 jiwa dan hingga 1,7 juta pengunjung tahunan. Penelitian ini menganalisis kerentanan *shelter* dengan menggunakan metode non linear *time history* dan *Incremental Dynamic Analysis* terhadap tiga rekaman gempa; Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku serta beban tsunami dengan variasi inundasi 2,5–20 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur mencapai kinerja IO terhadap gempa pada skala 1,0, namun mengalami peningkatan signifikan dalam simpangan atap akibat beban tsunami, terutama pada ketinggian 15 m. Kurva fragilitas memperlihatkan probabilitas kerusakan berat mencapai 95,6% dan potensi keruntuhan 10,93% pada tsunami dengan puing, sementara pada skenario tanpa puing probabilitas kerusakan berat hampir 0%. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan beban puing dalam desain *shelter* tsunami serta memberikan dasar empiris untuk pengembangan kurva fragilitas pada struktur *shelter* tsunami.

Kata kunci: gempa, kerentanan struktur, *shelter*, *time history*, tsunami

Abstract

Palabuhanratu is a location with an elevated risk of an 8.9 M_w earthquake and a 20-meter tsunami, with a population of approximately 119,347 and up to 1.7 million annual visitors. This research analyzes the shelter's fragility using non-linear time history and Incremental Dynamic Analysis methods under three recorded earthquakes; Chi-Chi, Iwate, and Tohoku and tsunami loads with variations of 2.5–20 m inundation. The analysis results show that the structure satisfies IO performance against earthquakes at scale 1.0 but experiences a significant increase in roof drift due to tsunami loads and exceeds LS limit, especially at 15 m inundation height. The fragility curves show that the probability of extensive damage reaches 95.6% and the collapse probability 10.93% in the tsunami with debris, whereas in the scenario without debris the probability of extensive damage is almost zero. The findings confirm the importance of considering debris loads in tsunami shelter design and provide an empirical basis for the development of fragility curves for tsunami shelter structures.

Keywords: earthquake, structure fragility, shelter, time history, tsunami

1. Pendahuluan

Letak geografis Indonesia yang berada di pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, menyebabkan negara ini rawan terhadap gempa bumi dan tsunami (Tjandra, 2018). Aktivitas tektonik, khususnya pergerakan lempeng Eurasia dan Indo-Australia, dapat menyebabkan terjadinya patahan atau sesar subduksi aktif yang tersebar di beberapa wilayah di Indonesia (Suarbawa dkk., 2021). BMKG mencatat ada sekitar 295 sesar aktif yang mengelilingi Indonesia yang menjadikannya sangat rentan terhadap bencana alam, terutama gempa bumi dangkal di lautan yang berpotensi menyebabkan tsunami ke daratan. Menurut BNPB, 90% tsunami yang terjadi di Indonesia disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut, 9% oleh gunung berapi aktif yang meletus di bawah laut, dan 1% oleh longsor bawah laut (BNPB, 2023). Data Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2022 juga menunjukkan bahwa banyak wilayah di Indonesia, terutama daerah pesisir pantai, memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi dan tsunami (BNPB, 2022). Beberapa kejadian seperti gempa Aceh 2004 yang berkekuatan 9,1 M_w dan tsunami setinggi 30 meter menewaskan 227.898 korban jiwa, serta gempa Palu 2018 yang berkekuatan 7,5 M_w dan menewaskan 3.879 jiwa, menegaskan tingginya ancaman ini (Anggraini & Mardhatillah, 2020; Mutaqin dkk., 2020).

Palabuhanratu sebagai salah satu daerah pesisir selatan Jawa, menjadi salah satu wilayah yang rentan terhadap tsunami. Widiyantoro dkk., (2020) menunjukkan bahwa wilayah pesisir selatan Jawa memiliki tingkat seismik yang lemah dengan akumulasi regangan elastis yang tinggi sehingga memungkinkan pelepasan energi tiba-tiba dan berpotensi menyebabkan gempa berkekuatan 8,9 M_w dan tsunami setinggi 12-20 meter. Wilayah ini pernah dilanda beberapa gempa besar, seperti gempa pada 17 Juli 2006 yang berkekuatan 7,8 M_w menyebabkan tsunami setinggi 5-7 meter di Pangandaran, serta gempa pada 2 September 2009 yang melanda selatan Jawa Barat dengan kekuatan 6,8 M_w (Supendi dkk., 2023).

Palabuhanratu memiliki populasi 119.347 jiwa dan luas wilayah 94,60 km^2 , serta menjadi destinasi wisata dengan rata-rata 1,7 juta pengunjung per tahun

Info Makalah:

Dikirim : 04-14-25;

Revisi 1 : 06-18-25;

Diterima : 08-01-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-822-4664-3151

e-mail : heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

(Utami dkk.,2019). Studi terbaru menyebutkan bahwa peristiwa *megathrust* besar berpotensi terjadi di wilayah ini dengan periode ulang 500 tahun (Supendi dkk.,2023). Elevasi lokasi rata-rata kurang dari 50 meter dan waktu tempuh evakuasi yang lebih dari 30 menit tergolong sangat jauh dalam situasi darurat (Ashar dkk.,2014). Oleh karena itu, diperlukan langkah mitigasi yang tepat, seperti pembangunan *shelter* permanen yang mudah dijangkau di daerah pesisir pantai.

Metode desain *shelter* yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar FEMA P-646 dengan analisis *non linear time history* menggunakan data rekaman gempa yang pernah terjadi. Kurva fragilitas juga dilakukan dengan menggunakan metode IDA untuk memodelkan respons struktur seiring dengan peningkatan beban (Rahman dkk.,2022). Metode desain konvensional hanya mengevaluasi struktur pada tingkat beban tertentu tanpa menggambarkan responsnya terhadap kejadian ekstrem. Dalam konteks bencana seperti gempa dan tsunami di Palabuhanratu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif. *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) memungkinkan evaluasi performa struktur secara non linear hingga mencapai kondisi keruntuhan sehingga sangat relevan untuk menilai ketahanan aktual *shelter* tsunami yang harus tetap berdiri dan berfungsi pasca bencana. Tsunami dengan puing dapat meningkatkan dampak signifikan pada struktur karena puing-puing yang terbawa tsunami memperparah kerusakan pada bangunan (FEMA, 2019). Hantaman puing dapat menyebabkan kerusakan parah terutama pada bagian bawah bangunan yang terdampak langsung tsunami. Penelitian oleh Pradana dkk.,(2015) menunjukkan bahwa struktur dengan lantai bawah terbuka dapat mengurangi dampak hidrodinamik karena aliran tsunami dapat melewati lantai pertama. Penelitian ini bertujuan menganalisis kerentanan struktur *shelter* terhadap gempa dan tsunami dengan menggabungkan standar desain Indonesia dan FEMA P-646 untuk merancang *shelter* sebagai fasilitas evakuasi vertikal yang tahan terhadap tsunami.

2. Metode

2.1. Lokasi dan Material

Penelitian ini diawali dengan perencanaan *shelter* yang berlokasi di Kecamatan Palabuhanratu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat pada koordinat 7°03'00 LS dan 106°27'00 BT. Lokasi tersebut berupa terminal eksisting yang akan dialih fungsikan menjadi *shelter*. Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, antara lain laptop yang dilengkapi perangkat lunak ETABS, Origin, dan Microsoft Office. Bahan-bahan yang digunakan, di antaranya berupa Peta Sumber dan Bahaya Gempa Tahun 2017, Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa, dan data-data rekaman gempa yang tersedia di situs PEER NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center) dan NHR3 (Natural Hazards Risks and Resiliency Research Center) dari tiga wilayah; antara lain gempa Chi-Chi, gempa Iwate, dan gempa Tohoku. Beberapa standar acuan atau peraturan yang digunakan, yaitu SNI 2847:2019 untuk perencanaan struktur beton bertulang, SNI 1726:2019 untuk ketahanan terhadap gempa, SNI 1727:2020 untuk beban desain minimum, FEMA P-646 untuk desain *shelter* tsunami, dan SNI 8899:2020 untuk pemilihan dan modifikasi rekaman gerakan tanah (gempa).

2.2. Preliminary Design

Tahap *preliminary design* menentukan dimensi awal elemen struktur balok, kolom, dan pelat lantai sesuai SNI 2847:2019. Selain itu, direncanakan pula ketinggian *shelter* berdasarkan FEMA P-646 dengan ketinggian inundasi acuan 5 m dan *freeboard* sebesar 3 m + 30% dari ketinggian inundasi. Tinggi bangunan *shelter* dihitung dengan Persamaan (1).

$$T = T_i + F = T_i + (3 + 30\% T_i) \quad (1)$$

2.3. Pemodelan Struktur dan Pembebanan

Struktur dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS dengan dimensi elemen yang ditentukan pada tahap *preliminary design*. Elemen struktur yang dimodelkan, antara lain kolom, balok, pelat lantai, tangga, dan *ramp*. Beban-beban direncanakan dan dianalisis berdasarkan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan FEMA P-646. Beban gravitasi yang digunakan, antara lain beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*superimposed dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban hujan (*rain load*).

2.4. Analisis Gempa (Respons Spektrum dan *Time History*)

Analisis respons spektrum dilakukan dengan dimasukkannya data respons spektrum dan parameter gempa sesuai lokasi, kemudian periode struktur ditentukan berdasarkan nilai maksimum antara periode maksimum dan periode hasil analisis ragam getar untuk kedua arah-x dan arah-y dengan kontrol ragam getar minimum 90% dari massa total bangunan. Gaya geser dasar dihitung untuk statis dan dinamis, dengan gaya geser dinamik yang perlu diskalakan jika kurang dari gaya geser statis. Simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi batas izin dan perlu disesuaikan dengan Kategori Desain Seismik (KDS) bangunan. Selain itu, analisis gempa dengan metode *time history* dilakukan menggunakan data rekaman gempa Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku. Data ini dimasukkan ke ETABS dan dilakukan

pencocokan spektrum dengan respons spektrum Palabuhanratu dalam rentang $0,2 T_{lower}$ hingga $2,0 T_{upper}$ untuk analisis non linear.

2.5. Pembebanan Tsunami dan Kerentanan Struktur

Shelter memiliki kategori risiko tsunami IV dengan variasi ketinggian inundasi 2,5–20 m (peningkatan setiap ketinggian 2,5 m) dengan beban yang dimodelkan, seperti hidrostatik, hidrodinamik, apung, impuls, dan hantaman puing. Faktor keutamaan tsunami (I_{TSU}) kategori IV sebesar 1,25. Beban tsunami dimasukkan setelah analisis gempa selesai dengan mempertimbangkan faktor *cracking* dan penurunan kekakuan pada elemen struktur. Setelah itu, dibuat kurva fragilitas untuk gempa dan tsunami dengan batas kerusakan HAZUS, serta analisis *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) dengan parameter PGA (*peak ground acceleration*) dan rasio simpangan antar lantai. Analisis statistik dilakukan untuk menghitung probabilitas kerusakan pada tiap level. Kurva fragilitas dibuat berdasarkan simpangan antar lantai akibat beban gempa dan tsunami pada berbagai inundasi, dengan batas kerusakan menurut HAZUS (ringan, sedang, berat, runtuh) dengan persentase simpangan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas kerusakan dan persentase simpangan akibat gempa dan tsunami (FEMA, 2022)

Kerusakan	Rasio Simpangan (%)
Ringan	<0,20
Sedang	0,20 – 0,50
Berat	0,50 – 1,20
Runtuh	1,20 – 2,80

Sementara itu, kurva fragilitas struktur dihasilkan dari hasil analisis yang dibuat dengan menggunakan beberapa parameter pada Persamaan (2)–(5).

$$v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\mu}{\sqrt{1 + v^2}} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\ln(1 + v^2)} \quad (4)$$

$$P = \Phi \frac{\ln\left(\frac{x}{\theta}\right)}{\beta} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Struktur *Shelter* dan Kapasitasnya

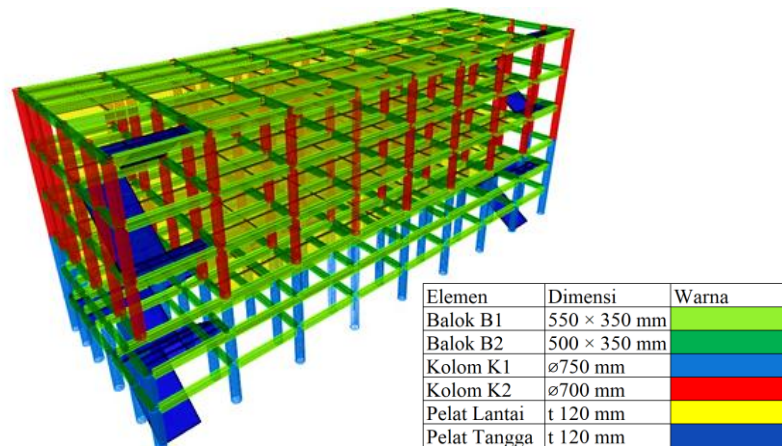
Shelter tsunami dirancang secara tipikal sesuai standar FEMA P-646 untuk evakuasi vertikal, berbentuk persegi panjang empat lantai dengan total luas 768 m² (48 m × 16 m) dan tinggi bangunan 21,5 m. Elevasi lantai pertama yang dapat ditempati ditetapkan setinggi 9,5 m berdasarkan ketinggian tsunami 5 m yang ditambah *freeboard* 3 m dan 30% dari ketinggian inundasi, sedangkan lantai dua hingga empat masing-masing setinggi 4 m. Lantai dasar *shelter* didesain terbuka dengan tujuan mengurangi tekanan hidrodinamik dari arus tsunami. Hal ini berdasarkan acuan FEMA P-646 dan penelitian Pradana dkk.,(2015), bahwa lantai dasar tanpa dinding memungkinkan aliran air melewati struktur tanpa menimbulkan tekanan dan *drag force* berlebih (FEMA, 2019). Selain itu, kolom dirancang berbentuk lingkaran sehingga mengurangi besaran bidang kontak gaya dengan gelombang tsunami (Tun dkk.,2022). Fasilitas *shelter* dilengkapi *ramp* dan tangga untuk akses evakuasi dengan detail spesifikasi elemen struktur dari hasil analisis yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi dimensi elemen struktur

Elemen	Spesifikasi	Konfigurasi Tulangan	
		Longitudinal	Transversal
Balok B1	550 mm × 350 mm	8 D25	2D13-100/150
Balok B2	500 mm × 350 mm	4 D25	3D13-100/150
Kolom K1	D750 mm	26 D29	4D13-100/2D13-150
Kolom K2	D700 mm	26 D29	4D13-100/2D13-150

Elemen struktur, seperti kolom dan balok dimodelkan sebagai *frame* sedangkan pelat lantai dimodelkan sebagai *slab*. Momen inersia penampang beton ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan reduksi efektivitas penampang terhadap sumbu pusat untuk kolom, balok, dan pelat lantai berturut-turut sebesar 0,70; 0,35; dan 0,25. Hal ini

dilakukan untuk memperhitungkan efek retakan (*cracking*), penurunan kekakuan, dan perilaku non linear beton bertulang dalam kondisi pembebanan lateral, seperti gempa dan tsunami lebih representatif (Vandecruys dkk.,2024). Hasil pemodelan struktur dapat dilihat pada Gambar 1 dan kapasitas *shelter* pada Tabel 3. **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.**



Gambar 1. Pemodelan Struktur *Shelter* dan Elemen Struktur

Tabel 3. Kapasitas Desain *Shelter* Tipikal

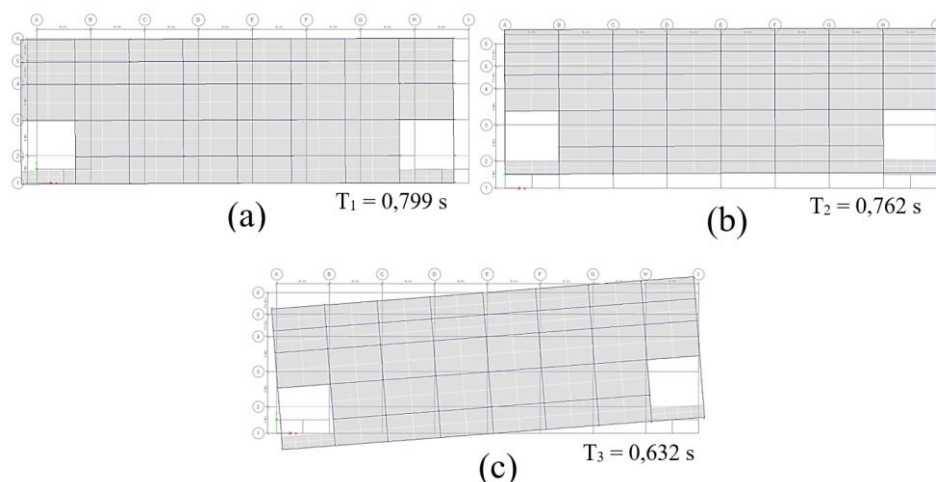
Luas lantai (m ²)	Lantai fungsional	Kapasitas (jiwa)	Penduduk terdampak* (jiwa)	Persentase tumpang (%)
768	4	3.072	47.400	6,48

*Penelitian Indira & Manessa, (2023)

Berdasarkan hasil pemodelan, *shelter* dirancang sebagai bangunan empat lantai dengan luas area mencapai 768 m². Dengan mengacu pada standar kepadatan evakuasi sebesar 1 m² per orang yang dianjurkan dalam FEMA P-646 (FEMA, 2019), kapasitas maksimal *shelter* ini adalah 3.072 jiwa. Angka ini mencerminkan jumlah maksimum pengungsi yang dapat tertampung secara aman dan efektif di dalam struktur, terutama saat terjadi tsunami dengan waktu evakuasi yang terbatas. Namun, ketika dibandingkan dengan estimasi populasi terdampak di wilayah pesisir Palabuhanratu yang mencapai sekitar 47.400 jiwa (Indira & Manessa, 2023), kapasitas *shelter* ini hanya mampu menampung sejumlah 6,48% dari total penduduk terdampak tsunami. Hal ini menunjukkan bahwa adanya *shelter* di pesisir pantai hanya berperan sebagai fasilitas pelindung sementara dan bukan solusi evakuasi massal. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi berupa pembangunan *shelter* tambahan dan peningkatan jalur evakuasi cepat ke daerah yang lebih tinggi.

3.2. Kontrol Desain Seismik Struktur

Hasil perencanaan struktur perlu dikontrol terhadap beberapa parameter, seperti pola ragam getar dan partisipasi massa, gaya geser dasar, dan simpangan antar lantai. Hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa struktur telah memenuhi dasar perencanaan sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Pola ragam getar struktur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola Ragam Getar; (a) Pertama, (b) Kedua, dan (c) Ketiga

Gambar 2 menunjukkan pola ragam pertama dan kedua bergerak translasi ke arah sumbu-x dan sumbu-y dengan periode masing-masing 0,799 detik dan 0,762 detik, sedangkan pola ragam ketiga menunjukkan gerak rotasi dengan periode 0,632 detik. Hal ini menunjukkan bahwa struktur lebih kaku pada sumbu-y dibandingkan sumbu-x (Mentari, 2020). Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi periode natural struktur, seperti ketinggian bangunan, kekakuan bangunan, dan getaran gempa (Kaplan dkk.,2021). Selain pola ragam, partisipasi massa juga menjadi faktor penting yang perlu memenuhi minimal 90% dari total massa struktur untuk translasi dan rotasi. Data partisipasi massa disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Partisipasi Massa Setiap Pola Ragam Getar

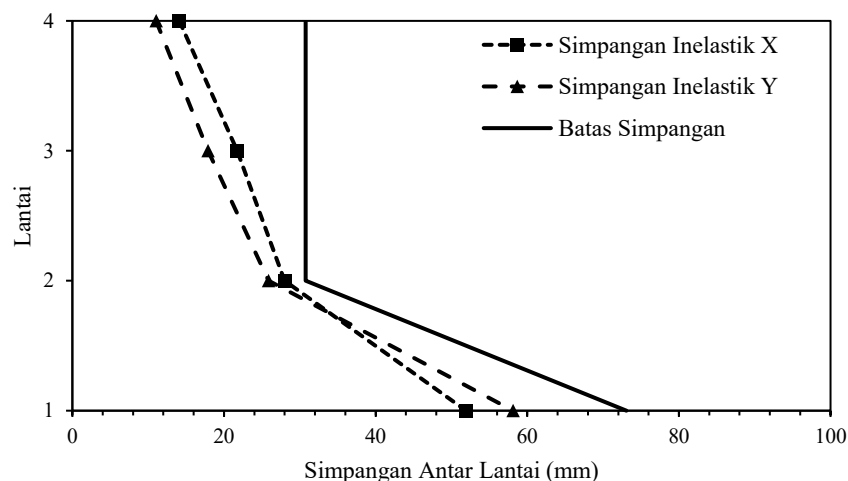
Ragam getar	Periode (detik)	Translasi		Rotasi
		Arah-x	Arah-y	Sumbu-z
1	0,799	90,85%	0,04%	0,07%
2	0,762	90,88%	93,92%	0,19%
3	0,632	90,99%	93,41%	93,07%

Tabel 4 menunjukkan partisipasi massa untuk ragam getar pertama hingga ketiga. Ragam getar pertama memenuhi syarat untuk translasi sumbu-x, ragam kedua memenuhi untuk sumbu-x dan sumbu-y, serta ragam ketiga memenuhi untuk semua derajat kebebasan. Dengan demikian, partisipasi massa struktur *shelter* terpenuhi untuk setiap arah pada ragam ketiga dengan periode 0,632 detik. Selain itu, SNI 1726:2019 juga menjelaskan bahwa besarnya gaya geser dasar dinamik perlu memenuhi setidaknya sama besar dengan gaya geser statik. Penskalaan gaya geser dasar dinamik diperlukan jika tidak memenuhi persyaratan. Hasil analisis gaya geser dasar disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Koreksi Nilai Gaya Geser Dasar

Statik (kN)	Dinamik X (kN)	Dinamik Y (kN)	Faktor Skala
4.482,62	4.103,84	4.205,15	1,10

Tabel 5 menunjukkan bahwa gaya geser dasar statik lebih besar dibandingkan dinamik untuk arah-x dan arah-y. Besarnya gaya geser dasar dinamik tidak memenuhi persyaratan sehingga diperlukan faktor skala baru, yaitu sebesar 1,10 untuk memenuhi nilai $V_{statik} \leq V_{dinamik}$. Selanjutnya, kontrol yang dilakukan berupa simpangan antar lantai. Batas izin simpangan dipengaruhi oleh kategori struktur dan kategori desain seismik (KDS) yang direduksi dengan faktor redundansi ($\rho = 1,3$) pada KDS D sehingga batas simpangan lantai pada struktur *shelter* ditetapkan sebesar 0,77% tinggi lantai. Gambar 3 menunjukkan bahwa simpangan antar lantai masih memenuhi batas izin pada arah-x dan arah-y. Nilai simpangan arah-x lebih besar daripada arah-y karena bentang arah-x yang lebih panjang sehingga inersia arah-y lebih besar (Schwarz dkk.,2020).



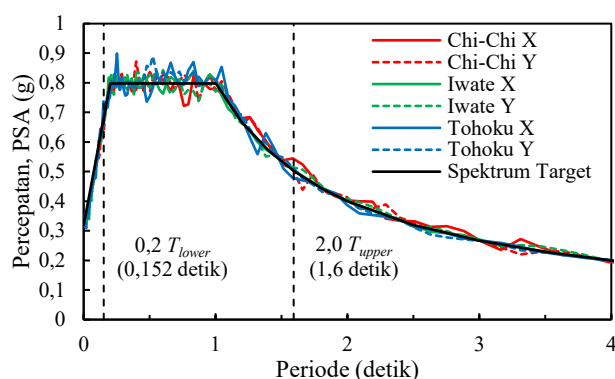
Gambar 3. Simpangan antar lantai

3.3. Analisis *Time History* dan Beban Tsunami

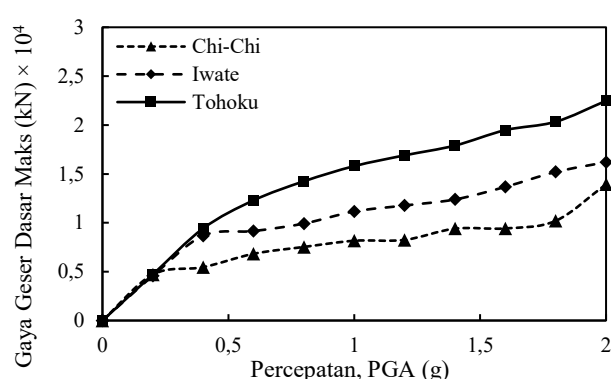
Analisis non linear *time history* dilakukan dengan menggunakan tiga data rekaman gempa dari tiga sumber, yaitu sesar dangkal, benioff, dan *megathrust*. Persyaratan pemilihan data gempa didasarkan pada Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Struktur Tahan Gempa dari parameter magnitudo (M),

jarak patahan (R_{rup}), dan cepat rambat gelombang geser rata-rata (v_{s30}). Rekaman gempa yang dipilih berdasarkan relevansi terhadap lokasi penelitian di Palabuhanratu, yaitu gempa Chi-Chi (1996) dengan magnitudo 6,2 M_w , gempa Iwate (2008) magnitudo 7,4 M_w , dan gempa Tohoku (2011) magnitudo 9,12 M_w . Ketiga spektrum gempa tersebut dilakukan penskalaan atau pencocokan spektral (*spectral matching*) sesuai dengan spektrum respons target Palabuhanratu berdasarkan SNI 8899:2020 dalam rentang periode 0,2 T_{lower} hingga 2,0 T_{upper} seperti pada Gambar 4 (BSN, 2020).

Pencocokan spektral untuk analisis non linear memiliki syarat bahwa spektrum rekaman gempa harus lebih besar daripada spektrum respons target dalam rentang periode 0,2 T_{lower} hingga 2,0 T_{upper} (0,152–1,60 detik). Gambar 4 menunjukkan spektrum respons gerakan tanah sebagai percepatan semu (*pseudo spectral acceleration*) dengan redaman 5% yang cocok dengan spektrum respons target. Penelitian Kurniawandy dkk.,(2023) dan Manfredi dkk.,(2022) juga menekankan bahwa pencocokan spektral rekaman gempa dalam analisis dinamik non linear digunakan untuk memastikan bahwa rekaman yang digunakan sesuai serta lebih efektif dibandingkan penskalaan amplitudo dalam menyesuaikan rekaman gempa dengan spektrum desain. Respons struktur untuk ketiga gempa disajikan dalam parameter gaya geser dasar dan PGA. Gaya geser dasar meningkat hampir linear pada PGA rendah (0,2 hingga 0,4 g) tetapi menjadi non linear setelahnya. Hubungan gaya geser dasar dan PGA dapat dilihat pada Gambar 5.

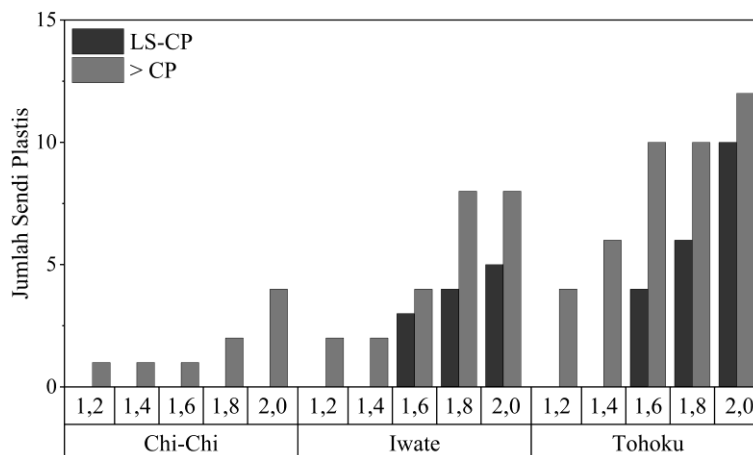


Gambar 4. Pencocokan spektrum gempa dan target



Gambar 5. Respons gaya geser dasar dan PGA

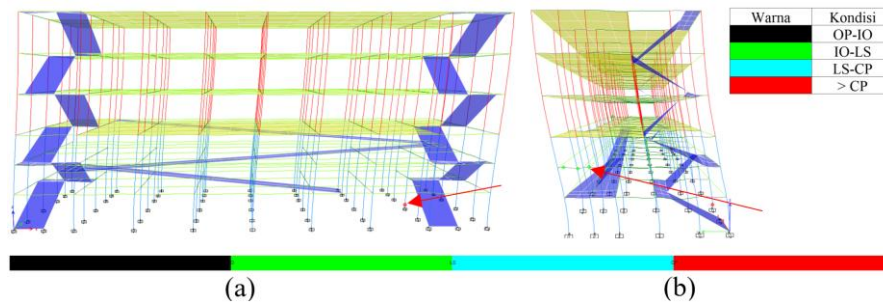
Gambar 5 menunjukkan gaya geser dasar maksimum akibat ketiga gempa pada PGA 1,0 g yang masing-masing sebesar 8.158,92 kN; 11.157,24 kN; dan 15.796,42 kN. Chi-Chi memiliki magnitudo terendah (6,2 M_w) dan durasi terpendek (80 detik) sehingga menghasilkan gaya geser dasar terendah. Peningkatan gaya geser dasar tidak selalu linear karena struktur akan mengalami fase non linear akibat deformasi plastis (Suwondo dkk.,2021). Struktur *shelter* pada skala gempa 0,2 hingga 1,0 masih berada dalam fase elastis, dengan elemen kolom dan balok belum membentuk sendi plastis sehingga aman untuk digunakan setelah gempa karena berada pada level kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Sendi plastis mulai terbentuk pada skala 1,2 hingga 2,0 untuk level LS (*Life Safety*) dan CP (*Collapse Prevention*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Jumlah sendi plastis yang terbentuk (skala gempa 1,2–2,0)

Gambar 6 menunjukkan jumlah sendi plastis untuk level kinerja LS (*Life Safety*) hingga CP (*Collapse Prevention*). Gempa Chi-Chi tidak menghasilkan sendi plastis pada level LS-CP, dengan sendi plastis penyebab keruntuhan (> CP) sebanyak empat buah pada skala gempa 2,0. Gempa Iwate menghasilkan terbentuknya sejumlah 8 sendi plastis

penyebab keruntuhan pada skala yang sama, sementara gempa Tohoku menghasilkan sendi plastis pada elemen struktur dengan jumlah terbanyak, yaitu 12 buah. Dengan demikian, struktur *shelter* menunjukkan kinerja terbaik terhadap gempa Chi-Chi karena jumlah sendi plastis yang terbentuk paling minimum dibandingkan dengan Iwate dan Tohoku. Ilustrasi terbentuknya sendi plastis pada elemen struktur *shelter* dapat dilihat pada Gambar 7.



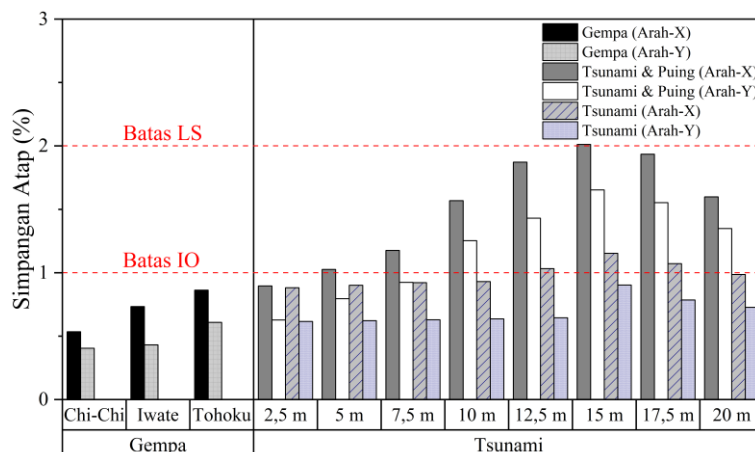
Gambar 7. Sendi plastis pada struktur *shelter*; (a) arah-x, (b) arah-y

Selanjutnya, perhitungan beban tsunami dibagi menjadi beberapa variasi ketinggian inundasi, yaitu 2,5–20 m dengan peningkatan setiap 2,5 m. Jenis beban yang diperhitungkan berupa beban hidrostatik, hidrodinamik, impuls, apung (*buoyancy*), dan hantaman puing. Besarnya beban-beban tersebut disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Besaran Beban Tsunami yang Diperhitungkan pada Struktur

Beban	Notasi	Besaran gaya untuk setiap inundasi (kN)							
		2,5 m	5 m	7,5 m	10 m	12,5 m	15 m	17,5 m	20 m
Hidrostatik	F_{hs}	6,48	84,03	249,24	502,11	842,63	1.270,82	1.786,68	2.390,19
Hidrodinamik	F_d	0,23	6,05	19,65	41,03	70,19	107,14	151,86	204,36
Impuls	F_s	0,35	9,08	29,48	61,55	105,29	160,70	227,79	306,54
Hantaman Puing	F_i	428,63	1.049,92	1.421,60	1.714,52	1.964,22	2.185,59	2.386,51	2.571,77

Beban tsunami yang berdampak signifikan pada struktur disebabkan oleh hantaman puing karena terjadi secara tiba-tiba dan sulit diprediksi. Sementara itu, beban apung dihitung untuk setiap elemen struktur, seperti kolom, balok, dan pelat lantai dengan nilai distribusi gaya yang lebih besar untuk komponen yang lebih besar atau panjang. Beban-beban tsunami tersebut berdampak pada deformasi struktur yang meningkat seiring dengan peningkatan ketinggian inundasi. Perbandingan simpangan atap akibat gempa dan tsunami dapat dilihat pada Gambar 8.



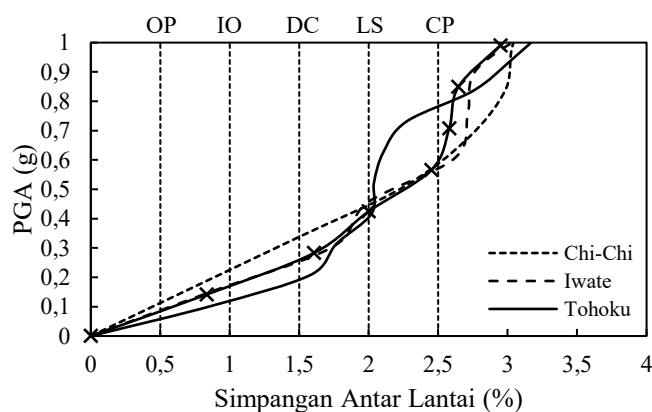
Gambar 8. Simpangan Atap Akibat Gempa dan Tsunami

Gambar 8 menunjukkan perbandingan simpangan atap akibat gempa dan tsunami. Simpangan atap akibat ketiga gempa (Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku) pada skala 1,0 masih berada di bawah batas level kinerja *Immediate Occupancy* (1%). Namun, setelah dikenai tsunami, simpangan atap meningkat signifikan. Beban tsunami dengan puing menghasilkan simpangan hingga 2,01% pada arah-x dan 1,65% pada arah-y, bahkan melebihi batas *Life Safety* (2%) pada ketinggian 15 m. Sebaliknya, tsunami tanpa puing menghasilkan simpangan maksimum sebesar 1,15% (arah-x) dan 0,90% (arah-y) pada ketinggian inundasi 15 m. Nilai simpangan arah-x lebih besar karena kekakuan arah-y yang lebih tinggi. Tren peningkatan simpangan tercatat hingga ketinggian inundasi 15 m, lalu menurun pada 20 m karena distribusi gaya lateral ke seluruh struktur. Fenomena ini didukung oleh penelitian Rossetto dkk.,(2019) dan Lahcene dkk.,(2021) yang melaporkan bahwa skenario tsunami dengan ketinggian inundasi lebih dari 8 m menghasilkan deformasi yang terkonsentrasi di bagian bawah hingga tengah dengan probabilitas kerusakan yang meningkat

signifikan saat gaya lateral mencapai tinggi tengah struktur akibat fokus pada zona kritis. Kontribusi beban tsunami terhadap deformasi sangat dominan yang dapat dilihat pada gempa yang hanya menghasilkan simpangan 0,40–0,86%, tsunami dapat meningkatkannya hingga 63%. Hal ini sejalan dengan laporan Sutarja dkk.,(2021) yang mencatat kontribusi tsunami terhadap deformasi akhir mencapai 70–80%. Tsunami mulai berdampak signifikan saat ketinggian inundasi melebihi 7,5 m yang menyebabkan deformasi melampaui batas IO. Beban tambahan dari puing memperbesar dampak yang sangat signifikan. Ketinggian inundasi tsunami 12,5 m tanpa puing menghasilkan simpangan sebesar 1,03% (arah-x) dan 0,64% (arah-y) tetapi mengalami peningkatan hingga 55% menjadi 1,87% (arah-x) dan 1,43% (arah-y) dengan adanya puing. Hal ini sejalan dengan temuan Isobe & Tanaka, (2021) serta Tun dkk.,(2022) bahwa benturan puing besar seperti kendaraan dan kontainer dapat memperparah kerusakan struktur. Penelitian Macabuag dkk.,(2018) dan Mas dkk.,(2020) juga menegaskan bahwa efek benturan dan drag akibat puing merupakan faktor utama menurunkan kinerja struktur saat tsunami.

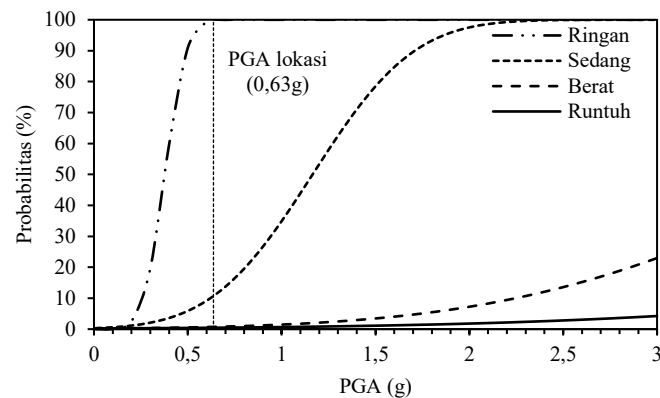
3.4. Incremental Dynamic Analysis dan Kerentanan Struktur

Analisis IDA menggunakan parameter PGA dan rasio simpangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil analisis menunjukkan karakteristik respons berbeda untuk masing-masing gempa. Gempa Chi-Chi yang berdurasi panjang dan memiliki frekuensi menengah menyebabkan deformasi signifikan pada skala tinggi dan kerusakan yang terakumulasi. Gempa Iwate menghasilkan getaran awal besar tetapi perilaku inelastik membatasi lonjakan simpangan saat intensitas meningkat. Sementara itu, gempa Tohoku dengan durasi terpanjang dan energi tinggi mempercepat kerusakan inelastik akibat pembebanan berulang setelah fase *yield* (Tjandra, 2018).

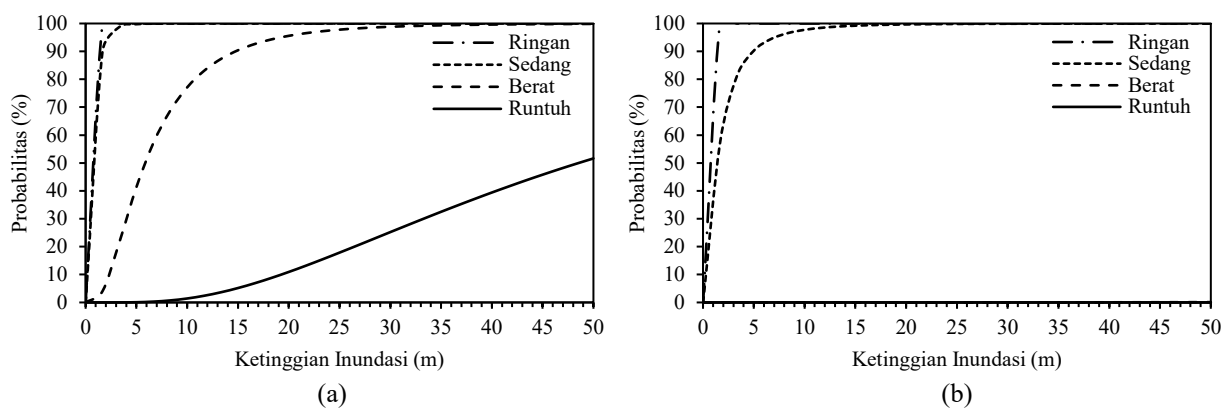


Gambar 9. Kurva *Incremental Dynamic Analysis Shelter*

Gambar 9 menunjukkan bahwa kurva terlihat linear untuk PGA rendah (0,1 hingga 0,3 g) yang dilanjutkan dengan fase *yield*. Gempa Tohoku menghasilkan simpangan terbesar karena durasi yang panjang dan frekuensi tinggi sehingga memicu struktur mengalami penurunan kekakuan dan kekuatan terhadap deformasi (Wang dkk.,2021). Analisis kerentanan struktur dilakukan dengan mengembangkan kurva IDA menjadi kurva fragilitas untuk gempa dan tsunami. Kurva fragilitas dihasilkan dari ketiga data rekaman gempa dan tsunami dari ketinggian inundasi 2,5–20 m dengan peningkatan ketinggian 2,5 m. Kurva fragilitas struktur *shelter* akibat gempa (Gambar 10) menunjukkan hasil probabilitas kerusakan struktur untuk PGA 0,63 g di Palabuhanratu. Probabilitas kerusakan yang dihasilkan pada PGA tersebut, untuk kerusakan ringan, sedang, berat, hingga runtuh berturut-turut sebesar 99,71%; 10,42%; 0,73%; dan 0,46%. Dengan demikian, struktur dinyatakan aman terhadap gempa karena hanya mengalami kerusakan ringan apabila dikenakan gempa dengan PGA 0,63 g. Sementara itu, kurva fragilitas *shelter* akibat tsunami dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Kurva Fragilitas *Shelter* Akibat Gempa



Gambar 11. Kurva Fragilitas *Shelter* Akibat Tsunami; (a) Tsunami dengan Puing, dan (b) Tsunami tanpa Puing

Kurva fragilitas tsunami dibedakan antara skenario dengan dan tanpa puing. Pada tsunami dengan puing (Gambar 11a), terjadi peningkatan signifikan terhadap kemungkinan kerusakan seiring bertambahnya tinggi gelombang. Pada ketinggian 2,5 m; probabilitas kerusakan ringan mencapai 100%; sedang 94,4%; berat 12,9%; dan keruntuhan 0%. Namun, pada ketinggian 20 m, kerusakan berat meningkat menjadi 95,6% dan runtuh mencapai 10,93%. Sebaliknya, tsunami tanpa puing (Gambar 11b) menunjukkan dampak yang jauh lebih ringan dengan probabilitas kerusakan berat hanya mencapai 0,1% dan tidak ada potensi keruntuhan bahkan hingga ketinggian inundasi 50 m. Meskipun demikian, probabilitas kerusakan ringan sudah mencapai 100% pada ketinggian inundasi 2,5 m dan kerusakan sedang memiliki probabilitas di atas 90% untuk ketinggian inundasi 5 m. Perbandingan ini menunjukkan bahwa keberadaan puing memiliki peran krusial dalam meningkatkan kerusakan struktur, sejalan dengan temuan Macabuag dkk.,(2018) dan Tun dkk.,(2022).

Perbedaan signifikan antar skenario menunjukkan bahwa *shelter* lebih rentan terhadap beban tsunami dibandingkan gempa, terlebih pada tsunami yang membawa puing berukuran besar seperti kendaraan, kayu, atau puing bangunan. Gaya hantam yang ditimbulkan puing secara signifikan meningkatkan deformasi dan potensi kegagalan struktural. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam desain *shelter* tsunami terutama di wilayah pesisir dengan potensi adanya puing yang sangat tinggi. Meskipun pendekatan probabilistik melalui kurva fragilitas ini memberikan gambaran yang baik terhadap potensi kerusakan struktur tetapi masih terdapat ruang pengembangan. Studi Mas dkk.,(2020) menunjukkan bahwa kerentanan struktur dapat sangat bervariasi antar lokasi. Misalnya, tsunami 2 m di Kota Palu memicu probabilitas 70% kerusakan yang jauh lebih tinggi dibandingkan di Kota Banda Aceh yang hanya 20% pada ketinggian tsunami yang sama. Hal ini dipengaruhi oleh bentuk struktur, arah datangnya gelombang, serta kondisi lokal seperti geometri pantai dan densitas bangunan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk menyempurnakan model fragilitas, termasuk dengan pendekatan empiris, variasi bentuk puing, arah gelombang, dan evaluasi struktur pasca-gempa agar hasilnya lebih representatif dan aplikatif untuk perencanaan *shelter* tsunami.

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa *shelter* tsunami empat lantai dengan luas 768 m² dan tinggi 21,5 m menunjukkan kinerja struktural yang baik terhadap gempa. Berdasarkan analisis non linear terhadap tiga skenario gempa (Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku), struktur berada pada level *Immediate Occupancy* pada skala 1,0 tanpa terbentuknya sendi plastis, sesuai dengan ketentuan FEMA P-646 sehingga *shelter* dapat langsung difungsikan pasca

gempa. Namun, kapasitas *shelter* yang hanya mencakup 6,48% dari estimasi populasi terdampak tsunami di Palabuhanratu membuatnya lebih berfungsi sebagai perlindungan sementara daripada solusi evakuasi massal. Beban tsunami menunjukkan dampak yang lebih signifikan terhadap deformasi struktur, terutama saat tinggi inundasi melebihi 7,5 m. Simpangan atap maksimum mencapai 2,01% dan meningkat hingga 55% jika gelombang membawa puing. Kurva fragilitas menunjukkan kerentanan struktur terhadap tsunami jauh lebih tinggi dibandingkan gempa dengan probabilitas kerusakan berat mencapai 95,6% dan runtuh 10,93% pada skenario tinggi inundasi 20 m dengan puing, sementara skenario tsunami tanpa puing menunjukkan kerusakan berat hanya 0,1%. Temuan ini menegaskan pentingnya memasukkan pengaruh puing dalam desain *shelter* tsunami. Untuk meningkatkan keandalannya, diperlukan pengembangan desain berdasarkan variasi konfigurasi struktur, pembebanan gempa-tsunami secara berurutan (*sequential loading*) serta kajian empiris lapangan guna membangun kurva fragilitas yang lebih akurat dan kontekstual terhadap risiko nyata di lapangan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas organisasi A atas dukungan finansialnya pada penelitian ini dan organisasi B atau dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada ahli C atas diskusinya yang bermanfaat.

Daftar Notasi

- T = tinggi *shelter* dari tanah [m]
 F = *freeboard* [m]
 T_i = tinggi inundasi gelombang tsunami [m]
 v = koefisien varians batas kerusakan (*damage state*)
 σ = simpangan baku batas kerusakan (*damage state*)
 μ = rata-rata (*mean*) batas kerusakan (*damage state*)
 Φ = fungsi distribusi normal standar
 P = probabilitas kerusakan [%]
 x = parameter intensitas; PGA dan ketinggian inundasi
 θ = median intensitas
 β = nilai ketidakpastian (*uncertainty*)

Daftar Pustaka

- Anggraini, A., & Mardhatillah, E. (2020). Perubahan stress statis gempa utama dan asosiasi distribusi gempa susulan: Studi kasus gempa Palu Mw 7,5 28 September 2018. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(1), 38–42.
- Ashar, F., Amaratunga, D., & Haigh, R. (2014). The analysis of tsunami vertical shelter in Padang City. *Procedia Economics and Finance*, 18, 916–923. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)01018-1](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)01018-1)
- BNPB. (2022). IRBI (Indeks Risiko Bencana Indonesia) (Vol. 1, Issue 1). Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- BNPB. (2023). RBI: Risiko Bencana Indonesia “Memahami Risiko Sistemik di Indonesia.” In BNPB. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- BSN. (2020). Tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa. In Badan Standarisasi Nasional 8899:2020. Badan Standardisasi Nasional.
- FEMA. (2019). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation From Tsunamis 3rd Edition (Issue August). Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2022). Hazus Earthquake Model Technical Manual (Hazus 5.1). In The Hazus Loss Estimation Methodology (Issue July). Federal Emergency Management Agency.
- Indira, I., & Manessa, M. D. M. (2023). Generating Evacuation Route for Tsunami Evacuation Based on Megathrust Scenario Hazard Model in Palabuhanratu Village, Sukabumi, West Java. *International Journal of Disaster Management*, 6(1), 35–48. <https://doi.org/10.24815/ijdm.v6i1.31148>
- Isobe, D., & Tanaka, S. (2021). Sequential simulations of steel frame buildings under multi-phase hazardous loads during earthquake and tsunami. *Frontiers in Built Environment*, 7(May), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.669601>
- Kaplan, O., Guney, Y., & Dogangun, A. (2021). A period-height relationship for newly constructed mid-rise reinforced concrete buildings in Turkey. *Engineering Structures*, 232(January), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111807>
- Kurniawandy, A., Aminsyah, M., Cahyadi, B. U., & Djauhari, Z. (2023). Comparative study of the simulation ground motion by amplitude scale and spectral matching. *E3S Web of Conferences*, 464, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346402007>
- Lahcene, E., Ioannou, I., Suppasri, A., Pakoksung, K., Paulik, R., Syamsidik, S., Bouchette, F., & Imamura, F. (2021). Characteristics of building fragility curves for seismic and non-seismic tsunamis: Case studies of the 2018

- Sunda Strait, 2018 Sulawesi-Palu, and 2004 Indian Ocean tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(8), 2313–2344. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2313-2021>
- Macabuag, J., Rossetto, T., Ioannou, I., & Eames, I. (2018). Investigation of the effect of debris-induced damage for constructing tsunami fragility curves for buildings. *Geosciences (Switzerland)*, 8(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040117>
- Manfredi, V., Masi, A., Özcebe, A. G., Paolucci, R., & Smerzini, C. (2022). Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 4961–4987. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>
- Mas, E., Paulik, R., Pakoksung, K., Adriano, B., Moya, L., Suppasri, A., Muhari, A., Khomarudin, R., Yokoya, N., Matsuoka, M., & Koshimura, S. (2020). Characteristics of tsunami fragility functions developed using different sources of damage data from the 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 177(6), 2437–2455. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02501-4>
- Mentari, S. (2020). Respon struktur gedung bertingkat banyak dengan layout persegi panjang menggunakan dinding geser di perimeter bagian luar dan bagian dalam. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(2), 157–171. <https://doi.org/10.28932/jts.v16i2.2772>
- Mutaqin, B. W., Amri, I., & Aditya, B. (2020). Pola kejadian tsunami dan perkembangan manajemen bencana di Indonesia setelah Tsunami Samudra Hindia Tahun 2004: Sebuah tinjauan. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 11(2), 73–85.
- Pradana, A. B., Saputra, R. P., Indarto, H., & Nurhuda, I. (2015). Desain struktur Tempat Evakuasi Sementara tsunami Di Bengkulu. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 4(4), 69–84.
- Rahman, F., Idris, Y., Abdullah, A., & Asyifa, C. N. (2022). Pengembangan kurva kerapuhan berbasis Incremental Dynamic Analysis pada bangunan tipikal Puskesmas di Kota Banda Aceh terhadap bahaya gempa. *Journal of The Civil Engineering Student*, 4(3), 246–252. <https://doi.org/10.24815/journalces.v4i3.21275>
- Rossetto, T., De la Barra, C., Petrone, C., De la Llera, J. C., Vásquez, J., & Baiguera, M. (2019). Comparative assessment of nonlinear static and dynamic methods for analysing building response under sequential earthquake and tsunami. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(8), 867–887. <https://doi.org/10.1002/eqe.3167>
- Schwarz, G. M., Yang, K. P., Chou, C., & Chiu, Y. J. (2020). A classification of structural inertia: Variations in structural response. *Asia Pacific Journal of Management*, 37(1), 33–63. <https://doi.org/10.1007/s10490-018-9588-6>
- Suarbawa, K. N., Sukarasa, I. K., & Riyono, E. (2021). Identifikasi deformasi Pulau Bali berdasarkan rekaman data GPS, menggunakan software GAMIT/GLOBK 10.6. *Buletin Fisika Vol*, 22(1), 47–52.
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Yatimantoro, T., Muhari, A., Hanifa, N. R., Gunawan, E., Shiddiqi, H. A., Imran, I., Anugrah, S. D., Daryono, D., Prayitno, B. S., Adi, S. P., Karnawati, D., Faizal, L., & Damani, R. (2023). On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia. *Natural Hazards*, 116(1), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05696-y>
- Sutarja, N., Pringgana, G., & Wikrama, M. A. S. (2021). The effects of earthquake and tsunami loadings on structural behavior of reinforced concrete building. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 282–291. <https://doi.org/10.5937/jaes0-25655>
- Suwondo, R., Mangindaan, D., Cunningham, L., & Alama, S. (2021). Non-linear analysis of seismic performance of low-rise concrete buildings in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012024>
- Tjandra, K. (2018). Empat bencana geologi yang Paling Mematikan. UGM Press.
- Tun, Z. Z., Ruangrassamee, A., & Hussain, Q. (2022). Mitigation of Tsunami Debris Impact on Reinforced Concrete Buildings by Fender Structures. *Buildings*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings12010066>
- Utami, S. U., Muntasib, E. H., & Samosir, D. A. M. (2019). Manajemen bahaya di kawasan wisata pantai Karang Hawu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. *Media Konservasi*, 24(3), 322–333.
- Vandecruys, E., Hendriks, M. A. N., Velde, M. van de, Lombaert, G., & Verstrynge, E. (2024). Dynamic stiffness parameter assessment of cracked reinforced concrete beams: A numerical and experimental study. *Engineering Structures*, 318, 118758.
- Wang, S. Y., Zhuang, H. Y., Zhang, H., He, H. J., Jiang, W. P., Yao, E. L., Ruan, B., Wu, Y. X., & Miao, Y. (2021). Near-surface softening and healing in eastern Honshu associated with the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki Earthquake. *Nature Communications*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21418-7>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>