MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i5.11951

Evaluasi Kinerja Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang terhadap Beban Tsunami

Evaluation of the Performance of the Integrated Laboratory Building of the Faculty of Engineering at Universitas Negeri Padang under Tsunami Loads

Nurcholis Satrio Sidiq & Annisa Prita Melinda
Universitas Negeri Padang
nurcholis.satrio30@gmail.com; annisaprita@ft.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Jul 15, 2026	Aug 12, 2026	Aug 24, 2026	Aug 29, 2026

Abstract

The use of existing buildings as tsunami Temporary Evacuation Sites (TESs) requires structural evaluation that integrates seismic response, tsunami load demands, and structural element capacities. This study aimed to evaluate the structural performance of the Integrated Laboratory Building of the Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, under tsunami loads by considering seismic response and the capacities of existing elements. The study employed a quantitative approach with an evaluative design based on numerical modeling using CSI ETABS 18. Research data were obtained from as-built drawings, material specifications, soil data, and tsunami inundation information. The structural analysis referred to SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, ASCE/SEI 7-16, and FEMA P-646. The analysis results showed that the Y-direction seismic displacement on the third floor reached 50.105 mm, exceeding the allowable limit of 46.154 mm. The design inundation depth of 7.3 m generated a maximum debris impact force of 1,194.375 kN. The element capacity evaluation showed that several lower-floor columns exceeded the axial force–moment (P–M) interaction curves, the K1a column on the first floor had a shear demand-to-capacity

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

ratio of 1.52, and several beams lacked adequate flexural capacity. These findings indicate that the building does not yet fully satisfy the structural criteria for use as a tsunami TES. Therefore, critical structural elements need to be strengthened before the building is used as a vertical evacuation facility. These results provide a technical basis for prioritizing structural strengthening and making decisions regarding the feasibility of using the existing building as a tsunami TES.

Keywords: Tsunami Loads; Structural Evaluation; Seismic Response; Temporary Evacuation Site; ETABS

Abstrak: Pemanfaatan bangunan eksisting sebagai Tempat Evakuasi Sementara (TES) tsunami memerlukan evaluasi struktur yang mengintegrasikan respons seismik, tuntutan beban tsunami, dan kapasitas elemen struktural. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja struktur Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang terhadap beban tsunami dengan mempertimbangkan respons seismik dan kapasitas elemen eksisting. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain evaluatif berbasis pemodelan numerik menggunakan CSI ETABS 18. Data penelitian diperoleh dari *as-built drawing*, spesifikasi material, data tanah, dan informasi inundasi tsunami. Analisis struktur mengacu pada SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, ASCE/SEI 7-16, dan FEMA P-646. Hasil analisis menunjukkan bahwa simpangan gempa arah Y pada lantai 3 mencapai 50,105 mm dan melampaui batas yang diizinkan sebesar 46,154 mm. Kedalaman genangan desain sebesar 7,3 m menghasilkan gaya tumbukan puing maksimum 1.194,375 kN. Evaluasi kapasitas elemen menunjukkan bahwa beberapa kolom lantai bawah melampaui kurva interaksi aksial–momen (P–M), kolom K1a pada lantai 1 memiliki rasio permintaan terhadap kapasitas geser sebesar 1,52, dan beberapa balok tidak memiliki kapasitas lentur yang memadai. Temuan ini menunjukkan bahwa gedung belum sepenuhnya memenuhi kriteria struktural untuk difungsikan sebagai TES tsunami. Oleh karena itu, penguatan pada elemen-elemen kritis diperlukan sebelum gedung digunakan sebagai fasilitas evakuasi vertikal. Hasil penelitian ini memberikan dasar teknis bagi penentuan prioritas penguatan struktur dan pengambilan keputusan mengenai kelayakan pemanfaatan bangunan eksisting sebagai TES tsunami.

Kata Kunci: Beban Tsunami; Evaluasi Struktur; Respons Seismik; Tempat Evakuasi Sementara; ETABS

PENDAHULUAN

Kota Padang merupakan salah satu wilayah pesisir di Indonesia yang memiliki tingkat keterpaparan tinggi terhadap bahaya gempa bumi dan tsunami karena berada di sisi barat Pulau Sumatra dan berhadapan langsung dengan zona subduksi Sunda. Interaksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia membentuk sistem tektonik aktif dengan sumber gempa besar, termasuk segmen Megathrust Mentawai yang terletak di sebelah barat Sumatra (P. S. G. Nasional, 2017). Kajian geofisika terkini juga menunjukkan bahwa struktur deformasi di kawasan Mentawai masih menyimpan potensi terjadinya gempa *tsunamigenic*, sehingga ancaman tsunami tetap relevan dalam perencanaan keselamatan

kawasan pesisir Sumatra Barat (Qin et al., 2024). Pengalaman gempa berkekuatan M 7,6 pada 30 September 2009 memperlihatkan besarnya dampak guncangan terhadap bangunan dan infrastruktur di Sumatra Barat, khususnya Kota Padang (Bencana, 2009). Gempa tersebut memang tidak membangkitkan tsunami merusak, yang menegaskan bahwa tidak setiap gempa besar secara langsung menghasilkan tsunami (Mustafa, 2010). Kondisi tektonik wilayah, karakter sumber gempa, dan kedekatan kawasan perkotaan dengan pantai tetap menjadikan skenario gempa yang diikuti tsunami sebagai ancaman yang perlu diperhitungkan dalam upaya mitigasi struktural.

Kerentanan tersebut menjadi semakin penting ketika dikaitkan dengan karakter wilayah Kecamatan Padang Utara yang didominasi dataran relatif rendah dan memiliki konsentrasi penduduk serta aktivitas pendidikan yang tinggi. Kepadatan penduduk di Kecamatan Padang Utara mencapai sekitar 5.300 jiwa per kilometer persegi, sehingga proses pemindahan masyarakat menuju zona aman berpotensi melibatkan jumlah orang yang besar dalam waktu yang terbatas (Padang, 2023). Kondisi jaringan jalan, jarak menuju daerah dengan elevasi lebih tinggi, kepadatan pergerakan, dan ketidakpastian karakter inundasi dapat membatasi efektivitas evakuasi horizontal. Muhammad et al. (2017) menunjukkan bahwa perencanaan evakuasi tsunami di Padang perlu mempertimbangkan ketidakpastian skenario gempa Megathrust Mentawai karena pola genangan dan zona aman dapat berubah menurut karakter sumber gempa. Analisis yang lebih lanjut juga memperlihatkan bahwa pendekatan evakuasi yang terlalu sederhana berpotensi meremehkan waktu yang diperlukan masyarakat untuk mencapai lokasi aman, terutama ketika kondisi jaringan transportasi dan interaksi antarpengungsi diperhitungkan secara lebih realistis (Muhammad et al., 2021). Situasi tersebut memperkuat kebutuhan terhadap alternatif evakuasi vertikal yang dapat dijangkau dengan cepat oleh masyarakat yang berada di kawasan pesisir.

Kebutuhan terhadap tempat evakuasi vertikal tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan bangunan bertingkat, tetapi juga dengan kemampuan bangunan tersebut untuk mempertahankan keselamatan penghuninya ketika menerima tuntutan bencana yang ekstrem. Tsunami dipahami sebagai rangkaian gelombang laut dengan periode panjang yang dapat ditimbulkan oleh gangguan besar pada kolom air, terutama akibat gempa bawah laut, dan mampu menghasilkan arus serta genangan dengan daya rusak tinggi ketika mencapai daratan (Agency, 2019). FEMA P-646 menempatkan struktur evakuasi vertikal sebagai salah satu alternatif perlindungan bagi masyarakat ketika proses evakuasi ke daerah tinggi tidak dapat diselesaikan sebelum gelombang tiba. Pedoman tersebut juga menekankan bahwa

penggunaan bangunan eksisting sebagai tempat perlindungan memerlukan pemeriksaan kelayakan struktural, elevasi tempat berlindung, aksesibilitas, dan kapasitas bangunan (Engineers, 2017b). Pengalaman di wilayah rawan tsunami Indonesia menunjukkan bahwa bangunan publik dan bangunan bertingkat yang telah tersedia dapat menjadi pilihan tempat evakuasi apabila kelayakannya dibuktikan melalui penilaian teknis yang memadai (Jihad et al., 2023). Keberadaan bangunan semacam itu menjadi penting karena fasilitas evakuasi bukan sekadar ruang untuk berkumpul, melainkan bagian dari sistem perlindungan jiwa yang harus tetap memiliki kemampuan struktural ketika dibutuhkan.

Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang merupakan salah satu bangunan bertingkat yang memiliki posisi strategis untuk mendukung mitigasi tsunami di kawasan kampus dan lingkungan sekitarnya. Bangunan dengan sistem struktur beton bertulang yang diproyeksikan sebagai Tempat Evakuasi Sementara (TES) perlu memiliki kapasitas untuk menahan tuntutan beban yang berbeda dari fungsi gedung pada kondisi pelayanan normal. Respons struktur terhadap gempa terlebih dahulu perlu memenuhi ketentuan ketahanan seismik sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019, sedangkan kapasitas elemen beton bertulang harus diperiksa berdasarkan persyaratan SNI 2847:2019 (B. S. Nasional, 2019b, 2019a, 2020). Evaluasi terhadap bangunan eksisting juga membutuhkan perhatian terhadap respons dan tingkat penerimaan struktur sesuai prinsip evaluasi kinerja bangunan yang dijelaskan dalam ASCE/SEI 41-17 (Engineers, 2017b, 2017a). Tuntutan tsunami selanjutnya dapat dianalisis menggunakan ketentuan *tsunami loads and effects* dalam ASCE/SEI 7-16 serta pedoman khusus struktur evakuasi vertikal FEMA P-646 (Engineers, 2017a). Kerangka tersebut menunjukkan bahwa kelayakan sebuah gedung sebagai TES tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan jumlah lantai atau ketinggian bangunan, tetapi perlu dibuktikan melalui kemampuan sistem struktur dalam menerima tuntutan pembebanan yang relevan dengan kondisi bencana.

Kajian mengenai kinerja struktur gedung terhadap gempa telah dilakukan pada berbagai objek bangunan, tetapi sebagian besar masih menempatkan gempa sebagai bahaya tunggal. Syahputra et al. (2021) mengevaluasi kinerja struktur Gedung Jamaliyah Yayasan Syafiatul Amaliyah Medan berdasarkan SNI 1726:2019 dan menunjukkan pentingnya pemeriksaan respons struktur terhadap ketentuan seismik terbaru. Setiawan (2021) mengkaji kinerja struktur gedung pada kondisi batas layan dan batas ultimit menggunakan analisis dinamik metode respons spektrum, sehingga memberikan gambaran mengenai perilaku struktur ketika menerima tuntutan gempa. Ariq dan Mawada (2023) juga melakukan analisis

kinerja struktur pada Gedung IGD Terpadu K.R.M.T. Wongsonegoro dengan perhatian utama pada kemampuan struktur menghadapi pembebanan yang direncanakan. Ketiga penelitian tersebut memberikan dasar penting bagi evaluasi bangunan eksisting terhadap gempa, tetapi belum diarahkan pada bangunan yang memiliki fungsi tambahan sebagai tempat evakuasi tsunami. Konsekuensinya, respons struktur terhadap tuntutan fluida tsunami setelah terjadinya peristiwa seismik belum menjadi bagian utama dari kerangka evaluasi yang digunakan.

Kajian yang secara khusus membahas pengaruh tsunami terhadap struktur bangunan telah berkembang, tetapi ruang lingkup dan objek analisisnya masih menunjukkan peluang penelitian lebih lanjut. Siregar (2017) menganalisis pengaruh beban tsunami pada Gedung Pasar Raya Inpres Blok III Kota Padang berdasarkan FEMA P-646, sedangkan Restu et al. (2021) mengevaluasi struktur Gedung Pasar Inpres Blok IV terhadap pembebanan tsunami. Rifa & Juliafad (2024) memperluas kajian tersebut pada bangunan shelter tsunami di lingkungan Universitas Negeri Padang dan memperlihatkan pentingnya pemeriksaan elemen struktur bangunan yang direncanakan sebagai tempat perlindungan. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa bangunan eksisting dapat mengalami tuntutan yang signifikan ketika menerima beban tsunami dan karena itu membutuhkan evaluasi kapasitas yang lebih cermat. Jihad et al. (2023) juga menunjukkan bahwa pemanfaatan gedung eksisting sebagai lokasi evakuasi vertikal perlu didasarkan pada pemodelan bahaya dan pemeriksaan kondisi bangunan, bukan sekadar pertimbangan kedekatan dengan masyarakat. Kumpulan studi tersebut masih menyisakan ruang kajian berupa evaluasi yang menempatkan respons gempa dan beban tsunami dalam satu kerangka pemeriksaan terhadap sistem struktur bangunan eksisting yang secara khusus diproyeksikan sebagai TES.

Celah penelitian tersebut menjadi dasar bagi perlunya pendekatan *multi-hazard* pada Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi bangunan eksisting yang mengintegrasikan tuntutan seismik dan tuntutan tsunami pada satu model struktur untuk menilai kelayakan teknisnya sebagai fasilitas evakuasi vertikal. Beban gempa dianalisis dengan mengacu pada SNI 1726:2019, sedangkan kapasitas elemen beton bertulang diperiksa berdasarkan SNI 2847:2019 (B. S. Nasional, 2019b, 2019a). Beban tsunami ditentukan dengan menggunakan ketentuan ASCE/SEI 7-16 dan pedoman FEMA P-646, sehingga karakter gaya akibat aliran tsunami dapat diterjemahkan menjadi tuntutan terhadap elemen dan sistem struktur (Agency, 2019). Prinsip evaluasi bangunan eksisting dalam ASCE/SEI 41-17 digunakan untuk

memperkuat kerangka penilaian kinerja struktur terhadap tuntutan seismik (Engineers, 2017b). Integrasi beberapa acuan tersebut memungkinkan evaluasi dilakukan secara lebih sesuai dengan fungsi khusus bangunan sebagai tempat perlindungan pada situasi darurat.

Kerangka evaluasi kinerja pada penelitian ini diarahkan tidak hanya untuk mengetahui besarnya gaya yang bekerja, tetapi juga untuk membandingkan tuntutan pembebanan dengan kapasitas elemen struktur yang tersedia. Pemeriksaan terhadap balok, kolom, dan elemen penahan gaya lainnya diperlukan untuk mengidentifikasi bagian struktur yang masih memenuhi persyaratan maupun bagian yang berpotensi mengalami kondisi kritis ketika menerima kombinasi pembebanan ekstrem. Pendekatan ini menjadi penting karena kerusakan lokal pada elemen tertentu dapat memengaruhi kemampuan sistem struktur mempertahankan jalur penyaluran gaya dan fungsi keselamatannya. ASCE/SEI 41-17 menempatkan evaluasi bangunan eksisting sebagai proses untuk menghubungkan tuntutan gempa dengan kapasitas dan kriteria penerimaan struktur, sedangkan SNI 2847:2019 memberikan dasar pemeriksaan kapasitas elemen beton bertulang (Engineers, 2017a). Pemanfaatan hasil analisis dalam bentuk rasio kebutuhan terhadap kapasitas memberikan indikator teknis yang lebih terukur untuk menilai apakah struktur masih memiliki kapasitas yang memadai. Informasi tersebut juga dapat menjadi dasar untuk menentukan kebutuhan penguatan apabila terdapat elemen yang tidak memenuhi kriteria penerimaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang terhadap beban tsunami dengan mempertimbangkan tuntutan seismik dan kapasitas struktur eksisting, serta menilai kelayakan teknis gedung tersebut untuk mendukung fungsi sebagai Tempat Evakuasi Sementara. Evaluasi dilakukan melalui pemodelan struktur, analisis respons terhadap beban gempa berdasarkan SNI 1726:2019, penentuan beban tsunami mengacu pada ASCE/SEI 7-16 dan FEMA P-646, serta pemeriksaan kapasitas elemen beton bertulang sesuai SNI 2847:2019. Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran mengenai respons struktur, elemen-elemen yang berada pada kondisi kritis, dan tingkat kecukupan kapasitas gedung ketika menerima skenario pembebanan yang dianalisis. Temuan tersebut diharapkan tidak hanya memberikan dasar teknis bagi pengelolaan Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, tetapi juga menjadi masukan bagi evaluasi bangunan bertingkat lain yang berpotensi dimanfaatkan sebagai fasilitas evakuasi vertikal di kawasan rawan tsunami.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain evaluatif berbasis pemodelan numerik untuk menilai kinerja struktur eksisting Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang terhadap kombinasi beban gempa dan tsunami. Pemodelan dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) melalui perangkat lunak CSI ETABS versi 18. Objek penelitian dibatasi pada struktur atas bangunan yang meliputi kolom, balok, dan pelat lantai beton bertulang sebagai bagian dari Sistem Penahan Gaya Seismik (SPGS), sedangkan elemen nonstruktural seperti dinding pengisi dan partisi arsitektural tidak dimasukkan ke dalam model. Kondisi dasar struktur diasumsikan sebagai perletakan jepit sempurna (*fixed base*). Penelitian ini tidak melibatkan partisipan manusia sehingga teknik sampling dalam pengertian survei tidak diterapkan. Pemilihan gedung dilakukan secara purposif karena bangunan tersebut diproyeksikan sebagai Tempat Evakuasi Sementara (TES) dan berada pada kawasan yang memiliki potensi paparan tsunami. Evaluasi struktur mengacu pada SNI 1726:2019 untuk ketahanan gempa, SNI 2847:2019 untuk kapasitas elemen beton bertulang, ASCE/SEI 7-16 untuk pembebanan termasuk pengaruh tsunami, serta FEMA P-646 sebagai pedoman desain dan evaluasi struktur evakuasi vertikal tsunami (Engineers, 2017a; B. S. Nasional, 2019a, 2019b, 2020).

Data penelitian seluruhnya berupa data sekunder yang diperoleh melalui studi dokumentasi. Data yang digunakan mencakup gambar terbangun (*as-built drawing*), geometri dan dimensi penampang, detail penulangan, mutu beton dan baja, data penyelidikan tanah, serta informasi kedalaman genangan tsunami di kawasan Padang Utara. Informasi tersebut digunakan untuk membangun model tiga dimensi struktur eksisting dalam ETABS, sementara Microsoft Excel digunakan untuk membantu perhitungan parameter pembebanan tsunami sebelum diaplikasikan ke model. Faktor pengetahuan (*knowledge factor*) sebesar 0,75 diterapkan pada pemodelan untuk mengakomodasi tingkat kepastian data kondisi eksisting. Model yang telah dibentuk terlebih dahulu diberi beban gravitasi dan beban gempa dinamik menggunakan analisis respons spektrum. Ketepatan model kemudian diperiksa dengan membandingkan reaksi vertikal pada perletakan dasar hasil ETABS dengan hasil perhitungan manual menggunakan pendekatan *tributary area*. Model yang telah memenuhi kontrol tersebut selanjutnya diberikan skenario pembebanan tsunami yang mencakup beban hidup pengungsi, gaya hidrostatik, gaya apung, gaya hidrodinamik, gaya impulsif, gaya tumbukan dan tahanan puing, serta tambahan beban gravitasi akibat genangan air sesuai karakteristik pembebanan yang dianalisis.

Analisis data dilakukan secara bertahap untuk memperoleh gambaran kinerja struktur sebelum dan setelah penerapan pembebanan ekstrem. Tahap pertama mencakup evaluasi respons dinamik gempa melalui kontrol partisipasi massa ragam minimum 90%, pemeriksaan gaya geser dasar, serta simpangan antar lantai sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Tahap berikutnya dilakukan dengan menjalankan kembali model menggunakan kombinasi pembebanan yang memasukkan pengaruh tsunami untuk memperoleh gaya dalam dan respons struktur. Hasil analisis kemudian dievaluasi melalui nilai *story drift* dan rasio kebutuhan terhadap kapasitas (*Demand/Capacity ratio* atau D/C) pada elemen balok dan kolom. Elemen dengan nilai $D/C \leq 1$ dikategorikan masih memiliki kapasitas yang memadai terhadap tuntutan pembebanan yang dianalisis, sedangkan nilai $D/C > 1$ menunjukkan elemen mengalami kondisi *overstressed* dan memerlukan perhatian lebih lanjut. Keseluruhan hasil tersebut digunakan sebagai dasar untuk menilai tingkat kelayakan Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dalam mendukung fungsi sebagai Tempat Evakuasi Sementara serta mengidentifikasi kebutuhan penguatan struktur apabila ditemukan elemen yang tidak memenuhi kriteria kapasitas.

HASIL

Hasil penelitian disajikan berdasarkan kondisi paparan tsunami pada lokasi bangunan, karakteristik struktur, respons dinamik terhadap gempa, hasil validasi model, besaran pembebanan tsunami, kapasitas elemen struktur, serta simpangan bangunan pada kombinasi pembebanan yang dianalisis. Pemodelan tiga dimensi Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dilakukan menggunakan ETABS berdasarkan geometri, dimensi penampang, mutu material, dan detail elemen pada *as-built drawing*. Hasil analisis menunjukkan beberapa parameter memenuhi kriteria yang digunakan, sedangkan sejumlah elemen dan tingkat bangunan menunjukkan kondisi NOT OK pada pemeriksaan tertentu.

1. Kondisi Lokasi dan Karakteristik Struktur

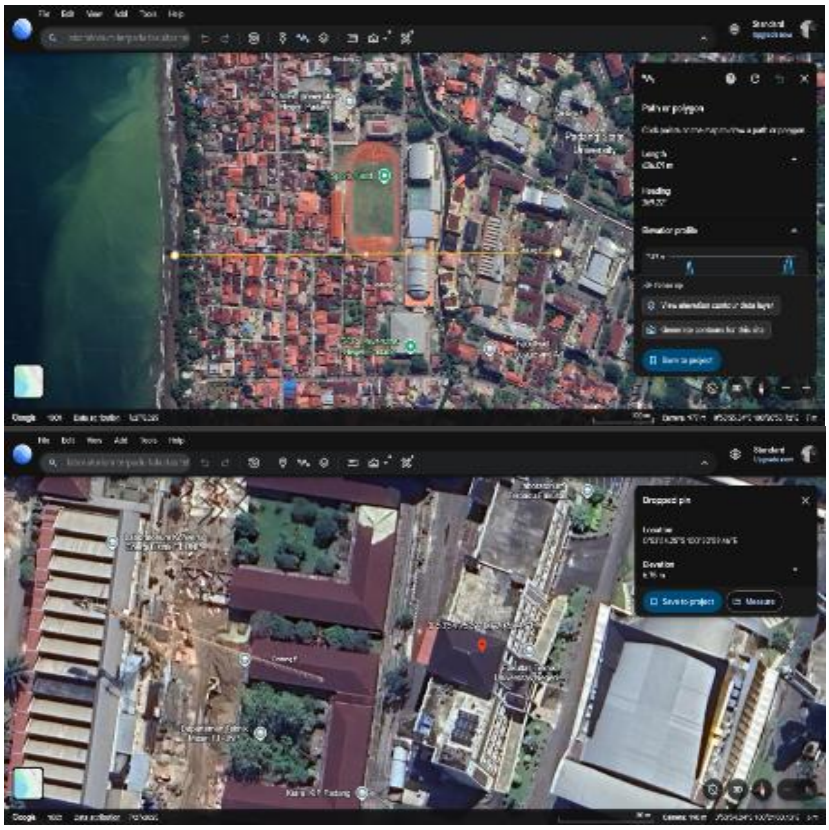
Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang berada sekitar ±270 m dari garis pantai dan memiliki elevasi dasar sekitar ±7 m di atas permukaan laut. Peta bahaya tsunami yang digunakan dalam penelitian menunjukkan kedalaman inundasi pada lokasi bangunan berkisar 4–6 m. Struktur bangunan terdiri atas lima lantai termasuk struktur rooftop dan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Mutu beton kolom, balok, dan pelat sebesar ($f'c$=24,9) MPa, sedangkan mutu leleh baja

tulangan berkisar antara 240–400 MPa sesuai jenis dan diameter tulangan. Karakteristik utama bangunan dan lokasi penelitian dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik lokasi dan struktur Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP

Parameter	Hasil
Jarak gedung dari garis pantai	±270 m
Elevasi dasar bangunan	±7 m dpl
Prediksi kedalaman inundasi	4–6 m
Sistem struktur	SRPMK beton bertulang
Jumlah lantai	5 lantai termasuk rooftop
Tinggi lantai 1–4	4 m per lantai
Mutu beton kolom	24,9 Mpa
Mutu beton balok	24,9 Mpa
Mutu beton pelat	24,9 Mpa
fyfy baja polos D ≤ 10	240 Mpa
fyfy baja ulir D ≤ 10	320 MPa
fyfy baja ulir D > 10	400 MPa
Fungsi eksisting	Fasilitas pendidikan
Fungsi yang dievaluasi	Tempat Evakuasi Sementara

Tabel 1 menunjukkan parameter fisik dan struktural yang digunakan sebagai dasar pembentukan model numerik. Posisi bangunan, elevasi dasar, dan nilai inundasi selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter pembebanan tsunami.





Gambar 1. Lokasi, jarak dari pantai, elevasi, dan prediksi inundasi Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP

Gambar 1 memperlihatkan posisi Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP terhadap garis pantai, elevasi lokasi bangunan, dan zona kedalaman inundasi yang digunakan sebagai dasar perhitungan beban tsunami.

2. Parameter Seismik dan Respons Dinamik Struktur

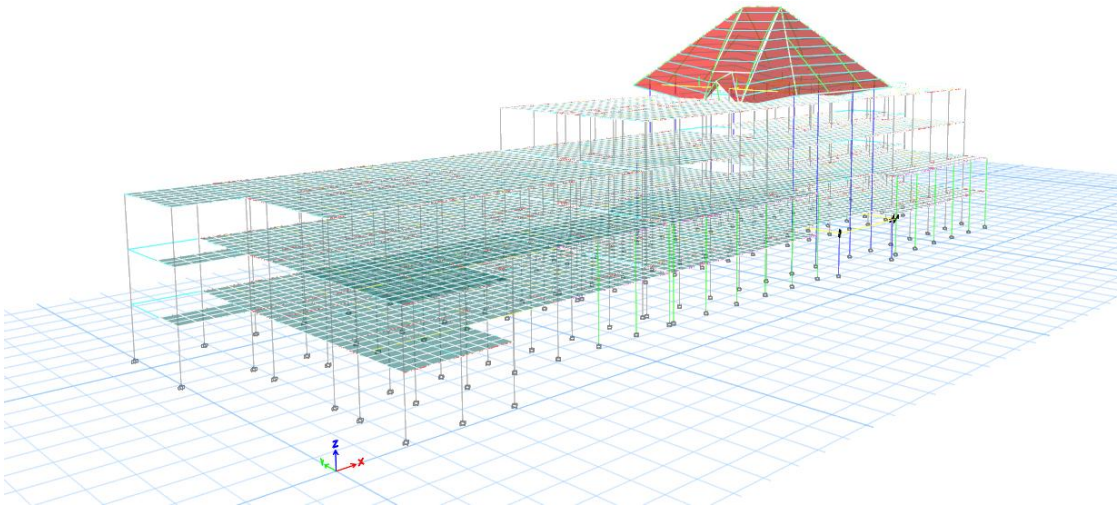
Analisis respons spektrum menggunakan koordinat bangunan pada bujur 100,350175° dan lintang −0,898014° dengan klasifikasi situs SC. Parameter respons spektrum yang diperoleh meliputi (Ss=1,445898g), (S1=0,600000g), (SDS=1,156718g), dan (SD1=0,560000g). Bangunan dikategorikan sebagai kategori risiko IV dengan faktor keutamaan gempa (Ie=1,50). Sistem SRPMK menggunakan faktor modifikasi respons (R=8), sedangkan kategori desain seismik yang diperoleh adalah kategori D.

Tabel 2. Parameter utama analisis seismik struktur

Parameter	Nilai
Kelas situs	SC
PGA	0,580452 g
SsSs	1,445898 g
S1S1	0,600000 g
SDSS{DS}	1,156718 g
SD1S{D1}	0,560000 g
T0T0	0,096826 detik
TsTs	0,484128 detik
Faktor keutamaan, IeIe	1,50
Faktor modifikasi respons, RR	8
Faktor redundansi, ϱ\rho	1,30
Kategori desain seismik	D

Analisis modal menghasilkan periode 1,268 detik pada Mode 1, 1,223 detik pada Mode 2, dan 1,074 detik pada Mode 3. Pada Mode 1, komponen rotasi (RZ) tercatat sebesar 0,3076; Mode 2 memiliki partisipasi (UY=0,2112); sedangkan Mode 3 memiliki partisipasi (UX=0,3323). Akumulasi partisipasi massa dinamik mencapai 90,81% pada arah X dan

90,31% pada arah Y. Nilai tersebut telah mencapai persyaratan minimum 90% yang digunakan dalam analisis. Gaya geser dinamik awal dari ETABS sebesar 3.998,0183 kN pada arah X dan 4.178,9434 kN pada arah Y. Setelah kontrol gaya geser dasar dilakukan, faktor skala respons spektrum yang digunakan menjadi 3.160,07 mm/s² untuk arah X dan 2.797,15 mm/s² untuk arah Y.



Gambar 2. Model tiga dimensi struktur Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP pada ETABS

Gambar 2 memperlihatkan model struktur tiga dimensi yang digunakan untuk memperoleh respons bangunan terhadap kombinasi pembebanan yang dianalisis.

3. Simpangan Struktur akibat Beban Gempa

Hasil analisis gempa menunjukkan simpangan inelastis maksimum yang diizinkan dalam evaluasi sebesar 46,154 mm. Nilai simpangan arah X pada seluruh tingkat berada di bawah batas tersebut. Kondisi berbeda ditemukan pada arah Y, yaitu simpangan Lantai 3 sebesar 50,105 mm, sedangkan batas yang digunakan sebesar 46,154 mm. Hasil lengkap disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Simpangan antar tingkat akibat beban gempa

Tingkat	Simpangan X (mm)	Simpangan Y (mm)	Batas (mm)	Hasil
Lantai 4	28,739	45,093	46,154	OK
Lantai 3	36,579	50,105	46,154	NOT OK arah Y
Lantai 2	32,780	43,835	46,154	OK
Lantai 1	11,418	18,128	46,154	OK

Tabel 3 menunjukkan bahwa hanya satu hasil pemeriksaan simpangan gempa yang melampaui batas, yaitu arah Y pada Lantai 3. Nilai 50,105 mm lebih besar 3,951 mm daripada batas 46,154 mm. Temuan ini dilaporkan sebagai data yang tidak mengikuti pola tingkat

lainnya, karena seluruh nilai arah X dan tiga tingkat lainnya pada arah Y masih berada dalam batas evaluasi.

Kontrol efek P–Delta menghasilkan koefisien stabilitas pada seluruh lantai yang berada di bawah batas yang digunakan. Nilai terbesar terjadi pada Lantai 2 arah Y sebesar 0,0309, sedangkan nilai batas pengaruh P–Delta adalah 0,10. Hasil pemeriksaan seluruh tingkat pada arah X dan Y dengan demikian berstatus **OK** untuk parameter P–Delta.

4. Validasi Model Struktur

Validasi model dilakukan pada kolom interior K1A dengan membandingkan reaksi vertikal akibat *dead load* dari ETABS dengan perhitungan manual menggunakan *tributary area*. Reaksi vertikal ETABS sebesar 558,133 kN, sedangkan perhitungan manual menghasilkan 555,84 kN. Persentase selisih dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Persentase } \textit{Error} = \left[{(Reaksi_{ETABS} - Reaksi_{Manual})} \Big/ {Reaksi_{Manual}} \right] \times 100\%$$

$$= \left[{(558.133 - 555.84)} \Big/ {555.84} \right] \times 100\%$$

$$= \mathbf{0.41\%}$$

Perbandingan tersebut menghasilkan selisih sebesar 0,41%. Nilai ini berada di bawah toleransi 5% yang digunakan dalam penelitian sehingga model dilanjutkan pada analisis pembebanan tsunami.

5. Parameter dan Besaran Beban Tsunami

Perhitungan tsunami menggunakan elevasi dasar bangunan sebesar 7 m dan kedalaman inundasi sebesar 4 m untuk menentukan elevasi maksimum *run-up*. Elevasi maksimum *run-up* sebelum faktor keamanan diperoleh sebesar 11 m sebagaimana Persamaan (2).

$$R^* = z_w + h_i$$

$$= 7 \text{ m} + 4 \text{ m}$$

$$= \mathbf{11 \text{ m}}$$

Elevasi desain *run-up* ditentukan menggunakan faktor 1,3 sehingga diperoleh:

$$R = 1.3 \times R^*$$

$$= 1.3 \text{ x } 11$$

$$= \mathbf{14.3 \text{ m}}$$

Tinggi maksimum air pada lokasi bangunan selanjutnya dihitung sebagai selisih elevasi desain *run-up* dengan elevasi dasar struktur:

$$h_{max} = R - zw$$

$$= 14.3 \text{ m} - 7 \text{ m}$$

$$= \mathbf{7.3 \text{ m}}$$

Nilai (h_{max} =7,3) m kemudian digunakan dalam perhitungan beberapa komponen gaya tsunami. Hasil perhitungan memberikan gaya hidrostatik sebesar 176,907 kN, gaya apung 36,52 kN/m², gaya hidrodinamik 49,32 kN, gaya impulsif 73,97 kN, gaya tumbukan puing 1.194,375 kN, gaya tahanan puing 345,20 kN, gaya angkat 0,96 kN/m², dan tambahan beban gravitasi 36,52 kN/m².

Tabel 4. Rekapitulasi beban tsunami yang digunakan dalam model

Komponen Beban Tsunami	Besaran
Gaya hidrostatik, FhFh	176,907 kN
Gaya apung, FbFb	36,52 kN/m²
Gaya hidrodinamik, FdFd	49,32 kN
Gaya impulsif, FsFs	73,97 kN
Gaya tumbukan puing, FiFi	1.194,375 kN
Gaya tahanan puing, FdmF{dm}	345,20 kN
Gaya angkat, FuFu	0,96 kN/m²
Tambahan beban gravitasi, FrFr	36,52 kN/m²

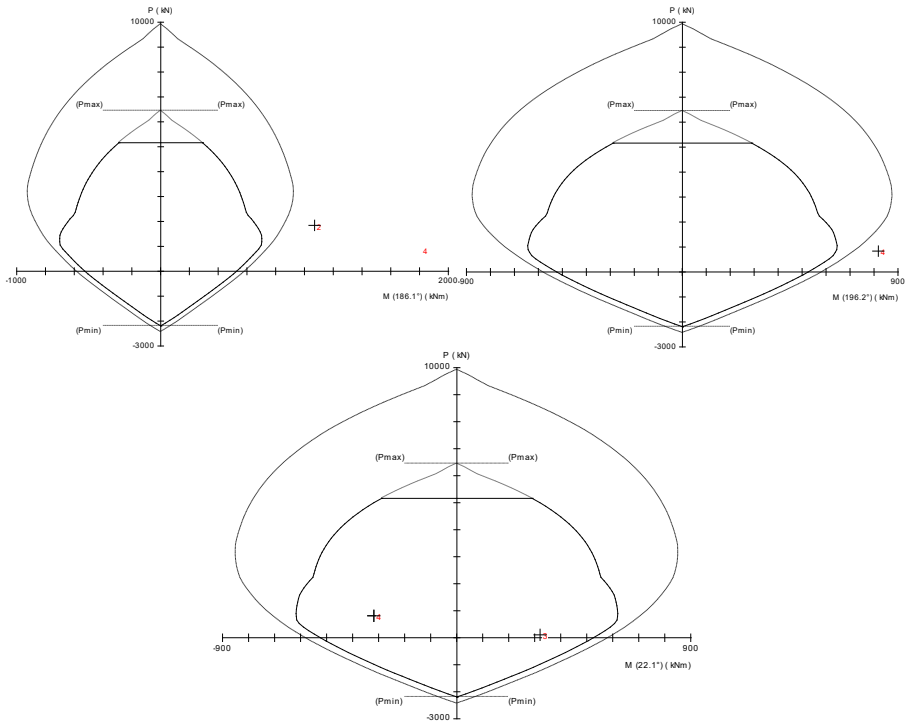
Tabel 4 menunjukkan seluruh komponen beban tsunami yang dimasukkan pada tahap analisis struktur. Gaya tumbukan puing merupakan nilai beban terpusat terbesar, yaitu 1.194,375 kN. Beban berbasis luasan terbesar adalah gaya apung dan tambahan beban gravitasi, masing-masing sebesar 36,52 kN/m².

6. Kapasitas Elemen Kolom

Evaluasi interaksi aksial–momen menggunakan diagram P–M menunjukkan beberapa titik beban ultimit berada di luar kurva kapasitas penampang. Kolom K1a berstatus **NOT OK** pada Lantai 1 dan Lantai 2, sementara Lantai 3, Lantai 4, dan rooftop masih berada di dalam kurva kapasitas. Kolom K1b berstatus NOT OK pada Lantai 1 dan berstatus OK pada tingkat lainnya. Kolom K2 yang ditinjau pada Lantai 1 berada di luar kurva kapasitas, sedangkan kolom K3 berada di luar kurva pada Lantai 1 tetapi masih berada di dalam kurva pada Lantai 2.

Tabel 5. Ringkasan evaluasi interaksi P–M elemen kolom

Tipe Kolom	Tingkat	Posisi Beban Ultimit terhadap Kurva Kapasitas	Hasil
K1a	Lantai 1	Di luar	NOT OK
K1a	Lantai 2	Di luar	NOT OK
K1a	Lantai 3	Di dalam	OK
K1a	Lantai 4	Di dalam	OK
K1a	Rooftop	Di dalam	OK
K1b	Lantai 1	Di luar	NOT OK
K1b	Lantai 2	Di dalam	OK
K1b	Lantai 3	Di dalam	OK
K1b	Lantai 4	Di dalam	OK
K1b	Rooftop	Di dalam	OK
K2	Lantai 1	Di luar	NOT OK
K3	Lantai 1	Di luar	NOT OK
K3	Lantai 2	Di dalam	OK



Gambar 3. Diagram interaksi P–M kolom pada kondisi kritis

Gambar 3 memperlihatkan contoh posisi kombinasi gaya aksial dan momen pada elemen kolom yang berada di luar kurva kapasitas. Diagram tingkat lain yang seluruh titiknya masih berada di dalam kurva tidak harus ditampilkan seluruhnya pada artikel dan dapat diringkas melalui Tabel 5.

Pemeriksaan kapasitas geser kolom memberikan satu hasil **NOT OK**, yaitu kolom K1a berukuran 600 × 600 mm pada Lantai 1. Gaya geser ultimit (Vu) sebesar 960,741 kN melampaui kapasitas geser tereduksi (ϕVn) sebesar 631,469 kN. Rasio kebutuhan terhadap kapasitasnya sebesar 1,52. Seluruh kolom lainnya memiliki nilai (Vu) di bawah (ϕVn).

Tabel 6. Kapasitas geser elemen kolom

Tingkat	Kolom	ϕVn\phi Vn (kN)	VuVu (kN)	D/C	Hasil
1	K1a	631,469	960,741	1,52	NOT OK
1	K1b	984,903	119,526	0,12	OK
1	K2	189,265	90,349	0,48	OK
1	K3	353,092	17,021	0,05	OK
2	K1a	631,469	96,870	0,15	OK
2	K1b	984,903	128,454	0,13	OK
2	K3	353,100	33,563	0,10	OK
3	K1a	631,469	78,165	0,12	OK
3	K1b	984,903	99,630	0,10	OK
4	K1a	631,469	52,957	0,08	OK
4	K1b	984,903	56,330	0,06	OK
Rooftop	K1a	631,469	37,955	0,06	OK
Rooftop	K1b	984,903	96,560	0,10	OK

Tabel 6 menunjukkan bahwa 12 dari 13 pemeriksaan kapasitas geser kolom menghasilkan status OK. Data yang berbeda dari pola umum ditemukan pada K1a Lantai 1 dengan nilai D/C lebih besar dari 1,00.

7. Kapasitas Elemen Balok

Evaluasi kapasitas lentur balok menunjukkan sejumlah elemen pada Lantai 2 dan Lantai 3 memiliki momen ultimit yang lebih besar daripada kapasitas lentur tereduksi. Pada Lantai 2, kondisi **NOT OK** ditemukan pada B1a di tumpuan dan lapangan, B1b di tumpuan dan lapangan, serta B2b di tumpuan dan lapangan. Pada Lantai 3, kondisi **NOT OK** ditemukan pada B2b di bagian tumpuan. Elemen lainnya pada Lantai 3, Lantai 4, dan rooftop yang diperiksa memiliki kapasitas lentur lebih besar daripada momen ultimit.

Tabel 7. Elemen balok yang tidak memenuhi kapasitas lentur

Tingkat	Balok	Lokasi	MuMu (kN·m)	ϕMn\phi Mn (kN·m)	D/C	Hasil
2	B1a	Tumpuan	610,83	384,13	1,59	NOT OK
2	B1a	Lapangan	673,93	269,84	2,50	NOT OK
2	B1b	Tumpuan	292,52	269,84	1,08	NOT OK
2	B1b	Lapangan	359,39	269,84	1,33	NOT OK
2	B2b	Tumpuan	276,37	87,37	3,16	NOT OK

Tingkat	Balok	Lokasi	MuMu (kN·m)	ϕMn\phi Mn (kN·m)	D/C	Hasil
2	B2b	Lapangan	276,37	83,14	3,32	NOT OK
3	B2b	Tumpuan	104,41	87,37	1,20	NOT OK

Tabel 7 hanya menampilkan elemen dengan D/C lebih besar dari 1,00 agar temuan kritis dapat dibaca secara lebih ringkas pada format artikel. Nilai D/C tertinggi terdapat pada B2b Lantai 2 bagian lapangan sebesar 3,32, diikuti B2b Lantai 2 bagian tumpuan sebesar 3,16.

Hasil pemeriksaan geser balok berbeda dengan hasil pemeriksaan lentur. Seluruh balok yang dianalisis memperoleh status **OK** terhadap kapasitas geser. Nilai (Vu) terbesar terdapat pada B1a Lantai 2 bagian tumpuan sebesar 502,99 kN, sedangkan kapasitas (***ϕ Vn***)-nya sebesar 528,96 kN. Tidak terdapat elemen balok dengan (Vu>\ ***ϕ Vn***) pada pemeriksaan geser.

1. Simpangan pada Pembebanan Gempa–Tsunami

Analisis akhir dilakukan dengan memasukkan respons pembebanan yang digunakan dalam skenario gempa dan tsunami. Pada arah X, seluruh nilai simpangan ultimit masih berada di bawah batas yang ditetapkan pada masing-masing tingkat. Pada arah Y, simpangan pada tingkat paling bawah yang dievaluasi sebesar 46,22 mm, sedangkan batasnya sebesar 46,15 mm. Selisih antara keduanya sebesar 0,07 mm.

Tabel 8. Story displacement pada arah X

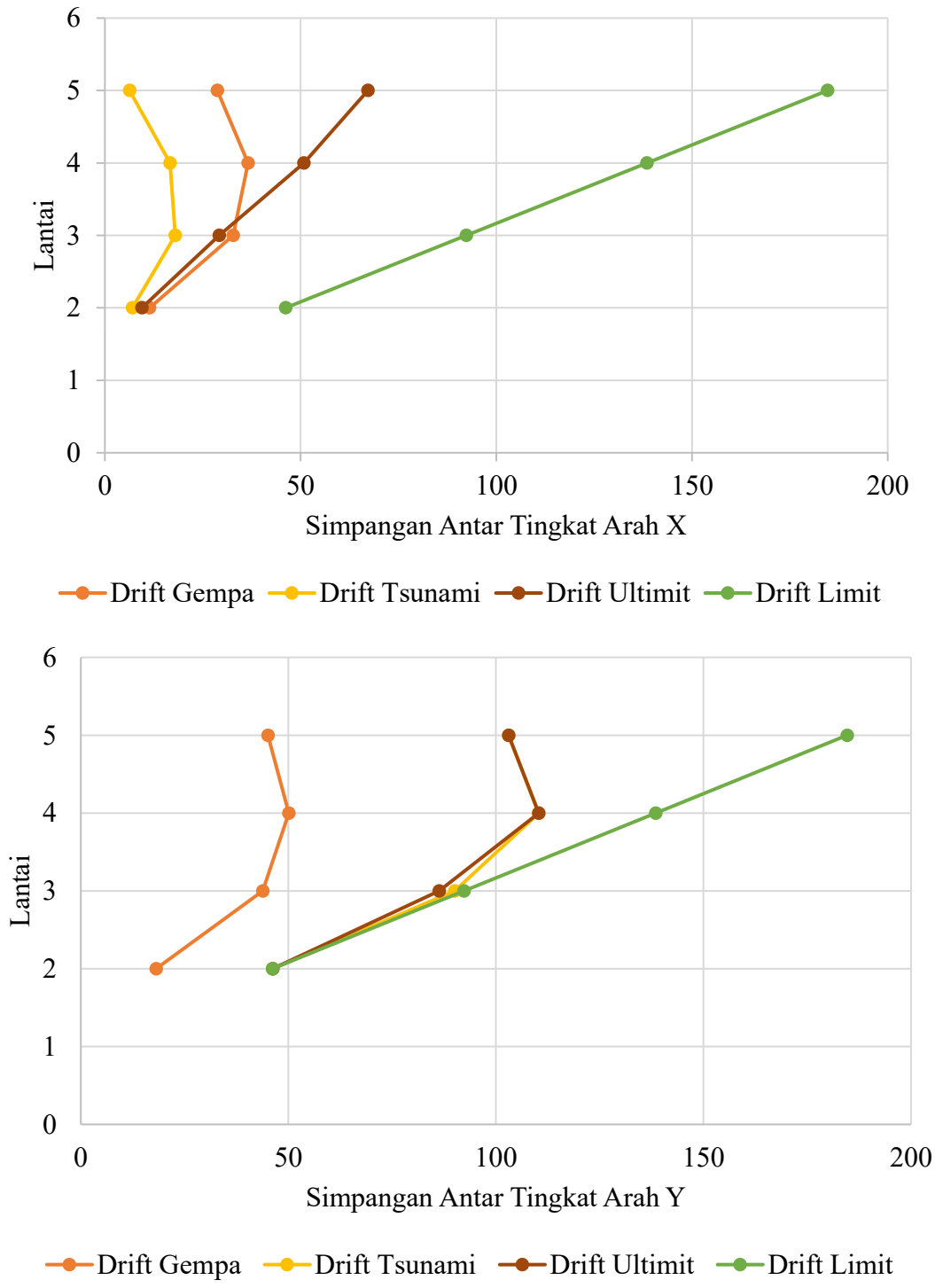
Tingkat	Drift Gempa, ΔE\DeltaE (mm)	Drift Tsunami, ΔTsu\Delta{Tsu} (mm)	Drift Ultimit, ΔU\DeltaU (mm)	Drift Limit (mm)	Hasil
5	28,74	6,301	67,20	184,62	OK
4	36,58	16,678	50,82	138,46	OK
3	32,78	17,978	29,18	92,31	OK
2	11,42	7,018	9,43	46,15	OK

Tabel 8 menunjukkan bahwa seluruh nilai simpangan ultimit arah X masih lebih rendah daripada batas yang digunakan. Nilai terbesar tercatat sebesar 67,20 mm pada Tingkat 5 dengan batas 184,62 mm.

Tabel 9. Story displacement pada arah Y

Tingkat	Drift Gempa, ΔE\DeltaE (mm)	Drift Tsunami, ΔTsu\Delta{Tsu} (mm)	Drift Ultimit, ΔU\DeltaU (mm)	Drift Limit (mm)	Hasil
5	45,09	103,037	103,037	184,62	OK
4	50,11	110,314	110,314	138,46	OK
3	43,84	90,083	86,291	92,31	OK
2	18,13	46,22	46,22	46,15	NOT OK

Tabel 9 menunjukkan bahwa tiga tingkat masih memiliki simpangan ultimit di bawah batas, sedangkan Tingkat 2 menghasilkan nilai 46,22 mm yang sedikit lebih besar daripada batas 46,15 mm. Kondisi tersebut merupakan data anomali terhadap pola umum simpangan arah Y karena hanya satu tingkat yang berstatus **NOT OK**.



Gambar 4. Grafik story displacement struktur pada arah X dan Y

Gambar 4 memperlihatkan distribusi simpangan pada setiap tingkat untuk kedua arah ortogonal. Kurva arah X seluruhnya berada di bawah batas yang digunakan, sedangkan pada arah Y terdapat pelampauan batas pada Tingkat 2.

2. Ringkasan Temuan Utama

Secara keseluruhan, hasil analisis menghasilkan beberapa temuan utama. Model struktur memiliki perbedaan 0,41% terhadap perhitungan manual dan memenuhi kontrol validasi yang digunakan. Partisipasi massa dinamik mencapai 90,81% pada arah X dan 90,31% pada arah Y. Pemeriksaan awal terhadap beban gempa menunjukkan simpangan arah Y sebesar 50,105 mm pada Lantai 3 melampaui batas 46,154 mm, sedangkan kontrol P–Delta seluruh tingkat masih memenuhi kriteria. Perhitungan tsunami menghasilkan tinggi maksimum air 7,3 m dan gaya tumbukan puing maksimum sebesar 1.194,375 kN. Pemeriksaan kapasitas menunjukkan kondisi **NOT OK** pada interaksi P–M beberapa kolom lantai bawah, kapasitas geser K1a Lantai 1 dengan D/C 1,52, serta kapasitas lentur tujuh lokasi balok dengan D/C maksimum 3,32. Seluruh pemeriksaan geser balok masih berstatus **OK**. Analisis simpangan akhir menunjukkan seluruh tingkat pada arah X masih memenuhi batas, sedangkan pada arah Y terdapat satu nilai sebesar 46,22 mm yang melampaui batas 46,15 mm.

PEMBAHASAN

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kinerja Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang tidak dapat dinilai hanya dari kemampuan struktur menghadapi gempa atau dari terpenuhinya sebagian besar parameter respons global. Model struktur telah memenuhi persyaratan partisipasi massa lebih dari 90% dan kontrol P–Delta menunjukkan kondisi stabil, tetapi masih ditemukan beberapa indikator kritis pada simpangan lateral dan kapasitas elemen struktur. Simpangan gempa arah Y pada Lantai 3 mencapai 50,105 mm, lebih besar daripada batas 46,154 mm, sedangkan evaluasi dengan memasukkan pengaruh tsunami memperlihatkan simpangan arah Y pada Lantai 2 sebesar 46,22 mm yang sedikit melampaui batas 46,15 mm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa respons bangunan bersifat tidak seragam menurut arah dan elevasi. Struktur masih mampu mempertahankan stabilitas global pada sejumlah parameter, tetapi kapasitas lokal dan kekakuan lateral pada bagian tertentu belum sepenuhnya memenuhi tuntutan pembebanan

yang digunakan. Temuan ini menjadi penting karena bangunan yang akan dimanfaatkan sebagai Tempat Evakuasi Sementara (TES) dituntut tidak hanya terhindar dari keruntuhan global, tetapi juga memiliki tingkat keandalan yang cukup untuk melindungi pengungsi ketika gempa dan tsunami terjadi.

Karakteristik dinamik bangunan memberikan petunjuk awal terhadap kondisi tersebut. Ragam pertama memiliki komponen rotasi (RZ) sebesar 30,76%, sedangkan translasi dominan pada arah Y dan X baru muncul pada ragam berikutnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa respons bangunan tidak sepenuhnya didominasi oleh gerakan translasi sederhana, tetapi mengandung respons puntir akibat distribusi massa dan kekakuan yang tidak simetris. Kondisi ini relevan dengan ditemukannya simpangan berlebih pada arah Y. Hasil tersebut berbeda dengan penelitian Ariq et al. (2024) pada Gedung IGD Terpadu K.R.M.T. Wongsonegoro, yang memperoleh *story drift* maksimum 21,64 mm pada arah X dan 25,24 mm pada arah Y dan masih memenuhi kriteria batas ultimit. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan sistem struktur beton bertulang dengan analisis respons spektrum tidak dengan sendirinya menghasilkan tingkat respons yang sama pada setiap bangunan. Geometri, distribusi kekakuan, konfigurasi elemen penahan gaya lateral, massa, dan kondisi pembebanan pada masing-masing struktur tetap menentukan besarnya deformasi yang terjadi.

Pengaruh tsunami memberikan tuntutan tambahan yang jauh berbeda dari gempa karena beban bekerja melalui tekanan air, aliran, gaya apung, tumbukan, serta material hanyut yang berinteraksi langsung dengan bagian bawah bangunan. Kedalaman air desain sebesar 7,3 m menyebabkan lebih dari satu tingkat bangunan berada pada zona yang menerima pengaruh aliran. Perhitungan memperlihatkan gaya hidrostatik sebesar 176,907 kN, gaya hidrodinamik 49,32 kN, gaya impulsif 73,97 kN, dan gaya tahanan puing 345,20 kN. Gaya tumbukan puing menjadi komponen terbesar dengan nilai 1.194,375 kN. Besarnya gaya tersebut menunjukkan bahwa evaluasi struktur TES tidak cukup dilakukan dengan menambahkan beban lateral yang bersifat seragam, karena setiap komponen tsunami memiliki mekanisme dan titik aplikasi yang berbeda. FEMA P-646 menempatkan gaya hidrostatik, hidrodinamik, apung, tumbukan puing, dan beban terkait genangan sebagai bagian yang perlu dipertimbangkan pada struktur evakuasi vertikal (Agency, 2019). Temuan penelitian ini memperlihatkan konsekuensi nyata dari ketentuan tersebut pada bangunan eksisting yang pada awalnya berfungsi sebagai fasilitas pendidikan.

Kondisi paling kritis pada elemen vertikal ditemukan pada kolom-kolom lantai bawah. Diagram interaksi P–M menunjukkan bahwa kolom K1a Lantai 1 dan Lantai 2, K1b Lantai 1, K2 Lantai 1, serta K3 Lantai 1 memiliki titik beban ultimit di luar kurva kapasitas. Pemeriksaan geser memberikan indikasi yang lebih spesifik pada kolom K1a Lantai 1, dengan gaya geser ultimit sebesar 960,741 kN dibandingkan kapasitas tereduksi sebesar 631,469 kN atau rasio kebutuhan terhadap kapasitas sekitar 1,52. Lokasi kegagalan yang terkonsentrasi pada tingkat bawah dapat dikaitkan dengan besarnya tuntutan lateral tsunami pada elevasi yang langsung berinteraksi dengan aliran dan tumbukan puing. Kondisi ini perlu mendapat perhatian khusus karena kegagalan geser pada kolom lebih berisiko daripada respons lentur yang daktail. Prinsip desain beton bertulang menempatkan kapasitas geser sebagai aspek yang harus dijaga agar kegagalan getas tidak mendahului mekanisme deformasi yang lebih daktail (McCormac & Brown, 2016; B. S. Nasional, 2019a). Hasil tersebut memperlihatkan bahwa kecukupan kapasitas struktur untuk fungsi pendidikan belum tentu identik dengan kecukupan kapasitas ketika bangunan diberi tuntutan tambahan sebagai fasilitas evakuasi tsunami.

Temuan pada elemen balok memperlihatkan pola yang berbeda. Seluruh balok yang diperiksa masih memenuhi kapasitas geser, tetapi sejumlah balok tidak memenuhi kapasitas lentur. Kondisi **NOT OK** ditemukan terutama pada B1a, B1b, dan B2b Lantai 2 serta B2b pada Lantai 3. Rasio kebutuhan terhadap kapasitas terbesar terjadi pada B2b Lantai 2 bagian lapangan, yaitu sekitar 3,32. Pola tersebut mengindikasikan bahwa tuntutan momen menjadi parameter yang lebih menentukan pada elemen horizontal dibandingkan tuntutan geser. Keberadaan gaya apung dan tambahan beban akibat genangan juga membuat keadaan pembebanan pelat dan balok berbeda dengan kondisi pelayanan normal. SNI 2847:2019 mensyaratkan kapasitas elemen beton bertulang harus mencukupi terhadap tuntutan gaya terfaktor yang bekerja (B. S. Nasional, 2019a, 2020). Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa beberapa balok yang masih memadai terhadap gaya geser belum tentu memiliki cadangan kapasitas lentur yang cukup terhadap kombinasi pembebanan ekstrem. Artinya, penilaian kelayakan TES perlu dilakukan pada lebih dari satu mekanisme kegagalan dan tidak dapat disimpulkan hanya dari satu parameter kapasitas.

Hasil tersebut memperluas temuan penelitian terdahulu mengenai bangunan evakuasi di Kota Padang. Restu et al. (2021) memperoleh tingkat kinerja *Immediate Occupancy* pada Pasar Inpres Blok IV berdasarkan analisis *pushover*, dengan *drift ratio* akibat gempa masih berada di bawah batas yang digunakan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa suatu

bangunan eksisting dapat menunjukkan kinerja memadai ketika dievaluasi terhadap respons seismik tertentu. Penelitian ini menghasilkan kondisi yang berbeda karena evaluasi tidak berhenti pada respons gempa, tetapi dilanjutkan pada tuntutan tsunami dan kapasitas individual elemen. Perbedaan pendekatan ini menghasilkan identifikasi titik-titik kritis yang tidak selalu tercermin hanya melalui respons global bangunan. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung pentingnya evaluasi yang lebih komprehensif sebelum bangunan eksisting dialihfungsikan sebagai tempat evakuasi vertikal.

Perbandingan dengan Rifa & Juliafad (2024) semakin memperlihatkan bahwa kelayakan bangunan terhadap bahaya tsunami sangat bergantung pada karakter masing-masing struktur. Penelitian tersebut pada bangunan sekolah di lingkungan Universitas Negeri Padang melaporkan bahwa simpangan antar tingkat masih berada dalam kriteria penerimaan, dengan simpangan maksimum yang tidak melampaui batas yang digunakan. Hasil penelitian pada Gedung Laboratorium Terpadu justru memperlihatkan pelampauan kecil pada simpangan arah Y serta beberapa elemen dengan kapasitas yang tidak mencukupi. Perbedaan ini memperlihatkan bahwa kedekatan lokasi, kesamaan material beton bertulang, atau fungsi kawasan tidak dapat digunakan sebagai dasar untuk menggeneralisasi keamanan seluruh bangunan calon shelter. Setiap gedung memiliki konfigurasi geometri, dimensi elemen, detail penulangan, kekakuan, dan distribusi beban yang berbeda sehingga harus diperiksa secara individual (Rifa & Juliafad, 2024). Studi yang lebih baru pada Gedung D Departemen Teknik Sipil FT UNP juga menemukan bahwa struktur yang dianalisis mampu memenuhi tingkat *Immediate Occupancy* dan kapasitas elemen utamanya lebih besar daripada tuntutan kombinasi beban tsunami. Perbedaan hasil tersebut semakin menegaskan bahwa status kelayakan sebagai shelter merupakan karakteristik spesifik bangunan dan tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan keberadaannya di kawasan yang sama.

Simpangan akhir akibat pembebanan gempa dan tsunami memperkuat hasil evaluasi kapasitas elemen. Seluruh simpangan arah X masih berada di bawah batas, sedangkan arah Y pada Lantai 2 mencapai 46,22 mm dibandingkan batas 46,15 mm. Pelampauan sebesar 0,07 mm memang relatif kecil secara numerik, tetapi tetap menunjukkan bahwa kriteria yang digunakan tidak terpenuhi pada kombinasi tersebut. Temuan ini juga konsisten dengan respons gempa awal yang menunjukkan arah Y sebagai arah yang lebih kritis pada sebagian tingkat. Keterkaitan antara deformasi arah Y dan ketidakcukupan kapasitas beberapa elemen lantai bawah memberikan gambaran bahwa kelemahan struktur bukan hanya persoalan satu komponen tunggal, melainkan berkaitan dengan respons sistem terhadap distribusi gaya

lateral. Perspektif ini sejalan dengan ASCE/SEI 41-17 yang menempatkan evaluasi struktur eksisting pada hubungan antara tuntutan, kapasitas, deformasi, dan kriteria penerimaan sebagai suatu sistem, bukan hanya pemeriksaan kekuatan penampang secara terpisah (Engineers, 2017a, 2017b)

Implikasi praktis dari temuan tersebut adalah Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP belum dapat langsung dinyatakan layak sebagai TES hanya berdasarkan keberadaan lantai aman di atas elevasi genangan. Pemanfaatannya sebagai fasilitas perlindungan perlu didahului oleh penanganan terhadap elemen-elemen yang tidak memenuhi kapasitas, terutama kolom lantai bawah dan balok yang mengalami kekurangan kapasitas lentur, disertai peningkatan kekakuan pada arah yang menunjukkan simpangan kritis. Pilihan teknik perkuatan dapat berupa peningkatan kapasitas penampang, penambahan elemen penahan gaya lateral, atau metode *retrofitting* lain yang sesuai, tetapi jenis dan dimensinya harus ditentukan melalui analisis perkuatan tersendiri. Evaluasi ulang setelah perkuatan juga diperlukan untuk memastikan bahwa peningkatan kapasitas pada satu komponen tidak memindahkan titik kritis ke elemen lainnya. Pendekatan tersebut menjadi penting karena fungsi TES berkaitan langsung dengan keselamatan banyak orang pada periode ketika jalur evakuasi horizontal tidak lagi dapat diandalkan.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi yang mempertemukan tuntutan gempa, karakteristik pembebanan tsunami, simpangan struktur, dan kapasitas individual elemen dalam satu kerangka pemeriksaan bangunan eksisting. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemenuhan sebagian besar parameter seismik tidak serta-merta menjamin kecukupan struktur ketika fungsi bangunan diperluas sebagai fasilitas evakuasi vertikal. Temuan tersebut memperkuat kebutuhan pendekatan *multi-hazard* dalam evaluasi bangunan di kawasan pesisir Kota Padang. Penelitian Restu et al. (2021); Rifa & Juliafad, (2024); Siregar, (2017) telah memberikan pijakan penting bagi evaluasi bangunan terhadap gempa maupun tsunami di Kota Padang. Penelitian ini melanjutkan arah tersebut dengan menunjukkan secara lebih terperinci lokasi dan mekanisme ketidakcukupan kapasitas pada struktur Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP.

Penelitian ini tetap memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan ketika hasilnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Model menggunakan asumsi perletakan dasar jepit sehingga interaksi tanah–struktur belum direpresentasikan secara eksplisit. Kondisi material dan geometri terutama mengacu pada dokumen *as-built drawing* dan

data sekunder, sementara variasi mutu material aktual, kerusakan eksisting, serta perubahan kondisi bangunan selama masa pelayanan belum seluruhnya diverifikasi melalui pengujian lapangan. Beban tsunami juga direpresentasikan melalui parameter beban ekuivalen berdasarkan pedoman yang digunakan sehingga proses hidrodinamika, variasi kecepatan aliran terhadap waktu, distribusi puing yang bersifat acak, serta penurunan kapasitas struktur akibat kerusakan gempa sebelum tsunami belum dimodelkan secara nonlinier dan berurutan. Penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan investigasi material eksisting, interaksi tanah–struktur, simulasi inundasi spesifik lokasi, analisis nonlinier, serta skenario *sequential earthquake–tsunami* untuk memperoleh gambaran kinerja bangunan yang lebih mendekati kondisi bencana sebenarnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, evaluasi kinerja Gedung Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang menunjukkan bahwa struktur eksisting masih memiliki beberapa titik kritis ketika ditinjau terhadap kombinasi beban gempa dan tsunami. Analisis respons spektrum memperlihatkan adanya ketidakberaturan torsi dan fleksibilitas yang lebih dominan pada arah Y, ditunjukkan oleh simpangan antar tingkat di Lantai 3 sebesar 50,105 mm yang melampaui batas izin 46,154 mm. Pada skenario tsunami dengan kedalaman genangan desain 7,3 m, struktur menerima gaya hidrostatik 176,907 kN, gaya hidrodinamik 49,32 kN, gaya impulsif 73,97 kN, gaya tahanan puing 345,20 kN, beban apung 36,52 kN/m², serta gaya tumbukan puing yang mencapai 1.194,375 kN. Evaluasi kapasitas penampang juga menunjukkan bahwa beberapa kolom utama pada lantai bawah, terutama K1a, K1b, K2, dan K3, mengalami pelampauan kapasitas interaksi aksial–momen, sementara kolom K1a Lantai 1 turut mengalami kekurangan kapasitas geser. Beberapa elemen balok pada lantai bawah juga tidak memenuhi kapasitas lentur, disertai simpangan arah Y sebesar 46,22 mm yang sedikit melebihi batas 46,15 mm. Temuan tersebut menunjukkan bahwa Gedung Laboratorium Terpadu FT UNP belum dapat dinyatakan sepenuhnya memenuhi kriteria kinerja struktur untuk mendukung fungsi sebagai Tempat Evakuasi Sementara tanpa adanya evaluasi dan peningkatan kapasitas pada elemen-elemen kritis.

Penelitian ini memberikan kontribusi praktis dan metodologis melalui penerapan evaluasi struktur eksisting yang mengintegrasikan respons gempa, beban tsunami, simpangan antar tingkat, serta kapasitas elemen struktur dalam satu kerangka penilaian. Pendekatan

tersebut memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai kelayakan bangunan bertingkat di kawasan rawan tsunami, khususnya ketika bangunan dengan fungsi awal pendidikan dipertimbangkan sebagai fasilitas evakuasi vertikal. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar teknis untuk menentukan prioritas penguatan pada elemen struktur yang mengalami kondisi *overstressed* sebelum gedung difungsikan sebagai TES. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan evaluasi yang lebih rinci melalui pengujian mutu material aktual, analisis nonlinier, pemodelan interaksi tanah–struktur, simulasi hidrodinamika tsunami yang lebih spesifik terhadap kondisi lokasi, serta analisis berurutan gempa–tsunami untuk memperoleh representasi respons struktur yang lebih mendekati kondisi bencana sebenarnya. Kajian lanjutan terhadap alternatif *retrofitting* juga diperlukan untuk menentukan strategi perkuatan yang paling efektif dalam meningkatkan kapasitas dan keandalan bangunan sebagai fasilitas evakuasi vertikal.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Civil Engineers. (2017a). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16).* https://doi.org/10.1061/9780784414248

American Society of Civil Engineers. (2017b). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17).* https://doi.org/10.1061/9780784414859

Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2009). *Profil Tim Pendukung Teknis Rehabilitasi Rekonstruksi: Pasca Gempa Bumi Sumatera Barat 30 September 2009*. https://perpustakaan.bnpb.go.id/inlislite/opac/detail-opac?id=2909

Badan Pusat Statistik Kota Padang. (2023). *Kecamatan Padang Utara dalam Angka 2023*. https://padangkota.bps.go.id/id/publication/2023/09/26/baf8e022e4f023aa7c59121e/kecamatan-padang-utara-dalam-angka-2023.html

Badan Standardisasi Nasional. (2019a). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019).* https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12731-sni28472019

Badan Standardisasi Nasional. (2019b). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung (SNI 1726:2019).* https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12762-sni17262019

Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020).* https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12927-sni17272020

Federal Emergency Management Agency. (2019). *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis* (3rd ed.; FEMA P-646). U.S. Department of Homeland Security. https://www.atcouncil.org/docman/fema/261-fema-p-646-third-edition

Jihad, A., Muksin, U., Syamsidik, Ramli, M., Banyunegoro, V. H., Simanjuntak, A. V. H., & Rusdin, A. A. (2023). Tsunami Evacuation Sites in the Northern Sumatra (Indonesia)

Determined Based on the Updated Tsunami Numerical Simulations. *Progress in Disaster Science, 18*, 100286. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100286

McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2016). *Design of Reinforced Concrete* (10th ed.). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Design%2Bof%2BReinforced%2BConcrete%2C%2B10th%2BEdition-p-9781118879108

Muhammad, A., De Risi, R., De Luca, F., Mori, N., Yasuda, T., & Goda, K. (2021). Are Current Tsunami Evacuation Approaches Safe Enough? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 35*, 759–779. https://doi.org/10.1007/s00477-021-02000-5

Muhammad, A., Goda, K., Alexander, N. A., Kongko, W., & Muhari, A. (2017). Tsunami Evacuation Plans for Future Megathrust Earthquakes in Padang, Indonesia, Considering Stochastic Earthquake Scenarios. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 17*, 2245–2270. https://doi.org/10.5194/nhess-17-2245-2017

Mustafa, B. (2010). Analisis Gempa Nias dan Gempa Sumatera Barat dan Kesamaannya yang Tidak Menimbulkan Tsunami. *Jurnal Ilmu Fisika, 2*(1), 44–50. https://doi.org/10.25077/jif.2.1.44-50.2010

Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. https://sitaba.pu.go.id/user/file/2024_12_19_02_17_33.914582_file.pdf

Qin, Y., Chen, J., Singh, S. C., Hananto, N., Carton, H., & Tapponnier, P. (2024). Assessing the Risk of Potential Tsunamigenic Earthquakes in the Mentawai Region by Seismic Imaging, Central Sumatra. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 25*(5), e2023GC011149. https://doi.org/10.1029/2023GC011149

Restu, L. J., Juliafad, E., & Yusmar, F. (2021). Evaluasi Struktur Bangunan Pasar Inpress Blok IV Gedung B dengan Metode Pushover. *CIVED, 8*(3), 117–127. https://doi.org/10.24036/cived.v8i3.113638

Rifa, B., & Juliafad, E. (2024). Evaluasi Struktur Bangunan Shelter Tsunami di Lingkungan Universitas Negeri Padang. *Jurnal Applied Science in Civil Engineering, 5*(1), 20–27. https://doi.org/10.24036/asce.v5i1.100483

Setiawan, D. B. (2021). *Evaluasi Kinerja Struktur Gedung pada Kondisi Batas Layan dan Batas Ultimit dengan Analisis Dinamik Metode Respon Spektrum (Studi Kasus: Gedung Fakultas Hukum Universitas Sam Ratulangi)* [Undergraduate thesis, Universitas Islam Indonesia]. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/36253

Siregar, N. (2017). *Pengaruh Beban Tsunami pada Gedung Pasar Raya Inpres Blok III Kota Padang Berdasarkan FEMA P-646/April 2012* [Diploma thesis, Universitas Andalas]. https://scholar.unand.ac.id/30761/

Syahputra, R., Irwan, & Sumantri, A. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur pada Gedung Jamaliah Yayasan Syafiatulamaliyah Medan Berdasarkan SNI 1726:2019. *Buletin Utama Teknik, 17*(1), 98–105. https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/but/article/view/4321