



Tektonika Tahan Gempa Arsitektur Tradisional Indonesia: Studi Kasus Rumah Bolon Batak Toba

Andika Citraningrum¹, Agung Murti Nugroho^{1,2}, Togi Riris Siagian¹, Wasiska Iyati¹

¹ Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia.

² Pusat Studi Lingkungan Hidup, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia.

| Diterima 26 Mei 2025 | Disetujui 7 Desember 2025 | Diterbitkan 15 Desember 2025 |

| DOI <http://doi.org/10.32315/jlbi.v14i4.501> |

Abstrak

Tektonika arsitektur tradisional merupakan wujud kearifan lokal dalam menghadapi risiko bencana gempa bumi, namun belum banyak dikaji secara holistik sebagai sistem ketahanan struktural. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan kaidah, memformulasikan konsep, dan menguji kinerja tektonika arsitektur tradisional tahan gempa melalui studi kasus Rumah Bolon Batak Toba. Penelitian dilakukan melalui tiga tahapan: *systematic literature review* terhadap 11 jurnal terkait tektonika tradisional, observasi lapangan pada rumah tradisional Batak Toba di Kabupaten Toba Samosir, dan simulasi numerik menggunakan SAP2000 untuk mengevaluasi kinerja deformasi struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Rumah Bolon memiliki sistem struktur, konstruksi, dan sambungan berbasis *interlocking* yang efektif dalam mendistribusikan gaya gempa. Nilai defleksi akibat beban hidup, beban mati, dan beban gempa tercatat sebesar 0,003 cm, jauh di bawah ambang batas 0,6 cm sesuai SNI 03-1729-2002. Beban mati menjadi faktor dominan dalam mempengaruhi deformasi, sementara sistem sambungan tradisional mampu meredam getaran gempa dengan efektif. Penelitian ini membuktikan bahwa prinsip tektonika arsitektur tradisional Batak Toba berkontribusi signifikan terhadap ketahanan bangunan terhadap gempa.

Kata-kunci: Arsitektur tradisional, Batak Toba, Rumah Bolon, tahan gempa, tektonika arsitektur

Earthquake-Resistant Tectonics of Indonesian Traditional Architecture: Case Study of Batak Toba's Bolon House

Abstract

The tectonics of traditional architecture represent a form of local wisdom in mitigating earthquake disaster risks, yet they have not been extensively studied holistically as a structural resilience system. This research aims to formulate principles, develop concepts, and evaluate the seismic performance of traditional architectural tectonics through a case study of the Batak Toba's Bolon House. The study was conducted in three stages: a systematic literature review of 11 journals related to traditional tectonics, field observations of Batak Toba traditional houses in Toba Samosir Regency, and numerical simulations using SAP2000 to assess structural deformation performance. The findings reveal that the Bolon House employs an interlocking-based structural, constructional, and joint system that effectively distributes seismic forces. The deflection values under live loads, dead loads, and earthquake loads were recorded at 0.003 cm, far below the permissible limit of 0.6 cm as specified in SNI 03-1729-2002. Dead load was identified as the dominant factor influencing deformation, while traditional joint systems were proven effective in damping seismic vibrations. This study demonstrates that the tectonic principles of Batak Toba traditional architecture contribute significantly to building resilience against earthquakes.

Keywords: Batak Toba, Bolon House, earthquake-resistant, tectonics, traditional architecture

Kontak Penulis

Andika Citraningrum
Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. MT Haryono 167, Malang, Jawa Timur, Indonesia 65145
E-mail : andikacitra@ub.ac.id



Pendahuluan

Bencana alam seperti gempa bumi telah terbukti memberikan dampak yang signifikan terhadap lingkungan binaan, khususnya pada wilayah dengan sejarah panjang aktivitas seismik. Sumatera Utara, termasuk Kabupaten Toba Samosir, merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang berada pada zona seismik aktif, sehingga rentan terhadap guncangan gempa besar. Dalam konteks ini, rumah tradisional di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia, menunjukkan adaptasi arsitektural yang mencerminkan pengetahuan lokal tentang mitigasi risiko bencana. Tektonika arsitektur tradisional tahan gempa merupakan wujud kearifan lokal yang menggabungkan pengetahuan, teknik konstruksi, dan pemahaman ekologi dalam upaya menciptakan hunian yang aman dan tangguh [1], [2]. Tektonika di sini didefinisikan sebagai ekspresi keterpaduan antara bentuk, struktur, dan teknik konstruksi, baik dalam kaitannya dengan fungsi maupun estetika. Rumah Bolon, sebagai rumah adat khas wilayah ini, menunjukkan konstruksi yang unik dengan sistem sambungan dan pondasi umpak yang diyakini mampu mengurangi dampak guncangan gempa.

Rumah tradisional tidak hanya berperan sebagai tempat tinggal, tetapi juga sebagai manifestasi strategi adaptasi dan pengelolaan lingkungan yang diwariskan lintas generasi. Ketangguhan bangunan tradisional dalam menghadapi gempa mencerminkan interaksi dinamis antara manusia dan alam, di mana praktik membangun menjadi bagian integral dari budaya tanggap bencana. Namun demikian, pengetahuan mengenai tektonika arsitektur tradisional kerap terpinggirkan oleh dominasi ilmu pengetahuan modern, meskipun bukti empiris menunjukkan bahwa teknik tradisional tetap relevan dan efektif sebagai bagian dari strategi pengurangan risiko bencana [3], [4]. Oleh karena itu, penelitian yang mendalami prinsip, konsep, dan kinerja tektonika tahan gempa pada rumah tradisional menjadi semakin penting, khususnya untuk mendukung pelestarian kearifan lokal dan pengembangan praktik bangunan berkelanjutan [5].

Studi tentang tektonika arsitektur tradisional tahan gempa telah banyak dilakukan secara global, dengan fokus pada teknik konstruksi vernakular, evaluasi kerentanan seismik, serta pengembangan indeks risiko berbasis budaya lokal [6] – [16].

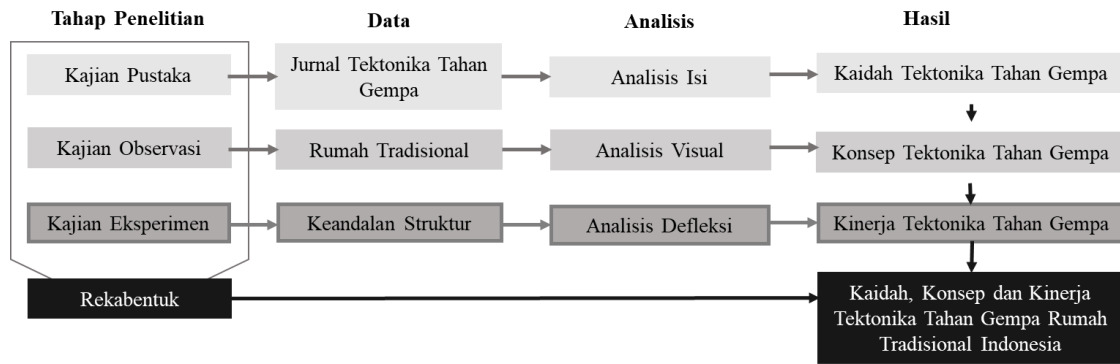
Beberapa penelitian mengungkapkan efisiensi teknik bangunan tradisional dalam meredam dampak gempa melalui karakteristik struktural seperti pondasi umpak, sambungan pasak, material alami, serta desain fleksibel yang mengikuti perilaku dinamis gempa. Meski demikian, tinjauan literatur menunjukkan adanya kesenjangan dalam penelitian yang secara spesifik mengkaji tektonika arsitektur tradisional Indonesia sebagai sistem pengetahuan holistik yang terintegrasi antara kaidah, konsep, dan kinerja [7], [12].

Khusus pada konteks Rumah Bolon, belum banyak kajian mendalam yang membuktikan kinerja ketahanan strukturalnya terhadap gempa melalui pendekatan kuantitatif dan simulasi numerik. Penelitian ini menawarkan solusi dengan merumuskan kaidah dasar tektonika tradisional tahan gempa melalui pendekatan *systematic literature review*, memformulasikan konsepnya berdasarkan observasi lapangan pada rumah tradisional Batak Toba, dan menguji kinerjanya melalui simulasi numerik. Potensi tektonika arsitektur tradisional Indonesia, khususnya Rumah Bolon Batak Toba, sebagai model adaptasi seismik berbasis budaya lokal masih terbuka luas untuk dieksplorasi secara lebih mendalam. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada perumusan model tektonika arsitektur tradisional tahan gempa Indonesia secara holistik, yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan kebijakan mitigasi bencana berbasis budaya serta pelestarian warisan arsitektur tradisional

Metode

Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahapan utama (Gambar 1). Tahap pertama yaitu *systematic literature review*. Tahap dilakukan untuk mengidentifikasi prinsip-prinsip arsitektur tradisional dalam menghadapi bencana gempa. Pada tahap ini, terdapat 11 jurnal [6] – [16] yang digunakan sebagai bahan analisis (Tabel 1).

Tahap kedua berupa observasi lapangan untuk memformulasikan konsep tektonika tahan gempa berbasis kearifan lokal. Observasi dilakukan di Desa Marsangap, Kecamatan Sigumpar, Kabupaten Toba Samosir, Provinsi Sumatera Utara. Dua Rumah Bolon yang memiliki bentuk arsitektur serupa di desa tersebut dipilih sebagai objek penelitian. Lokasi dan wujud kedua Rumah Bolon tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 1. Tahap penelitian tektonika tahan gempa Rumah Tradisional Indonesia.

Tabel 1. Daftar makalah jurnal pada tahap systematic literature review.

No	Judul Makalah	Penulis	Tahun
1	<i>Traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture and local seismic cultures: A literature review</i> [6]	Ortega J, Vasconcelos G, Rodrigues H, Correia M, Lourenço PB	2017
2	<i>Tribal indigenous knowledge of tsunamic hazard prone areas in disaster reducing risk with particular study on Simeuleu Island Aceh and other islands offshore west of Sumatra</i> [7]	Kurnio, H, Fekete A, Garschagen M	2017
3	<i>Assessment of the efficiency of traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture</i> [8]	Ortega J, Vasconcelos G, Rodrigues H, Correia M	2018
4	<i>Vernacular schist farm walls: Materials, construction techniques and sustainable rebuilding solutions</i> [9]	Barroso CE, Oliveira DV, Ramos LF	2018
5	<i>Building resilience: Knowledge, experience and perceptions among informal construction stakeholders</i> [10]	Chmutina K, Rose J	2018
6	<i>A vulnerability index formulation for the seismic vulnerability assessment of vernacular architecture</i> [11]	Ortega J, Vasconcelos G, Rodrigues H, Correia M	2019
7	<i>The integration of indigenous knowledge for disaster risk reduction practices through scientific knowledge: Cases from Mentawai Islands, Indonesia</i> [12]	Zulfadrim Z, Toyoda Y, Kanegae H	2019
8	<i>Resilience learning and indigenous knowledge of earthquake risk in Indonesia</i> [13]	Kurnio H, Fekete A, Naz F, Norf C, Jüpner R	2021
9	<i>Embodied energy and CO 2 emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems</i> [14]	Pakdel A, Ayatollahi H, Sattary S,	2021
10	<i>Qualifying the earthquake resilience of vernacular masonry buildings along the Himalayan arc</i> [15]	Bothara J, Ingham J, Dizhur D,	2022
11	<i>Post-earthquake housing recovery with traditional construction: A preliminary review</i> [16]	Wang J, Edward Ng Y.Y,	2023



Gambar 2. Lokasi Penelitian Rumah Tradisional Bolon



Gambar 3. Wujud Rumah Bolon Batak Toba di Kabupaten Toba Samosir

Tahap ketiga berupa analisis eksperimental dengan simulasi menggunakan perangkat lunak SAP2000 guna menguji konsep tektonika tahan gempa yang telah dirumuskan, khususnya pada aspek ketahanan deformasi bangunan. Model simulasi yang digunakan merupakan pendekatan penyederhanaan dari kondisi struktur Rumah Bolon. Simulasi dilakukan pada dua kondisi: (1) dikenai beban hidup dan mati, serta (2) dikenai beban hidup, mati dan beban gempa. Beberapa aspek seperti kondisi sambungan *interlocking*, kualitas material kayu lokal, serta distribusi massa dianggap homogen untuk memungkinkan analisis numerik. Oleh karena itu, hasil simulasi tidak dimaksudkan merepresentasikan perilaku struktur secara eksak, tetapi untuk mengevaluasi kecenderungan deformasi dan distribusi gaya dalam kerangka sistem struktur tradisional. Keterbatasan model mencakup idealisasi sambungan sebagai elemen kaku semi-fleksibel serta pengabaian terhadap variasi beban non-struktural dekoratif.

Analisis mencakup perhitungan kekuatan, gaya, momen, serta gaya lainnya yang bekerja pada sambungan struktural, termasuk evaluasi defleksi. Defleksi mengacu pada perubahan bentuk atau pergeseran yang terjadi pada sambungan struktural ketika dikenai beban atau gaya eksternal. Saat struktur terhubung melalui sambungan, beban yang bekerja pada struktur akan menghasilkan momen, gaya geser dan gaya normal di sambungan tersebut. Sebagai akibatnya, sambungan struktural akan mengalami perubahan bentuk (deformasi) yang sering disebut sebagai defleksi. Defleksi yang terlalu besar dapat mengakibatkan ketidakstabilan struktur, kegagalan sambungan atau kerusakan pada elemen struktur lainnya. Sistem perubahan bentuk ini biasanya diukur dengan menghitung perubahan posisi dari titik awal benda atau perubahan sudut akibat beban gempa yang diberikan. Defleksi yang diuji adalah defleksi terhadap beban mati bangunan. Dalam permodelan yang dilakukan, jenis sambungan pada Rumah Bolon diasumsikan sebagai sambungan bongkar pasang.

Hal yang pertama kali dilakukan adalah menentukan respons spektrum, kemudian menentukan beban mati dan beban hidup lalu melakukan simulasi di SAP 2000. Respons spektrum adalah respons struktur terhadap rangkaian beban seismik. Respons spektrum ini memperhitungkan gaya gempa yang harus ditahan oleh struktur. Respons struktur terhadap beban seismik dianalisis menggunakan spektrum respons

gempa untuk bangunan kategori risiko I, dengan faktor keutamaan gempa (I_e) sebesar 1,0.

Dalam menemukan respons spektrum selanjutnya harus menentukan koefisien modifikasi respons (R^a). Koefisien modifikasi respons (R^a) adalah faktor yang digunakan dalam analisis untuk memperhitungkan pengaruh karakteristik khusus suatu struktur dalam merespons beban lateral seperti beban gempa. Koefisien modifikasi respons (R^a) ditetapkan sebesar 1,5, menyesuaikan dengan karakteristik rangka kayu Rumah Bolon. Perhitungan gaya gempa dilakukan menggunakan rumus $F = 9,8 \times I_e / R^a$, sehingga diperoleh nilai $F = 6,54 \text{ m/s}^2$ sebagai gaya gempa yang harus ditahan oleh struktur.

Beban mati (*dead load*) mencakup berat elemen struktural seperti kolom, balok, dinding, lantai dan atap. Beban mati ini dianggap sebagai beban konstan dan tidak berubah seiring waktu, karena tidak dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti perubahan cuaca atau penggunaan ruang. Sedangkan beban hidup (*live load*) adalah beban yang disebabkan oleh kegiatan manusia, peralatan atau materi yang bergerak atau dapat berubah secara dinamis di atas atau di dalam struktur. Pada simulasi, beban mati dihitung berdasarkan berat jenis kayu sebesar $0,000665 \text{ kg/cm}^3$ sebagai material struktur Rumah Bolon, sedangkan beban hidup diasumsikan di semua ruang kecuali tangga sebesar $0,00192 \text{ kg/cm}^2$ sesuai standar hunian rumah tinggal.

Pendekatan kombinasi antara kajian literatur, observasi lapangan, dan simulasi komputer dipilih untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai kinerja bangunan tradisional terhadap bencana gempa bumi. Kajian *systematic literature review* memungkinkan identifikasi kesenjangan pengetahuan dan praktik terbaik dalam ketahanan bangunan tradisional terhadap gempa, sebagaimana ditunjukkan oleh Morante-Carballo *et al.* [17] dan Zhang & Zhao [18]. Observasi lapangan krusial dilakukan untuk memverifikasi performa bangunan secara empiris, seperti ditunjukkan oleh Tatar *et al.* [19] dan Chen *et al.* [20] melalui studi kasus serupa. Sementara itu, simulasi komputer memungkinkan analisis mendalam terhadap respons struktural, sebagaimana dilakukan oleh Zhang & Zhao [18] serta Urlainis & Shohet [21]. Melalui kombinasi ketiga pendekatan ini, penelitian mampu menyajikan analisis yang utuh dan berbasis data empiris mengenai ketahanan tektonika arsitektur tradisional Batak Toba terhadap bencana gempa.

Hasil

Kaidah tektonika arsitektur tradisional tahan gempa



Berdasarkan kajian literatur terdahulu [6] - [16], kaidah tektonika arsitektur tradisional yang tanggap terhadap bencana gempa terdiri atas empat komponen utama, yaitu struktur [6], [8], [9], [12], [13], konstruksi [6], [8], [12], [15], [16], sambungan [6], [8], [9], [11], [12], serta spesifikasi material [6], [8], [9], [12], [13]. Masing-masing komponen memiliki ciri khas yang membedakan perannya dalam ketahanan bangunan terhadap gempa bumi.

Komponen struktur ditandai dengan ciri tipe dan jenis struktur yang berfungsi sebagai kerangka utama bangunan [6], [8]. Sementara itu, konstruksi memiliki karakteristik terkait beban [6], [8] serta teknik pemasangan elemen-elemen bangunan [9], [12], [13], [15], [16] yang berperan penting dalam distribusi gaya gempa. Sambungan mencerminkan ragam pertemuan antar elemen tektonika [6], [8], [9], [11], [12], [13], yang menentukan kekakuan dan fleksibilitas sistem sambungan untuk meredam getaran. Sedangkan spesifikasi material berfokus pada daya tahan material terhadap gempa [10], [13] dan penggunaan material khas lokal [13], [15], [16], yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan setempat.



Selain komponen, teknik tektonika tradisional juga meliputi aspek ketahanan dan nilai kerentanan terhadap gempa. Teknik ketahanan mencakup upaya peningkatan daya tahan struktur [6], [7], [14], [15] serta menjaga kestabilan daya tahan terhadap beban gempa berulang [6], [7]. Sementara itu, teknik pengelolaan nilai kerentanan dilakukan melalui pengujian performa struktur [11] dan penerapan panduan pedoman konstruksi [13].

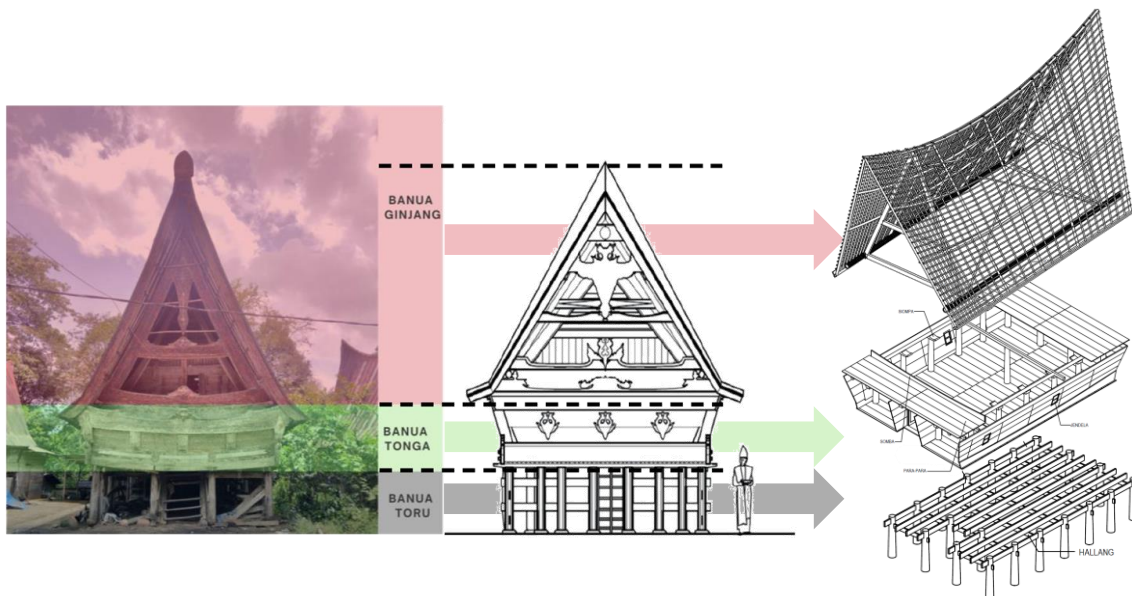
Kaidah komponen dan teknik tersebut dirumuskan melalui kajian *systematic literature review*, dan diterapkan secara spesifik pada kasus rumah tradisional Batak Toba. Penerapan kaidah komponen tektonika tahan gempa pada rumah tradisional Batak Toba ditunjukkan dalam Tabel 2, yang mencakup aspek tipe dan jenis struktur, karakter beban, teknik pemasangan, ragam pertemuan elemen tektonika, serta spesifikasi material khas. Sementara itu, Tabel 3 memperlihatkan penerapan teknik tektonika tahan gempa melalui peningkatan dan kestabilan daya tahan, serta pengelolaan nilai kerentanan melalui pengujian dan pedoman teknis.

Tabel 2. Penerapan kaidah komponen tektonika tahan gempa.

Komponen	Struktur	Konstruksi	Sambungan	Material
Rumah Tradisional Batak Toba				
Kaidah	Tipe dan jenis struktur	Karakter beban Teknik pemasangan	Ragam pertemuan elemen tektonika	Spesifikasi Material khas

Tabel 3. Penerapan kaidah teknik tektonika tahan gempa.

Teknik	Ketahanan	Nilai kerentanan
Rumah Tradisional Batak Toba		
Kaidah	Peningkatan daya tahan Kestabilan daya tahan	Pengujian Panduan pedoman



Gambar 4. Struktur Rumah Bolon

Konsep tektonika tahan gempa rumah tradisional Batak Toba

Konsep tektonika arsitektur tradisional tahan gempa pada rumah Batak Toba mencakup dua prinsip utama, yaitu konsep ketahanan dan kestabilan struktur, konstruksi, serta sambungan. Konsep ketahanan berfokus pada bagaimana komponen struktur-konstruksi-sambungan mampu menahan beban gempa, sedangkan konsep kestabilan menitikberatkan pada kemampuan sistem tersebut menjaga keseimbangan dan meredam getaran tanpa merusak struktur bangunan.

Dalam konsep ketahanan, tektonika struktur rumah Batak Toba dibagi menjadi tiga bagian besar, yaitu kepala, badan, dan kaki, yang masing-masing memiliki komponen saling terhubung dari bagian dasar hingga ke bagian puncak (Gambar 4). Proses pembangunan rumah Batak Toba diawali dengan pemilihan kayu melalui teknik *martik-tik*, yakni menyusun dan memukul kayu untuk mendengarkan resonansi bunyi sebagai indikator kualitas material. Tiang-tiang utama didirikan di atas pondasi batu *ojahan* yang bersifat dangkal, hanya diletakkan di permukaan tanah tanpa kedalaman signifikan. Sebelum penempatan tiang, dilakukan pelapisan ijuk di atas batu *ojahan* untuk meredam getaran gempa serta mencegah pelapukan. Ijuk ini juga berfungsi sebagai elemen transisi antara kolom dan pondasi, sekaligus membantu meratakan lantai.

Tiang-tiang rumah berperan sebagai pemikul beban utama, biasanya menggunakan kayu Sibagure. Struktur ini diperkuat dengan komponen *hallang* dan *pamogang* untuk menahan beban lateral akibat gempa.

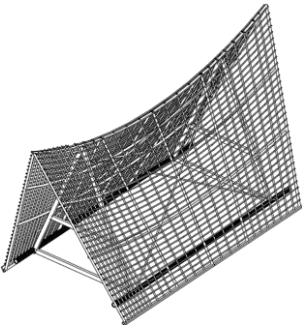
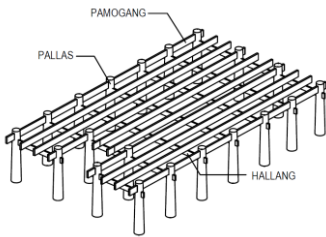
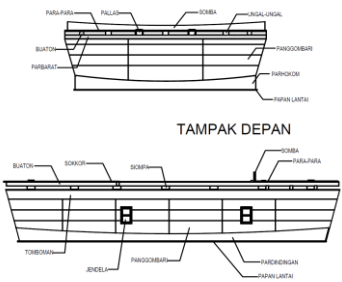
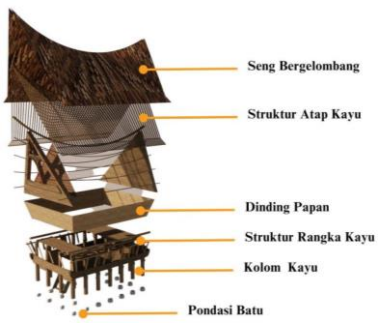
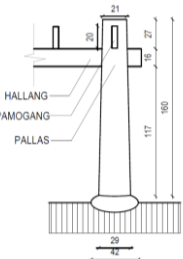
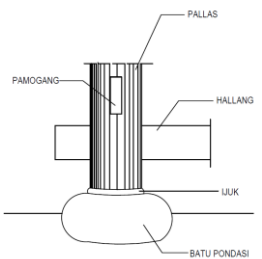
Dinding rumah terbuat dari kayu Simartolu, yang disatukan dengan sistem sambungan pasak atau diikat, memperkuat ikatan antar elemen. Komponen dinding (*pardindingan*) dipasang langsung di atas lantai kayu dan dihubungkan dengan *parhongkom* menggunakan *hansing-hansing* sebagai elemen pengikat tambahan. Detail elemen dapat dilihat pada Tabel 4.

Struktur atap rumah Batak Toba terdiri dari penutup atap, kerangka atap (*urur*), dan balok penghubung dengan struktur dinding di bawahnya. Dahulu, penutup atap terbuat dari bahan alami seperti ijuk sebagai material utama, namun seiring waktu bahan tersebut telah digantikan oleh seng.

Diawali dengan pembuatan *sibong-bongari* (bidang segitiga bagian depan) dan menentukan kemiringan dari elemen struktur tersebut. Selanjutnya dilakukan pemasangan *bukulan* (bagian lengkung pada puncak atap) dari kayu Sibagure sebagai tumpuan utama bagi konstruksi atap. Untuk menentukan kelengkungan *bukulan* digunakan bantuan tali penarik yang diikat pada lantai. Kerangka atap (*urur*) lalu dibuat dan dikaitkan pada balok dan diperkuat dengan tali rotan serta ijuk. Selain sebagai penyalur beban atap, sistem ini juga berfungsi untuk mengikat bagian atas tiang-tiang rumah (*pallas*) dengan menggunakan sambungan pasak.

Pada masa lalu, sebelum ijuk dipasang sebagai penutup atap, permukaan *urur* dilapisi dengan *lais-lais*. *Lais-lais* dibuat dari bilah-bilah bambu yang disusun rapat secara horizontal agar lapisan ijuk dapat tertahan dengan baik. Lapisan ijuk kemudian diikat dengan jarum bambu.

Tabel 4. Ketahanan dan kestabilan tektonika tahan gempa Rumah Batak Toba.

Pengamatan visual	Struktur	Konstruksi	Sambungan
Ketahanan	 <p>Atap</p>	 <p>Balok (Hallang, Pamogang)</p>	 <p>Dinding (Panggombari, Pardindingan)</p>
Kestabilan	 <p>Seng Bergelombang Struktur Atap Kayu Dinding Papan Struktur Rangka Kayu Kolom Kayu Pondasi Batu</p>	 <p>Kolom (Pallas)</p>	 <p>Pondasi umpak (Batu Ojahan)</p>

Secara keseluruhan, konstruksi atap Rumah Bolon tidak menggunakan kuda-kuda konvensional, melainkan memanfaatkan konstruksi bidang atap dengan ikatan angin silang di bawahnya untuk memperkuat kekakuan lateral dan menambah integritas struktur atap.

Sistem sambungan dan pondasi Rumah Bolon menggunakan pondasi umpak yang bersentuhan langsung dengan kolom kayu di atas permukaan tanah. *Pardindingan* yang berat diletakkan di atas lantai dan dihubungkan dengan *parhongkom* menggunakan *hansing-hansing*. Komponen *panggombari* berfungsi menghubungkan *pardindingan* dengan elemen lainnya, menciptakan integrasi struktural yang kokoh.

Konsep kestabilan pada struktur rumah Batak Toba diterapkan melalui sistem bongkar pasang (*interlocking*) pada struktur kaki dan badan, sedangkan pada atap digunakan konstruksi bidang atap dengan ikatan angin silang di bawahnya. Bobot struktur kaki dan badan lebih berat dibandingkan atap, sehingga mampu mereduksi getaran tanpa merusak komponen utama. Sistem ini dirancang sebagai respons terhadap kondisi geografis rumah Bolon yang berada di wilayah rawan gempa.

Pembagian struktur dalam rumah Bolon mencerminkan pembagian gaya statis, dengan struktur kaki (*banua toru*) menopang keseluruhan

bangunan, struktur badan (*banua tonga*) sebagai pembungkus, dan struktur kepala (*banua ginjang*) sebagai pelindung yang menaungi keseluruhan dari badan dan kaki. Ketiga bagian ini membentuk kesatuan sistem struktural yang integral dan berfungsi sebagai rumah adat masyarakat Batak Toba.

Dari sisi konstruksi, Rumah Bolon memiliki dua jenis balok utama yang menopang lantai dan berorientasi utara-selatan. Komponen *pallas* dirancang khusus agar *pamogang* dan *hallang* dapat terkunci tanpa penggunaan paku atau sekrup. Kolom-kolom berupa gelondongan kayu dipasang vertikal dengan pola grid tertentu untuk menopang beban serta ornamen bangunan. Terdapat 20 *pallas* sebagai penopang utama lantai, dan satu *pallas* tambahan di ruang dalam sebagai penopang *sokkor*. Sistem ini menunjukkan efisiensi teknik konstruksi tradisional, ditinjau dari kemampuan sistem tersebut menggunakan bahan lokal seminimal mungkin namun menghasilkan struktur yang kokoh dan adaptif terhadap gaya lateral. Efisiensi ini tercermin pada penggunaan elemen-elemen struktural yang dapat dibongkar-pasang, serta sambungan fleksibel yang memungkinkan pergerakan relatif tanpa menimbulkan kerusakan permanen.

Sistem sambungan juga terlihat pada bagian dinding, di mana *pardindingan* yang berat disatukan dengan *parhongkom* menggunakan *hansing-hansing*. Komponen *panggombari* menghubungkan

pardindingan dengan elemen struktural lainnya, memperkuat kesatuan struktur.

Hasil pengamatan visual terhadap rumah Batak Toba menunjukkan penerapan prinsip ketahanan dan kestabilan dalam komponen struktur, konstruksi, dan sambungan secara terpadu, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 4.

Kinerja tektonika arsitektur tradisional tangguh bencana: studi kasus Rumah Bolon

Defleksi merupakan perubahan bentuk atau pergeseran pada sambungan struktural akibat beban atau gaya eksternal yang bekerja pada struktur. Ketika struktur dihubungkan melalui sambungan, gaya yang bekerja, seperti momen, gaya geser, dan gaya normal, akan menyebabkan deformasi pada titik-titik sambungan tersebut. Defleksi yang berlebihan dapat mengganggu kestabilan struktur, menyebabkan kegagalan sambungan, atau bahkan merusak elemen struktural lainnya. Oleh karena itu, defleksi menjadi parameter penting dalam menilai kinerja struktural, khususnya dalam menghadapi beban gempa. Pengukuran defleksi umumnya dilakukan dengan menghitung perubahan posisi titik awal atau perubahan sudut akibat gaya yang diterima. Pada penelitian ini, defleksi yang diuji berfokus pada beban mati bangunan.

Simulasi SAP2000 digunakan untuk mengkaji kinerja tektonika sistem struktur dan konstruksi Rumah Bolon. Analisis difokuskan pada elemen struktural utama, yaitu tiang, balok utama, dan rangka atap. Sementara itu, elemen non-struktural seperti dinding kayu, papan lantai, dan penutup atap dihitung sebagai beban tambahan tanpa mempengaruhi analisis kekuatan struktur utama. Simulasi dilakukan pada titik-titik krusial dalam berbagai fase konstruksi, meliputi fase struktur terpasang hingga penerapan beban hidup dan beban gempa pada struktur.

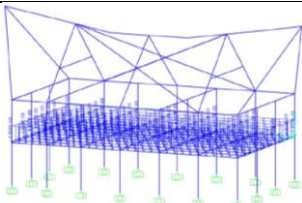
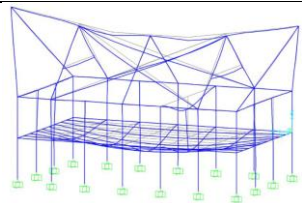
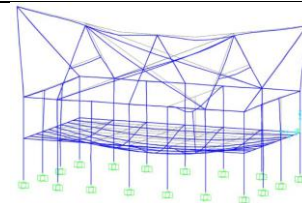
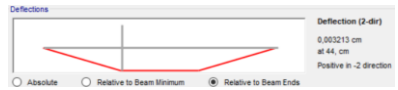
Dalam pemodelan ini, sambungan Rumah Bolon diasumsikan menggunakan sistem bongkar pasang (*interlocking*), sesuai dengan karakteristik konstruksi tradisionalnya.

Uji kinerja tektonika dilakukan melalui dua fase pengujian (Tabel 5). Fase pertama mengamati defleksi pada balok akibat beban hidup dan mati. Fase kedua mengkombinasikan beban mati, beban hidup, serta beban gempa.

Pada fase pertama, ketika struktur dikenai beban hidup dan mati, terjadi defleksi pada konstruksi sekitar 0,003 cm dengan jarak 44 cm dari ujung balok lantai. sesuai dengan SNI 03-1729-2002 (Tata Cara Perencanaan Struktur Kayu). Ambang batas defleksi yang diizinkan untuk balok lantai kayu jati dengan lebar 15 cm dan tinggi 30 cm adalah sekitar 0,60 cm, sehingga 0,003 cm merupakan angka yang sangat kecil dan mencerminkan performa struktural yang baik dan aman. Sedangkan pada fase kedua, tidak terjadi perbedaan yang signifikan setelah ditambahkan beban gempa searah sumbu x dan y.

Hasil uji pada kedua fase tersebut menunjukkan bahwa beban mati memiliki pengaruh paling dominan terhadap defleksi yang terjadi pada Rumah Bolon. Meski demikian, perbedaan defleksi antara fase beban mati dan fase gempa tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan oleh sistem *interlocking* pada sambungan struktural Rumah Bolon, yang secara efektif meredam dan mendistribusikan gaya gempa. *Interlocking* memungkinkan pergeseran mikro antar elemen kayu, sehingga gaya tidak terakumulasi pada titik sambungan tunggal. Mekanisme ini berperan sebagai sistem disipasi energi yang menyebarkan gaya lateral secara bertahap dan adaptif. Deformasi umumnya terjadi di bagian sambungan balok pada struktur bawah, terutama karena tidak adanya penopang kolom di bagian tengah bentang sejajar yang cukup panjang. Namun demikian, besarnya defleksi masih

Tabel 5. Defleksi pada balok ketika diberi beban mati, beban hidup dan beban gempa.

Fase	Model awal dengan beban hidup	Dikenai beban hidup dan mati	Dikenai beban hidup, mati, dan gempa
Model Uji			
Defleksi	-		Tidak terjadi perbedaan yang signifikan setelah dikenai beban gempa searah sumbu x dan y.

dalam kategori aman dan tidak mengganggu kestabilan struktur secara keseluruhan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Rumah Bolon memiliki performa struktural yang baik dalam menghadapi beban mati, hidup, dan gempa. Nilai defleksi yang rendah menunjukkan tingkat stabilitas dan keamanan konstruksi yang memadai, sehingga mampu memberikan kenyamanan serta ketahanan terhadap bencana gempa sesuai dengan karakteristik tektonika arsitektur tradisional.

Pembahasan

Keunggulan sistem *interlocking* Rumah Bolon dalam mereduksi defleksi seismik

Salah satu temuan utama penelitian ini adalah efektivitas sistem *interlocking* pada Rumah Bolon dalam mereduksi deformasi akibat beban gempa. Dibandingkan dengan sistem sambungan modern yang cenderung kaku, sambungan *interlocking* secara alami mampu mendistribusikan energi gempa secara merata, mengurangi konsentrasi tegangan pada titik-titik lemah [22]. Mekanisme ini memungkinkan setiap komponen struktur untuk bergeser secara relatif tanpa menyebabkan kerusakan.

Bentuk geometri dan tata letak elemen-elemen struktural Rumah Bolon menciptakan jalur distribusi beban lateral yang melibatkan banyak komponen secara bersamaan [23]. Hal ini meningkatkan integritas struktural secara keseluruhan karena beban gempa tidak terkonsentrasi pada satu titik sambungan saja, melainkan tersebar melalui interaksi antar elemen. Dengan demikian, defleksi akibat beban mati tercatat hanya sebesar 0,003 cm, jauh di bawah batas aman 0,60 cm (SNI 03-1729-2002).

Sistem ini juga mencerminkan prinsip material tradisional yang mengutamakan fleksibilitas dan disipasi energi. Kayu sebagai material utama memiliki karakteristik viskoelastis yang mampu menyerap dan melepaskan energi secara bertahap. Dalam konteks Rumah Bolon, adaptasi terhadap getaran gempa dilakukan bukan dengan menahan gaya secara kaku, tetapi dengan mengalihkan energi melalui pergerakan terbatas di titik sambungan, sehingga meminimalkan risiko kegagalan struktural mendadak [22].

Beban mati sebagai faktor dominan deformasi dan peran *interlocking* dalam mitigasinya

Beban mati merupakan faktor dominan dalam mempengaruhi deformasi struktur Rumah Bolon. Hal ini berkaitan dengan konfigurasi strukturalnya yang menggunakan elemen berat dan kaku sebagai

komponen utama [24]. Interaksi antara gaya vertikal akibat beban mati dengan gaya lateral gempa dapat memperbesar defleksi bila tidak ditangani dengan baik. Namun, desain *interlocking* Rumah Bolon mampu mendistribusikan beban secara lebih merata, sehingga dampak beban mati terhadap deformasi dapat diminimalkan [23].

Selain itu, tata letak struktural Rumah Bolon yang terdiri dari unit-unit saling terhubung memungkinkan redistribusi beban mati, sehingga tidak ada titik tunggal yang menanggung beban secara berlebihan. Prinsip ini sejalan dengan pendekatan struktur beton bertulang di bangunan modern, di mana elemen-elemen pengikat berfungsi menyebar gaya secara lebih efisien [25]. Akibatnya, defleksi akibat kombinasi beban tetap rendah dan kestabilan bangunan tetap terjaga.

Kontribusi sambungan pasak, tata tektonika, dan pondasi umpak terhadap kinerja seismik

Sambungan pasak tradisional Rumah Bolon memainkan peran penting dalam meningkatkan ketahanan bangunan terhadap kombinasi beban. Berbeda dengan sambungan modern yang kaku, sambungan pasak bersifat fleksibel namun tetap kuat, memungkinkan gerakan relatif antar komponen saat gempa terjadi [26], [27]. Sifat ini memungkinkan sambungan menyerap gaya torsi dan geser secara efisien, sehingga mencegah akumulasi tegangan berlebih di titik tertentu yang berpotensi menyebabkan keruntuhan [28].

Selain itu, konfigurasi tektonika Rumah Bolon yang terdiri dari kepala (atap), badan (dinding), dan kaki (pondasi) menciptakan jalur distribusi beban gempa yang efisien. Beban lateral dari atap diteruskan ke elemen vertikal melalui sistem sambungan pasak, kemudian disalurkan ke pondasi umpak yang memisahkan struktur dari tanah, sehingga energi gempa didistribusikan ke seluruh sistem struktur secara bertahap. Jalur ini dikenal sebagai load path dan berfungsi menghindari konsentrasi tegangan di titik-titik kritis [29]. Daya serap energi meningkat melalui interaksi komponen struktural yang tersusun berlapis-lapis, sehingga deformasi akibat gempa dapat diredam secara efektif.

Pondasi umpak sebagai elemen penopang juga berfungsi meredam getaran gempa dengan menciptakan jarak pemisah antara struktur dan tanah. Sistem ini berfungsi sebagai peredam alami, memungkinkan struktur untuk bergerak relatif terhadap tanah saat terjadi gempa tanpa mentransfer gaya secara langsung ke bangunan [30]. Dengan

demikian, kombinasi sambungan pasak, konfigurasi tektonika, dan pondasi umpak menciptakan mekanisme disipasi energi yang terintegrasi.

Implikasi desain Rumah Bolon terhadap kebijakan dan strategi mitigasi bencana

Keberhasilan Rumah Bolon dalam menjaga integritas struktural di bawah beban gempa menunjukkan bahwa kearifan lokal mampu menawarkan solusi efektif yang relevan dengan prinsip rekayasa modern [31]. Integrasi material alami seperti kayu dengan sistem sambungan fleksibel menciptakan sinergi antara kekuatan struktural dan kemampuan disipasi energi, yang sangat dibutuhkan dalam konteks mitigasi bencana.

Pondasi umpak yang sederhana namun efektif menjadi contoh bagaimana solusi tradisional dapat mengatasi tantangan seismik dengan pendekatan berbasis adaptasi lingkungan. Konsep ini membuktikan bahwa tidak selalu diperlukan teknologi tinggi untuk mencapai ketahanan gempa, namun pemahaman mendalam terhadap perilaku material dan kondisi lokal dapat menjadi kunci [28].

Meskipun demikian, penerapan strategi tektonika Rumah Bolon pada tipologi rumah tradisional lain di Indonesia harus mempertimbangkan keragaman lingkungan, budaya, dan kondisi geoteknik yang berbeda. Adaptasi desain menjadi kunci agar strategi ini dapat diterapkan secara kontekstual dan berkelanjutan [32].

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan kaidah, memformulasikan konsep, dan menguji kinerja tektonika arsitektur tradisional tahan gempa melalui studi kasus Rumah Bolon Batak Toba sebagai representasi kearifan lokal dalam mitigasi risiko bencana gempa. Kaidah tektonika tahan gempa berdasarkan *systematic literature review* mencakup komponen struktur, konstruksi, sambungan, spesifikasi material serta ketahanan dan nilai kerentanan. Konsep tektonika tahan gempa berdasarkan observasi lapangan terdiri atas konsep ketahanan komponen dan kestabilan struktur-konstruksi-sambungan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen struktur, konstruksi, dan sambungan Rumah Bolon mampu mendistribusikan gaya gempa secara efektif melalui penerapan prinsip *interlocking* pada bagian badan dan adanya ikatan angin silang pada bagian atap. Nilai defleksi maksimum akibat beban mati, hidup, dan

gempa sebesar 0,003 cm. Seluruh nilai tersebut berada jauh di bawah batas aman 0,6 cm sesuai SNI 03-1729-2002, menegaskan bahwa Rumah Bolon memiliki performa struktural yang aman terhadap beban gempa. Analisis variasi beban menunjukkan bahwa beban mati merupakan faktor dominan dalam mempengaruhi defleksi struktur, sementara beban gempa menunjukkan dampak minimal berkat peran sistem sambungan *interlocking* yang memitigasi deformasi secara efektif.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada lingkup studi kasus yang hanya mencakup Rumah Bolon di satu lokasi, sehingga penelitian lanjutan direkomendasikan untuk memperluas cakupan ke berbagai tipologi rumah tradisional Indonesia guna memperkaya model tektonika tangguh bencana berbasis kearifan lokal.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Universitas Brawijaya melalui Hibah Penelitian Dasar Pemula (PDP) Tahun 2024.

Daftar Pustaka

- [1] J. Mercer *et al.*, "Culture and disaster risk reduction: Lessons and opportunities," *Environmental Hazards*, vol. 11, no. 2, pp. 74–95, 2012, doi: 10.1080/17477891.2011.609876.
- [2] J. Weichselgartner and P. Pigeon, "The Role of Knowledge in Disaster Risk Reduction," *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 6, no. 2, pp. 107–116, Jan. 2015, doi: 10.1007/S13753-015-0052-7/FIGURES/2.
- [3] L. Hiwasaki, E. Luna, Syamsidik, and R. Shaw, "Process for integrating local and indigenous knowledge with science for hydro-meteorological disaster risk reduction and climate change adaptation in coastal and small island communities," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 10, pp. 15–27, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.IJDRR.2014.07.007.
- [4] L. J. Vinnell, C. Orchiston, J. Becker, and D. Johnston, "Pathways to Earthquake Resilience: Learning from past events - Resilience to Nature's Challenges," *Australasian Journal of Disaster and Trauma Studies*, vol. 23, no. 2, pp. 35–40, 2019, Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available:

- https://trauma.massey.ac.nz/issues/2019-2/AJDTs_23_2_Editorial.pdf.
- [5] T. Maknun, M. Hasjim, M. Muslimat, and M. Hasyim, "The form of the traditional bamboo house in the Makassar culture: A cultural semiotic study," *Semiotica*, vol. 2020, no. 235, pp. 153–164, 2020, doi: 10.1515/SEM-2017-0162/MACHINEREADABLECITATION/RIS.
- [6] J. Ortega, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, M. Correia, and P. B. Lourenço, "Traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture and local seismic cultures: A literature review," *J Cult Herit*, vol. 27, pp. 181–196, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.CULHER.2017.02.015.
- [7] H. Kurnio, A. Fekete, and M. Garschagen, "Tribal indigenous knowledge of tsunamic hazard prone areas in disaster reducing risk with particular study on Simeuleu Island Aceh and other islands offshore west of Sumatra.," in *Integrative Risk and Security Research*, vol. 2, A. Fekete, M. Garschagen, C. Norf, and C. Stephan, Eds., Cologne: Institute of Rescue Engineering and Civil Protection, TH Köln - University of Applied Sciences, 2017, pp. 51–58.
- [8] J. Ortega, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, and M. Correia, "Assessment of the efficiency of traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture," *Eng Struct*, vol. 173, pp. 1–27, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.101.
- [9] C. E. Barroso, D. V. Oliveira, and L. F. Ramos, "Vernacular schist farm walls: materials, construction techniques and sustainable rebuilding solutions," *Journal of Building Engineering*, vol. 15, pp. 334–352, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.JOBE.2017.12.001.
- [10] K. Chmutina and J. Rose, "Building resilience: Knowledge, experience and perceptions among informal construction stakeholders," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 28, pp. 158–164, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.IJDRR.2018.02.039.
- [11] J. Ortega, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, and M. Correia, "A vulnerability index formulation for the seismic vulnerability assessment of vernacular architecture," *Eng Struct*, vol. 197, p. 109381, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109381.
- [12] Z. Zulfadrim, Y. Toyoda, and H. Kanegae, "The Integration of Indigenous Knowledge for Disaster Risk Reduction Practices through Scientific Knowledge: Cases from Mentawai Islands, Indonesia," *International Journal of Disaster Management*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, Jul. 2019, doi: 10.24815/ijdm.v2i1.13503..
- [13] H. Kurnio, A. Fekete, F. Naz, C. Norf, and R. Jüpner, "Resilience learning and indigenous knowledge of earthquake risk in Indonesia," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 62, p. 102423, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.IJDRR.2021.102423.
- [14] A. Pakdel, H. Ayatollahi, and S. Sattary, "Embodied energy and CO2 emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems," *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102310, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102310.
- [15] J. Bothara, J. Ingham, and D. Dizhur, "Qualifying the earthquake resilience of vernacular masonry buildings along the Himalayan arc," *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104339, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104339.
- [16] J. Wang and Y. Y. E. Ng, "Post-earthquake housing recovery with traditional construction: A preliminary review," *Progress in Disaster Science*, vol. 18, p. 100283, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.PDISAS.2023.100283.
- [17] F. Morante-Carballo, B. Pinto-Ponce, E. Santos-Baquerizo, J. Briones-Bitar, É. Berrezueta, and P. Carrión-Mero, "Systematic Review on Seismic Hazards in the Coastal Regions of the Pacific Ring of Fire," *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2024, doi: 10.18280/ijssse.140526.
- [18] T. Zhang and J. Zhao, "Seismic Resilience Assessment of a Single-Layer Reticulated Dome During Construction," *Advanced Steel Construction*, Vol. 19, No. 1, pp. 77–85, 2023, doi: 10.18057/ijasc.2023.19.1.10.

- [19] J. Tatar *et al.*, "Performance of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Retrofits in the 2018 Cook Inlet Earthquake in Anchorage, Alaska," *Earthquake Spectra*, 2021, doi: 10.1177/87552930211028609.
- [20] M. C. Chen *et al.*, "Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance During Earthquakes: Part I - Specimen Description, Test Protocol, and Structural Response," *Earthquake Spectra*, 2016, doi: 10.1193/012414eqs016m.
- [21] A. Uralinis and I. M. Shohet, "A Comprehensive Approach to Earthquake-Resilient Infrastructure: Integrating Maintenance With Seismic Fragility Curves," *Buildings*, 2023, doi: 10.3390/buildings13092265.
- [22] F. Lecci, C. Mazzoli, C. Bartolomei, and R. Gulli, "Design of Flat Vaults With Topological Interlocking Solids," *Nexus Netw J*, 2020, doi: 10.1007/s00004-020-00541-w.
- [23] S. Poudel and T. R. Gyawali, "Structural Performance of Symmetric and Asymmetric Plan Irregular Building Structures: A Comparative Analysis of Conventional and Grid Slab Systems," 24 March 2025, PREPRINT (Version 1), *Research Square*, doi: 10.21203/rs.3.rs-5572077/v1.
- [24] C.-C. Yip, J. Y. Wong, M. Amran, R. Fediuk, and N. I. Vatin, "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Structure With Shock Absorber Damper Under Pseudo-Dynamic Loads," *Materials*, 2022, doi: 10.3390/ma15072688.
- [25] S. Si, Z. Jing-cai, and C. Zhang, "Seismic Responses and Overturning Resistance Capacity of Base-Isolated Structures Under the Influence of Pounding Interactions With Adjacent Structures," *Buildings*, 2024, doi: 10.3390/buildings14113485.
- [26] E. Poletti, G. Vasconcelos, J. M. Branco, and A. M. Koukouviki, "Performance Evaluation of Traditional Timber Joints Under Cyclic Loading and Their Influence on the Seismic Response of Timber Frame Structures," *Constr Build Mater*, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.122.
- [27] J. Xue, D. Xu, and H. Xia, "Experimental Study on Seismic Performance of Through-Tenon Joints With Looseness in Ancient Timber Structures," *International Journal of Architectural Heritage*, 2018, doi: 10.1080/15583058.2018.1552996.
- [28] R. R. Hussain, "Editorial," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 2017, doi: 10.1680/jstbu.2017.170.10.705.
- [29] H. Tanahashi and Y. Suzuki, "Review on the Mechanical Models and Formulations of Embedment of Traditional Timber Joints in Japan," *Japan Architectural Review*, 2020, doi: 10.1002/2475-8876.12137.
- [30] F. Amin *et al.*, "Impact of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets and Bolt Diameter on the Seismic Performance Enhancement of Steel Beam-Column Joints," *Engineering Reports*, 2024, doi: 10.1002/eng2.13022.
- [31] D. L. Hadinugroho and D. D. Harisdani, "The Local Wisdom of Ruma Bolon Simalungun Supports Environmental Sustainability," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1452/1/012005.
- [32] M. Rahim and I. Abbas, "Characteristics of Buginese Traditional Houses and Their Response to Sustainability and Pandemics," *E3s Web of Conferences*, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132810015.