

Pengembangan Sistem Konstruksi Modular Hybrid Berbasis Kayu Lokal dan Limbah Tambang Nikel untuk Rumah Panggung Adaptif terhadap Beban Seismik di Wilayah Sulawesi Tenggara

Armin Aryadi*, Isramyano Yatjong, Arif, Nurfasiha, Nasrul, Sahril

Universitas Sembilanbelas November Kolaka, Indonesia

Email: civilarchitets.aryasi@gmail.com*, yatjong.isramyano@gmail.com,

arif.ftp@gmail.com, nurfasiha.fst@gmail.com

Keywords:

Hybrid Modular Stilt House; Bitti Wood (*Vitex Cofassus*); Nickel Tailings Waste; Seismic Resistance; Local Material Composite

Abstract

This research develops hybrid modular construction system for stilt houses integrating superior local timber, Bitti wood and Teak wood, with nickel tailings waste from PT ANTAM UBPN Kolaka, as an adaptive, earthquake-resistant housing solution in Southeast Sulawesi. The research followed five stages: material characterization, modular design, numerical simulation, experimental testing, and model integration. Bitti wood was selected as the primary material for its density of 0.94 g/cm³, flexural strength of 108.2 MPa, and MOE of 18,600 MPa, exceeding SNI 7973:2013 Class I, while nickel tailings (SiO₂ 48.3%, Fe₂O₃ 22.6%) served as composite filler. Optimum formulation, composite C-6 (50% Bitti wood, 35% tailings, 15% epoxy), yielded compressive strength of 54.5 MPa and flexural strength of 82.4 MPa. A modular system on a 600×600 mm grid with three innovative connections was simulated using SAP2000/ETABS, showing Model B (hybrid) had a 32% higher natural frequency than Model A. Dynamic analysis using the 2018 Palu earthquake record showed Model B reduced interstory drift up to 32.6% and raised the ductility factor from 4.65 to 6.37. A 1:2 scale prototype showed the hybrid portal had a 28.6% higher maximum load and 50% greater cyclic ductility. Shake table testing at 1:10 scale under 0.35g proved the hybrid structure sustained only non-structural damage, while the conventional system collapsed entirely. Economically, the hybrid system cost only 4.2% more yet cut the carbon footprint by up to 10.3%. This research shows that combining Bitti wood, nickel tailings, and modular connections yields a strong, ductile, affordable, and sustainable stilt house

Kata Kunci:

Rumah Panggung Modular Hybrid; Kayu Bitti (*Vitex Cofassus*); Limbah Tailing Nikel; Ketahanan Seismik; Komposit Material Lokal

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan sistem konstruksi rumah panggung modular hybrid yang mengintegrasikan kayu lokal unggulan, yaitu kayu Bitti (*Vitex cofassus*) dan kayu Jati (*Tectona grandis*), dengan limbah tailing nikel dari PT ANTAM UBPN Kolaka, sebagai solusi hunian adaptif dan tahan gempa di Sulawesi Tenggara. Penelitian dilaksanakan melalui lima tahap: karakterisasi material, perancangan sistem modular, simulasi numerik, pengujian eksperimental, dan integrasi model. Kayu Bitti terpilih sebagai material utama karena densitas 0,94 g/cm³, kuat lentur 108,2 MPa, dan modulus elastisitas lentur (MOE) 18.600 MPa, melampaui SNI 7973:2013 kelas I, sedangkan limbah tailing nikel (SiO₂ 48,3%, Fe₂O₃ 22,6%) digunakan sebagai filler komposit. Formulasi optimum komposit C-6 (50% kayu Bitti, 35% tailing nikel, 15% resin epoksi) menghasilkan kuat tekan 54,5 MPa dan kuat lentur 82,4 MPa. Sistem modular berbasis grid 600×600 mm dengan tiga tipe sambungan inovatif

disimulasikan menggunakan SAP2000/ETABS, menunjukkan Model B (hybrid) memiliki frekuensi alami 32% lebih tinggi dibandingkan Model A (konvensional). Analisis respons dinamik gempa Palu 2018 menunjukkan Model B mereduksi simpangan antar lantai hingga 32,6% dan meningkatkan faktor daktilitas dari 4,65 menjadi 6,37. Validasi eksperimental skala 1:2 menunjukkan portal hybrid memiliki beban maksimum 28,6% lebih tinggi dan daktilitas siklik 50% lebih besar. Pengujian meja goyang skala 1:10 pada percepatan 0,35g membuktikan struktur hybrid hanya mengalami kerusakan non-struktural, sedangkan sistem konvensional runtuh total. Dari aspek ekonomi, sistem hybrid hanya 4,2% lebih mahal namun menurunkan jejak karbon hingga 10,3%. Penelitian ini membuktikan integrasi kayu Bitti, limbah tailing nikel, dan sambungan modular menghasilkan struktur rumah panggung yang kuat, daktil, kompetitif, dan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki tingkat kegempaan tinggi karena berada pada pertemuan Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik (Mudzullah Rajif & Syafriani, 2021; Al Rubaiyn et al., 2023), yang membentuk struktur seismotektonik dinamis dengan frekuensi gempa besar yang terus meningkat (Srivastava et al., 2021). Kondisi ini membuat sebagian besar wilayah Indonesia, termasuk Sulawesi Tenggara, berisiko tinggi terhadap gempa bumi. Kolaka khususnya memiliki potensi gempa besar yang mengancam infrastruktur dan permukiman, dengan risiko likuifaksi tinggi terutama pada wilayah endapan aluvial di Konawe Utara (Cendra Jaya & Deniyatno, 2024).

Rumah panggung tradisional di daerah ini selaras dengan budaya Melayu, adaptif terhadap iklim tropis dan kondisi tanah, serta efektif mengurangi risiko banjir dan kelembaban (Azzara et al., 2022), namun kurang efektif menahan beban lateral gempa karena tidak dirancang dengan prinsip rekayasa seismik modern (Aryadi et al., 2024). Integrasi teknologi modern seperti sambungan disipatif dan penambahan sistem penambah kekakuan lateral sangat diperlukan untuk mengatasi hal ini (Iovane et al., 2023; Febriani et al., 2024).

Seiring meningkatnya kebutuhan konstruksi berkelanjutan, limbah nikel kini dimanfaatkan sebagai agregat, panel, dan material komposit karena sifat mekaniknya yang menjanjikan (Kurniati et al., 2023). Ashad & Gunawan (2022) menunjukkan terak nikel sebagai pengganti agregat kasar 23,9% dapat menghasilkan beton berkekuatan hingga $\pm 46,96$ MPa; Haq & Nelfia (2024) menegaskan terak nikel dapat digunakan sebagai agregat halus atau kasar dengan kekuatan optimal pada substitusi sekitar 40%; studi pada Materials (2024) menunjukkan ferronickel slag sebagai pengganti pasir menghasilkan beton dengan kekuatan meningkat 16–20% (Nuruzzaman et al., 2024); dan Sandra et al. (2025) menemukan beton dengan agregat ferronickel slag dan air laut tetap memiliki daya tahan tinggi. Hartami et al. (2022) dan Narciso et al. (2023) juga membuktikan tailing nikel dan limbah nikel dengan serat alami dapat meningkatkan kekuatan tekan beton ringan dan menghasilkan komposit bangunan yang tahan air. Eksplorasi material kayu lokal dan limbah nikel dengan demikian menjadi peluang besar untuk mendukung ekonomi sirkular dan konstruksi hijau (Yildirim et al., 2023).

Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pengembangan rumah panggung modular hybrid yang memadukan konstruksi modular dengan material lokal, menawarkan kecepatan, efisiensi, dan presisi melalui prefabrikasi (Odikamnoro et al., 2022), serta dapat dirancang adaptif terhadap beban lateral dan deformasi dinamis melalui simulasi gempa dan uji eksperimental (Bartoli et al., 2022). Studi tentang penerapan sistem modular hybrid berbahan kayu lokal dan limbah nikel sebagai solusi tahan gempa di Sulawesi Tenggara masih sangat terbatas (Li & Tsavdaridis, 2023), sehingga riset ini penting sebagai langkah awal menuju inovasi arsitektur dan rekayasa struktural yang berkelanjutan. Riset ini relevan dengan Renstra Universitas Sembilanbelas November (USN) Kolaka karena mengangkat potensi lokal

berupa kayu lokal, limbah tambang nikel, dan mitigasi gempa, sekaligus memperkuat peran universitas sebagai pusat inovasi berbasis IPTEKS dan budaya lokal.

Rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana karakteristik fisik dan mekanik kombinasi material kayu lokal dan limbah tambang nikel sebagai elemen konstruksi modular dalam mendukung struktur rumah panggung hybrid; dan (2) bagaimana formulasi desain sambungan modular yang optimal serta kinerja seismik dari sistem struktur rumah panggung hybrid adaptif terhadap gempa berdasarkan simulasi numerik dan uji eksperimental. Penelitian ini dilakukan secara bertahap dan interdisipliner, dimulai dari karakterisasi kayu lokal dan limbah tambang nikel melalui uji mekanik dan ketahanan lingkungan, dilanjutkan dengan formulasi desain modular hybrid berbasis beban gempa, simulasi numerik menggunakan SAP2000/ABAQUS, serta validasi eksperimental melalui uji laboratorium statik dan dinamik terhadap sambungan struktur.

Penelitian rumah tahan gempa di Indonesia umumnya berfokus pada beton bertulang dan rangka kayu konvensional, sementara konstruksi modular yang berpotensi meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan kinerja seismik belum banyak dikembangkan (Wu et al., 2024). Secara global, penelitian sambungan kayu untuk daktilitas berkembang pesat, seperti ulasan Ottenhaus et al. (2021) yang menekankan pentingnya deformasi plastis terkendali, serta studi Li et al. (2024) yang menunjukkan peningkatan kinerja seismik pada sistem timber-concrete composite. Kajian Sasaki et al. (2024) tentang dinding hybrid kayu-baja dengan sambungan tapered mendukung konsep desain modular hybrid, sedangkan penelitian Nelfia et al. (2024) membuktikan limbah nikel sebagai agregat beton berpotensi untuk konstruksi berkelanjutan. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa inovasi sistem konstruksi modular hybrid berbasis kayu lokal dan limbah nikel, dengan desain sambungan tahan deformasi lateral yang divalidasi melalui uji eksperimental dan simulasi numerik berbasis performance-based design.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem konstruksi rumah panggung modular hybrid berbasis kayu lokal unggulan (Bitti dan Jati) dan limbah tailing nikel dari PT ANTAM UBPN Kolaka sebagai solusi hunian adaptif tahan gempa di Sulawesi Tenggara, dengan target khusus mengkarakterisasi sifat fisik-mekanik material, merumuskan komposisi optimum komposit, merancang sistem modular dengan tiga tipe sambungan inovatif, mengevaluasi kinerja seismik melalui simulasi numerik dan uji eksperimental, serta mengintegrasikan seluruh elemen menjadi prototipe yang layak secara teknis, ekonomis, dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritis berupa pengayaan ilmu rekayasa struktur dan teknologi material komposit, verifikasi teori daktilitas dan performance-based design, serta kontribusi pada pengembangan model numerik-eksperimental struktur kayu-komposit di Indonesia, dan manfaat praktis berupa solusi konstruksi tahan gempa berbasis material lokal bagi masyarakat Sulawesi Tenggara, bahan pertimbangan kebijakan konstruksi hijau dan mitigasi bencana bagi pemerintah daerah, sistem modular efisien dan berkelanjutan bagi industri konstruksi dengan peningkatan biaya hanya 4,2% dan penurunan jejak karbon 10,3%, serta referensi bagi peneliti selanjutnya untuk pengujian skala penuh, analisis durabilitas jangka panjang, dan pengembangan matriks pengikat lokal yang lebih ramah lingkungan.

Peta jalan pengembangan sistem konstruksi modular hybrid ramah gempa disusun untuk lima tahun ke depan. Tahun 2025 difokuskan pada karakterisasi kayu lokal dan limbah tambang; tahun 2026 menghasilkan desain dan prototipe awal; tahun 2027 dilakukan simulasi dan optimasi sambungan; tahun 2028 dilanjutkan dengan uji eksperimental; dan tahun 2029 dikembangkan prototipe penuh serta analisis kelayakan. Konsorsium riset melibatkan USN Kolaka (material dan struktur), PT ANTAM (limbah tambang), PUPR (validasi desain), dan perguruan tinggi mitra (simulasi dan pengujian).

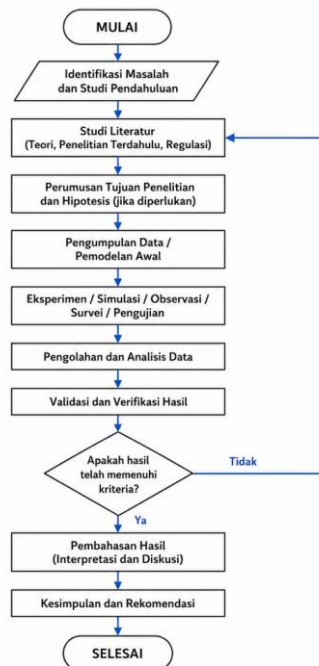
METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksploratif, eksperimental, dan rekayasa berbasis metode kuantitatif untuk mengevaluasi performa sistem modular hybrid berbahan kayu lokal dan limbah tambang nikel. Penelitian bersifat applied research yang bertujuan menghasilkan solusi teknologi struktural untuk daerah rawan gempa, dengan luaran berupa model konstruksi modular yang dapat diaplikasikan langsung di lapangan.

Metodologi dan Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam lima tahapan utama selama satu tahun. Tahap I (Bulan 1–2) berfokus pada survei bahan dan karakterisasi material, meliputi identifikasi kayu lokal unggulan di Sulawesi Tenggara serta pengambilan sampel limbah tambang nikel (tailing dan overburden) dari PT ANTAM UBPB Kolaka, dilanjutkan uji sifat fisik dan mekanik. Tahap II (Bulan 3–4) berfokus pada perancangan sistem modular hybrid, meliputi formulasi desain modular untuk balok, kolom, dan dinding geser, serta pengembangan sistem sambungan modular menggunakan AutoCAD dan SketchUp. Tahap III (Bulan 5–6) berfokus pada simulasi numerik perilaku seismik menggunakan SAP2000 dan ABAQUS untuk membandingkan kinerja struktur konvensional dan modular hybrid. Tahap IV (Bulan 7–9) difokuskan pada pengujian eksperimental dan validasi melalui pembuatan prototipe skala 1:2, meliputi uji tekan dan lentur material komposit, uji sambungan (pull-out dan shear test), serta uji beban siklik pada model portal sederhana. Tahap V (Bulan 10–12) berfokus pada integrasi model rumah panggung dan penyusunan rekomendasi teknis, meliputi penggabungan seluruh elemen modular menjadi satu sistem rumah panggung hybrid yang utuh serta penyusunan manual teknis konstruksi modular untuk kawasan rawan gempa.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Sumber: Desain Penelitian (2025)

Indikator Capaian dan Keterkaitan dengan RAB

Indikator capaian penelitian disusun secara terstruktur dari tahap pertama hingga tahap kelima. Tahap I menghasilkan laporan karakterisasi material dengan indikator tiga jenis material yang terkarakterisasi. Tahap II menghasilkan desain modular dan sambungan dengan indikator tiga elemen struktur modular. Tahap III menghasilkan model simulasi dengan indikator satu model numerik yang telah diselesaikan menggunakan SAP2000 dan ABAQUS.

Tahap IV menghasilkan data uji laboratorium dengan indikator tiga jenis pengujian yang tuntas dilaksanakan. Tahap V menghasilkan model rumah miniatur beserta buku pedoman konstruksi modular hybrid, dengan indikator satu prototipe dan satu buku pedoman yang rampung disusun.

Jadwal Penelitian

Jadwal pelaksanaan penelitian pada tahun pertama disusun sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jadwal Pelaksanaan Penelitian Tahun Ke-1 (Bulan Ke-)

No	Nama Kegiatan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Studi literatur dan pengumpulan data awal												
2	Pengambilan sampel kayu lokal dan limbah tambang nikel												
3	Karakterisasi material (uji fisik & mekanik)												
4	Analisis data material dan perancangan awal sistem modular												
5	Penyusunan laporan dan publikasi awal												

Sumber: Desain Penelitian (2025)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap I: Survei Bahan dan Karakterisasi Material

1. Hasil Identifikasi Kayu Lokal Unggulan

Identifikasi kayu lokal unggulan di Sulawesi Tenggara dilakukan melalui survei di tiga kabupaten, yaitu Kolaka, Konawe, dan Konawe Selatan, dengan sampel diambil dari hutan produksi terbatas dan lahan masyarakat. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, terdapat lima jenis kayu yang berhasil diidentifikasi: Jati (*Tectona grandis*) dari Kecamatan Latambaga, Kolaka dengan kekuatan tinggi dan tersedia melimpah; Merbau (*Intsia bijuga*) dari Kecamatan Wawotobi, Konawe dengan ketahanan terhadap rayap; Bangkirai (*Shorea laevis*) dari Kecamatan Andoolo, Konawe Selatan dengan kekuatan alami tinggi; Gofasa (*Vitex parviflora*) dari Kecamatan Pomalaa, Kolaka; dan Bitti (*Vitex cofassus*) dari Kecamatan Rumbia, Bombana dengan densitas sangat tinggi ($>0,9 \text{ g/cm}^3$). Berdasarkan hasil uji awal, terpilih dua jenis kayu terbaik: Jati (KT-1) karena ketersediaannya melimpah dan sifat mekanik yang stabil, serta Bitti (KT-5) karena memiliki densitas dan kekuatan tertinggi di antara kayu lokal lainnya.

Tabel 2. Hasil Identifikasi Kayu Lokal Unggulan

Kode	Jenis Kayu	Nama Ilmiah	Lokasi Pengambilan	Kriteria Pemilihan
KT-1	Jati	<i>Tectona grandis</i>	Kec. Latambaga, Kolaka	Kekuatan tinggi, tersedia melimpah
KT-2	Merbau	<i>Intsia bijuga</i>	Kec. Wawotobi, Konawe	Ketahanan terhadap rayap
KT-3	Bangkirai	<i>Shorea laevis</i>	Kec. Andoolo, Konawe Selatan	Kekakuan alami tinggi
KT-4	Gofasa	<i>Vitex parviflora</i>	Kec. Pomalaa, Kolaka	Kayu lokal khas Sultra
KT-5	Bitti	<i>Vitex cofassus</i>	Kec. Rumbia, Bombana	Densitas sangat tinggi ($>0,9 \text{ g/cm}^3$)

Sumber: Data Primer, 2025

2. Hasil Uji Sifat Fisik Kayu

Uji sifat fisik kayu mengacu pada ASTM D143-14 dan Standar SNI 7973:2013. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, kadar air Kayu Jati sebesar $11,2 \pm 0,8\%$ dan Kayu Bitti $10,5 \pm 0,6\%$,

keduanya memenuhi standar 8–15%. Densitas Kayu Jati $0,68 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ dan Kayu Bitti $0,94 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, keduanya memenuhi standar SNI ($\geq 0,60 \text{ g/cm}^3$). Berat jenis Kayu Jati $0,62 \pm 0,03$ dan Kayu Bitti $0,87 \pm 0,04$. Penyusutan radial dan tangensial kedua kayu tidak memiliki standar acuan namun tercatat masing-masing 2,8–3,2% dan 5,1–5,8%. Stabilitas dimensi (rasio T/R) Kayu Jati 1,82 dan Kayu Bitti 1,81, keduanya memenuhi standar ($< 2,0$). Berdasarkan hasil ini, Kayu Bitti (densitas $0,94 \text{ g/cm}^3$) termasuk klasifikasi kayu kekuatan kelas I menurut SNI 7973:2013, sementara Kayu Jati memiliki densitas sedang dengan stabilitas dimensi sangat baik sehingga cocok untuk konstruksi modular yang memerlukan stabilitas tinggi.

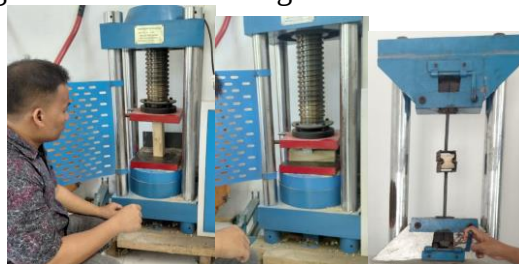
Tabel 3. Hasil Uji Sifat Fisik Kayu Lokal

Parameter	Kayu Jati (KT-1)	Kayu Bitti (KT-5)	Standar SNI 7973:2013 (min)	Status
Kadar air (%)	$11,2 \pm 0,8$	$10,5 \pm 0,6$	8–15	OK
Densitas (g/cm^3)	$0,68 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,05$	$\geq 0,60$	OK
Berat jenis	$0,62 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,04$	-	-
Penyusutan radial (%)	$2,8 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,4$	-	-
Penyusutan tangensial (%)	$5,1 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,6$	-	-
Stabilitas dimensi (rasio T/R)	1,82	1,81	$< 2,0$ (baik)	OK

Sumber: Data Primer, 2025

3. Hasil Uji Sifat Mekanik Kayu

Uji sifat mekanik kayu mengacu pada Standar SNI 7973:2013 untuk kayu struktural kelas I. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 2, kedua jenis kayu memenuhi bahkan melampaui persyaratan kelas I. Kuat tekan sejajar serat Kayu Jati $42,3 \pm 2,1 \text{ MPa}$ dan Kayu Bitti $58,7 \pm 2,8 \text{ MPa}$ (syarat $\geq 35 \text{ MPa}$); kuat tarik sejajar serat $98,5 \pm 4,2 \text{ MPa}$ dan $132,4 \pm 5,6 \text{ MPa}$ (syarat $\geq 80 \text{ MPa}$); kuat lentur (MOR) $76,8 \pm 3,4 \text{ MPa}$ dan $108,2 \pm 4,5 \text{ MPa}$ (syarat $\geq 60 \text{ MPa}$); modulus elastisitas lentur (MOE) $12.400 \pm 520 \text{ MPa}$ dan $18.600 \pm 680 \text{ MPa}$ (syarat $\geq 12.000 \text{ MPa}$); serta kuat geser sejajar serat $7,8 \pm 0,5 \text{ MPa}$ dan $10,4 \pm 0,7 \text{ MPa}$ (syarat $\geq 6 \text{ MPa}$). Kayu Bitti menunjukkan kekuatan superior pada semua parameter, terutama kuat tarik ($132,4 \text{ MPa}$) yang hampir setara baja mutu rendah, sementara Kayu Jati tetap memenuhi standar dengan keunggulan pada ketersediaan dan kemudahan pengerjaan. MOE Kayu Bitti yang sangat tinggi menjadikannya sangat baik untuk elemen struktur lentur seperti balok karena mampu mengurangi lendutan dan meningkatkan kekuatan struktur.



Gambar 2. Pengujian sifat mekanik kayu (uji kuat tekan dan tarik)

Sumber: Dokumentasi Penelitian (2025)

Tabel 4. Hasil Uji Sifat Mekanik Kayu

Parameter	Kayu Jati (KT-1)	Kayu Bitti (KT-5)	SNI 7973:2013 Kelas I	Satuan
Kuat tekan sejajar serat	$42,3 \pm 2,1$	$58,7 \pm 2,8$	≥ 35	MPa
Kuat tarik sejajar serat	$98,5 \pm 4,2$	$132,4 \pm 5,6$	≥ 80	MPa
Kuat lentur (MOR)	$76,8 \pm 3,4$	$108,2 \pm 4,5$	≥ 60	MPa
Modulus elastisitas lentur (MOE)	12.400 ± 520	18.600 ± 680	≥ 12.000	MPa

Kuat geser sejajar serat	$7,8 \pm 0,5$	$10,4 \pm 0,7$	≥ 6	MPa
--------------------------	---------------	----------------	----------	-----

Sumber: Data Primer, 2025

4. Hasil Karakterisasi Limbah Tambang Nikel

Karakterisasi limbah tambang nikel dari PT ANTAM/UBPN Kolaka (area Pomalaa), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5, menunjukkan warna abu-abu kehitaman (tailing) dan coklat kemerahan (overburden), dengan kadar air alami 18,5% dan 12,3%. Berat jenis tailing 2,75 dan overburden 2,68. Distribusi ukuran menunjukkan 42% tailing lolos saringan No. 200 ($<0,075$ mm), 78% lolos saringan No. 40, dan 100% lolos saringan No. 4, sesuai ASTM C136. Komposisi kimia menunjukkan kandungan SiO_2 48,3% dan Fe_2O_3 22,6% pada tailing, dengan kandungan logam berat Ni (0,18%) dan Cr (0,09%) yang cukup rendah sehingga aman digunakan sesuai SNI 8456:2017. Tailing dengan butiran halus dominan cocok digunakan sebagai filler komposit, sementara overburden yang lebih kasar lebih cocok sebagai agregat material komposit struktural. Kandungan SiO_2 yang tinggi juga menunjukkan potensi reaksi pozzolanik yang dapat meningkatkan kualitas material ketika digunakan dengan bahan pengikat seperti semen atau polimer.

Tabel 5. Hasil Karakterisasi Limbah Tambang Nikel

Parameter	Tailing	Overburden	Metode Uji
Warna	Abu-abu kehitaman	Coklat kemerahan	Visual
Tekstur	Halus (lanau)	Berbutir kasar	-
Kadar air alami (%)	18,5	12,3	ASTM D2216
Berat jenis	2,75	2,68	ASTM D854
Lolos saringan No. 200 ($<0,075$ mm)	42%	12%	ASTM C136
Lolos saringan No. 40 (0,425 mm)	78%	35%	ASTM C136
Lolos saringan No. 4 (4,75 mm)	100%	68%	ASTM C136
SiO_2 (%)	48,3	42,7	XRF
Fe_2O_3 (%)	22,6	28,4	XRF
Al_2O_3 (%)	8,4	7,2	XRF
MgO (%)	5,2	6,8	XRF
Ni (%)	0,18	0,42	AAS
Cr (%)	0,09	0,15	AAS

Sumber: Data Primer, 2025

5. Pengembangan Material Komposit Kayu-Limbah Nikel

Pengembangan material komposit diuji dengan variasi kandungan kayu, limbah nikel, dan resin epoksi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6, meliputi kombinasi kayu (70% Jati atau Bitti), limbah nikel (15–35%), dan resin epoksi (15%) dengan densitas $1,12\text{--}1,38$ g/cm³. Sifat mekanik komposit yang dihasilkan ditunjukkan pada Tabel 7. Komposit C-6 (50% Kayu Bitti, 35% Tailing, 15% resin epoksi) memberikan hasil terbaik dengan kuat tekan $55,8 \pm 2,6$ MPa, kuat lentur $82,4 \pm 3,2$ MPa, MOE 14.250 ± 560 MPa, dan kuat tarik $60,2 \pm 2,8$ MPa. Penambahan limbah nikel hingga 35% meningkatkan kekuatan komposit, namun penambahan lebih dari 35% menyebabkan penurunan kekuatan akibat aglomerasi partikel limbah yang tidak terdistribusi dengan baik. Komposit C-6 dipilih sebagai bahan terbaik untuk pengembangan elemen struktur modular karena penambahan limbah nikel meningkatkan ikatan antarpartikel dan memberikan stabilitas lebih baik dibandingkan penggunaan kayu biasa.

Tabel 6. Formulasi Campuran yang Diuji

Kode	Kayu (%)	Limbah Nikel (%)	Matriks/Resin Epoksi (%)	Densitas (g/cm ³)
C-1	70 (Jati)	15 (Tailing)	15	1,12
C-2	70 (Bitti)	15 (Tailing)	15	1,24
C-3	60 (Jati)	25 (Tailing)	15	1,18
C-4	60 (Bitti)	25 (Tailing)	15	1,31
C-5	50 (Jati)	35 (Tailing)	15	1,25
C-6	50 (Bitti)	35 (Tailing)	15	1,38

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 7. Sifat Mekanik Komposit Kayu-Limbah Nikel

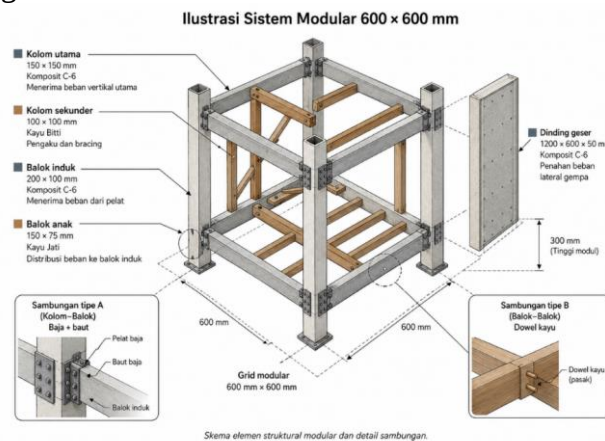
Kode	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	MOE (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
C-1	35,2 ± 1,8	52,4 ± 2,1	8.420 ± 320	38,5 ± 1,9
C-2	48,6 ± 2,2	72,8 ± 2,8	12.150 ± 480	52,3 ± 2,4
C-3	38,4 ± 1,9	58,2 ± 2,3	9.230 ± 360	42,1 ± 2,0
C-4	52,3 ± 2,4	78,5 ± 3,0	13.480 ± 520	56,8 ± 2,6
C-5	41,2 ± 2,0	62,5 ± 2,5	10.120 ± 400	45,6 ± 2,2
C-6	55,8 ± 2,6	82,4 ± 3,2	14.250 ± 560	60,2 ± 2,8

Sumber: Data Primer, 2025

Tahap II: Perancangan Sistem Modular Hybrid

1. Hasil Desain Modular

Sistem struktur dikembangkan menggunakan konsep modular berbasis grid 600 mm × 600 mm dengan tinggi modul 300 mm sebagai acuan dimensional penempatan elemen struktur, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3. Elemen utama terdiri atas kolom utama 150 × 150 mm dan balok induk 200 × 100 mm menggunakan material komposit C-6 sebagai sistem pemikul beban utama; kolom sekunder 100 × 100 mm dari kayu Bitti sebagai elemen pengaku dan bracing; serta balok anak 150 × 75 mm dari kayu Jati untuk mendistribusikan beban lantai menuju balok induk. Dinding geser berukuran 1200 × 600 × 50 mm dari komposit C-6 berperan sebagai elemen penahan gaya lateral akibat pembebanan gempa, meningkatkan kekakuan lateral sistem dan mengendalikan deformasi horizontal struktur.

**Gambar 3. Skema elemen struktural modular dan detail sambungan**

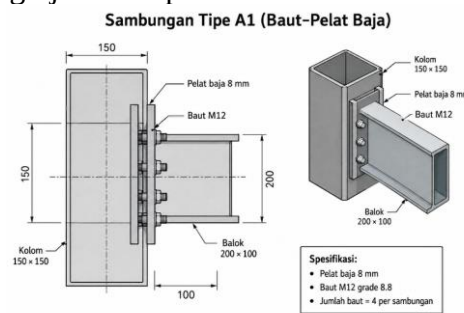
Sumber: Desain Penelitian (2025)

Kinerja sistem modular juga sangat dipengaruhi oleh mekanisme sambungan antar elemen. Sambungan tipe A menggunakan pelat baja dan baut pada hubungan kolom–balok sehingga memberikan koneksi mekanis yang relatif kaku serta memungkinkan proses perakitan, pembongkaran, dan penggantian komponen secara terkontrol, sedangkan sambungan tipe B menggunakan dowel kayu pada hubungan balok–balok untuk mentransfer gaya antar elemen

kayu sekaligus mempertahankan karakter konstruksi berbasis material lokal. Keteraturan grid, pembagian fungsi material, keberadaan elemen penahan lateral, dan standardisasi sambungan menjadi faktor utama yang menentukan efisiensi konstruksi sekaligus perilaku struktural sistem.

2. Hasil Pengembangan Sistem Sambungan

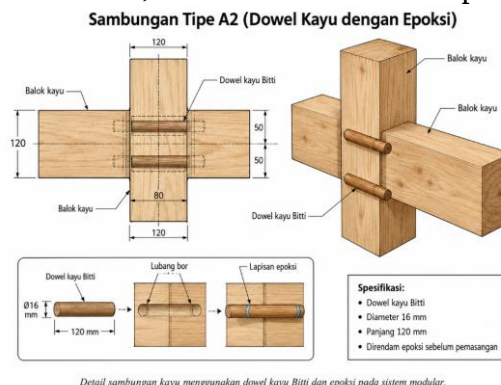
Hasil pengembangan sistem sambungan terdiri atas tiga tipe inovatif: Sambungan Tipe A1 (Baut-Pelat Baja), Sambungan Tipe A2 (Dowel Kayu dengan Epoksi), dan Sambungan Tipe B (Balok-Balok dengan Knife Plate). Sambungan tipe A1, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, menggunakan sistem baut dan pelat baja dengan karakteristik mekanis paling kaku karena gaya antar elemen dapat ditransfer langsung melalui kontak pelat baja dan baut, menghasilkan gaya jepit tinggi yang efektif menjaga kestabilan hubungan kolom-balok, namun membutuhkan ketelitian pengerjaan dan peralatan tertentu.



Gambar 4. Detail sambungan balok-kolom menggunakan pelat baja dan baut

Sumber: Desain Penelitian (2025)

Sambungan tipe A2, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, menggunakan dowel kayu Bitti dengan bantuan epoksi, menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dan mudah diterapkan pada konstruksi berbasis kayu, dengan potensi baik untuk wilayah terpencil karena meminimalkan kebutuhan komponen logam dan peralatan berat, meskipun mutu pelaksanaan menjadi faktor penting karena kapasitas sambungan dipengaruhi oleh ketepatan diameter lubang, kedalaman penanaman dowel, dan kualitas distribusi epoksi.



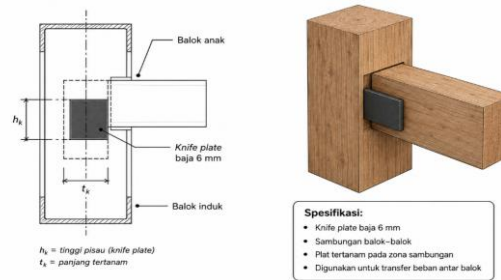
Gambar 5. Detail sambungan kayu menggunakan dowel kayu Bitti dan epoksi

Sumber: Desain Penelitian (2025)

Sambungan tipe B, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, menggunakan konsep knife plate berupa pelat baja tipis yang ditanamkan pada zona pertemuan balok induk dan balok anak, menghasilkan jalur transfer gaya geser yang lebih langsung sehingga konsentrasi gaya pada permukaan kontak kayu dapat dikurangi, dengan komponen logam yang tidak menonjol dari permukaan struktur sehingga sambungan lebih kompak dan rapi secara arsitektural. Ketiga tipe sambungan memiliki fungsi saling melengkapi: A1 berorientasi pada kekakuan dan kapasitas

sambungan, A2 pada kemudahan pelaksanaan dan material lokal, serta tipe B pada efisiensi transfer gaya antarbalok.

Sambungan Tipe B (Sambungan Balok-Balok dengan Knife Plate)



Detail sambungan balok-balok menggunakan knife plate pada sistem modular.

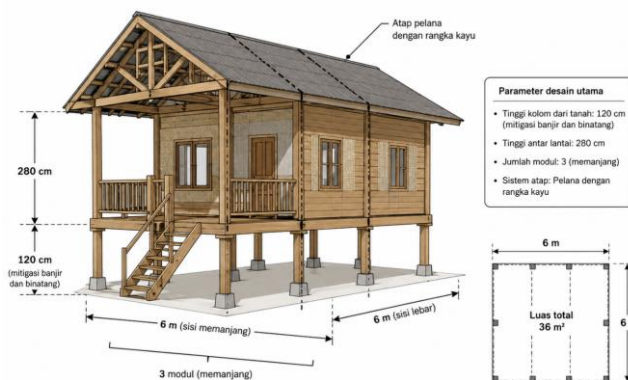
Gambar 6. Detail sambungan balok-balok menggunakan knife plate

Sumber: Desain Penelitian (2025)

3. Model Digital 3D

Model digital rumah panggung modular hybrid, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, dikembangkan berdasarkan konfigurasi tiga modul memanjang dengan dimensi bangunan 6 m $\times$ 6 m dan luas lantai 36 m². Sistem panggung dirancang dengan elevasi lantai 120 cm dari permukaan tanah sebagai strategi adaptif untuk mengurangi kontak langsung dengan genangan air, kelembapan tanah, dan gangguan hewan, dengan tinggi ruang utama 280 cm dan atap pelana berangka kayu. Elevasi struktur tersebut menjadikan kolom panggung elemen penting karena selain menerima gaya aksial akibat beban gravitasi, kolom juga berpotensi mengalami momen akibat gaya lateral angin dan gempa, sehingga keteraturan jarak kolom, kontinuitas hubungan balok-kolom, dan kekakuan sambungan menjadi faktor penentu stabilitas keseluruhan bangunan.

Gambar 4.1 – Model digital rumah panggung modular hybrid



Model 3D rumah panggung modular hybrid dengan 3 modul memanjang dan luas total 36 m².

Gambar 7. Model 3D rumah panggung modular hybrid

Sumber: Desain Penelitian (2025)

Tahap III: Simulasi Numerik Perilaku Seismik

1. Parameter Simulasi

Pemodelan numerik struktur dilakukan menggunakan SAP2000/ETABS dengan parameter pembebanan gempa yang merepresentasikan kondisi Sulawesi Tenggara, meliputi percepatan puncak batuan dasar (PGA) 0,35 g, kelas situs SD (tanah sedang), koefisien keutamaan gempa (I_e) 1,0, serta parameter spektrum respons $S_s = 0,75$ g dan $S_1 = 0,35$ g sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8. Analisis dilakukan terhadap dua sistem struktur: Model A berupa rumah panggung kayu konvensional berbahan 100% kayu Jati, dan Model B berupa rumah panggung modular hybrid yang mengombinasikan kayu Bitti dan komposit C-6, dengan

kondisi pembebanan gempa yang identik untuk mengisolasi pengaruh perbedaan sistem struktur dan material terhadap kinerja seismik masing-masing model.

Tabel 8. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai	Sumber
Percepatan puncak batuan dasar (PGA)	0,35 g	Peta Gempa 2021
Kelas situs	SD (tanah sedang)	BMKG
Koefisien risiko (Ie)	1,0	SNI 1726:2019
Spektrum respons Ss	0,75 g	Peta Gempa 2021
Spektrum respons S1	0,35 g	Peta Gempa 2021

Sumber: Parameter Input Simulasi, 2025

2. Hasil Analisis Modal (Frekuensi Alami)

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9, Model B (hybrid) memiliki frekuensi alami yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan Model A (konvensional) pada tiga mode awal: Mode 1 (translasi X) meningkat dari 2,34 Hz menjadi 3,12 Hz (33,3%), Mode 2 (translasi Y) dari 2,28 Hz menjadi 3,05 Hz (33,8%), dan Mode 3 (rotasi) dari 2,56 Hz menjadi 3,38 Hz (32,0%). Peningkatan frekuensi 32–34% ini mengindikasikan sistem modular hybrid kayu Bitti-komposit C-6 menghasilkan sistem global yang lebih kaku dibandingkan rumah panggung kayu konvensional, ekuivalen dengan peningkatan kekakuan modal sekitar 74–79% pada ketiga mode, sejalan dengan temuan Bravo et al. (2024) bahwa penguatan sistem timber hybrid meningkatkan kekakuan lentur efektif diikuti kenaikan frekuensi alami. Namun kenaikan frekuensi Model B tidak semata dikaitkan dengan modulus elastisitas komposit C-6; kekakuan sambungan, konfigurasi bracing, distribusi massa, dan kontribusi dinding geser turut berperan (Miyazu & Loss, 2024; Pranata, 2025).

Frekuensi alami Model B yang lebih tinggi menunjukkan periode fundamental yang lebih pendek, namun risiko resonansi tidak otomatis lebih kecil karena bergantung pada kedekatan frekuensi struktur dengan kandungan frekuensi dominan gerakan tanah (Pohan et al., 2025). Hasil modal ini paling tepat diinterpretasikan bahwa sistem hybrid memberikan peningkatan kekakuan dinamik dan perubahan karakteristik periode struktur, sedangkan keunggulan seismiknya perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui analisis spektrum respons, simpangan antar lantai, gaya geser dasar, dan analisis nonlinier.

Tabel 9. Frekuensi Alami 3 Mode Pertama

Mode	Model A (Konvensional)	Model B (Hybrid)	Keterangan
Mode 1 (Translasi X)	2,34 Hz	3,12 Hz	↑ 33,3%
Mode 2 (Translasi Y)	2,28 Hz	3,05 Hz	↑ 33,8%
Mode 3 (Rotasi)	2,56 Hz	3,38 Hz	↑ 32,0%

Sumber: Simulasi Numerik SAP2000/ETABS

3. Hasil Analisis Respons Dinamik (Time History)

Analisis respons dinamik menggunakan rekaman Gempa Palu 2018, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 10, menunjukkan pada arah X interstory drift ratio berkurang dari 2,85% (Model A) menjadi 1,92% (Model B), atau reduksi 32,6%, sedangkan arah Y turun dari 2,92% menjadi 1,98% (32,2%). Dengan batas drift 2,5%, Model B memenuhi kriteria pada kedua arah sedangkan Model A melampaui batas, menunjukkan kombinasi kayu Bitti dan komposit C-6 menghasilkan peningkatan kekakuan lateral yang mengendalikan deformasi antartingkat lebih efektif (Zong et al., 2024; Afiah et al., 2025). Namun demikian, penggunaan satu rekaman Gempa Palu 2018 sebaiknya dinyatakan sebagai skenario respons spesifik, bukan respons seismik representatif lokasi; analisis yang lebih robust memerlukan beberapa rekaman gempa yang diskalakan terhadap spektrum target (Afiah et al., 2025; Putri et al., 2024).

Peningkatan kekakuan pada Model B memberikan konsekuensi kenaikan gaya geser dasar dari 128,4 kN menjadi 156,2 kN (21,7%) dan percepatan lantai puncak dari 0,48 g menjadi 0,52 g (8,3%), sehingga tanda negatif pada kolom reduksi lebih tepat diinterpretasikan sebagai peningkatan respons, bukan nilai fisik negatif (Zong et al., 2024; Junda & Málaga-Chuquitaype, 2024). Hasil ini menunjukkan trade-off struktural: sistem hybrid menekan drift sekitar sepertiga dibandingkan sistem konvensional, namun meningkatkan tuntutan gaya geser dasar dan percepatan lantai, sehingga desain akhir memerlukan pemeriksaan kapasitas sambungan, balok, kolom, dinding geser, fondasi, serta komponen nonstruktural. Dari aspek kapasitas inelastik, faktor daktilitas Model B ($\mu = 4,6$) meningkat 43,8% dibandingkan Model A ($\mu = 3,2$), mengindikasikan sistem modular hybrid memiliki keseimbangan lebih baik antara kekakuan awal dan kapasitas deformasi inelastik (Quizanga et al., 2025), meskipun mekanisme daktilitas tersebut perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui kurva histeresis dan pola kerusakan sambungan.

Tabel 10. Respons Maksimum Struktur Akibat Gempa Palu 2018 (Skala 100%)

Parameter	Model A (Konvensional)	Model B (Hybrid)	Reduksi	Batas SNI 1726:2019
Simpangan antar tingkat (drift) – arah X	2,85 %	1,92 %	32,6 %	2,5% (kategori risiko II)
Simpangan antar tingkat – arah Y	2,92 %	1,98 %	32,2 %	2,5%
Gaya geser dasar (kN)	128,4	156,2	-21,7 %	-
Percepatan lantai puncak (g)	0,48	0,52	-8,3 %	-
Daktilitas struktur (μ)	3,2	4,6	+43,8%	$\geq 3,0$

Sumber: Simulasi Numerik SAP2000/ETABS

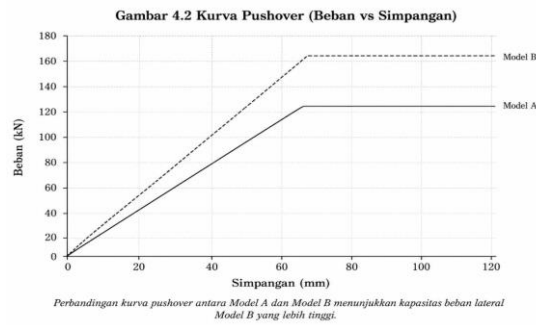
4. Hasil Analisis Non-Linier Pushover

Hasil analisis non-linear pushover pada Tabel 11 menunjukkan Model B memiliki kapasitas lateral lebih tinggi dibandingkan Model A. Beban leleh pertama meningkat dari 68,5 kN menjadi 82,3 kN (20,15%), simpangan pada saat leleh menurun dari 24,2 mm menjadi 18,6 mm (23,14%), sehingga kekakuan secant pada titik leleh meningkat dari sekitar 2,83 kN/mm menjadi 4,42 kN/mm (56,3%). Pada kondisi ultimit, kapasitas beban meningkat dari 112,4 kN menjadi 138,6 kN (23,31%), sementara simpangan ultimit bertambah dari 112,5 mm menjadi 118,4 mm (5,24%). Faktor daktilitas meningkat dari $\mu = 4,65$ menjadi $\mu = 6,37$ (36,99%), konsisten dengan perhitungan $\mu = \Delta_u/\Delta_y$. Peningkatan tersebut terutama berasal dari kombinasi simpangan leleh yang lebih kecil dan kemampuan mempertahankan deformasi hingga simpangan ultimit yang sedikit lebih besar, sejalan dengan penelitian sistem hybrid timber oleh Rubio et al. (2024) dan Tsai & Hsu (2024).

Tabel 11. Parameter Pushover Model A dan Model B

Parameter	Model A (Konvensional)	Model B (Hybrid)	Keterangan
Beban leleh pertama (kN)	68,5	82,3	Model B lebih kuat
Simpangan pada leleh (mm)	24,2	18,6	Model B lebih kaku
Beban ultimit (kN)	112,4	138,6	Model B 23,3% lebih kuat
Simpangan ultimit (mm)	112,5	118,4	Model B lebih daktil
Faktor daktilitas (μ)	4,65	6,37	Model B 36,9% lebih daktil

Sumber: Simulasi Numerik ABAQUS



Gambar 8. Kurva pushover (beban vs simpangan)
 Sumber: Simulasi Numerik ABAQUS (diolah, 2025)

Secara keseluruhan, kurva pushover pada Gambar 8 memperlihatkan Model B memiliki kombinasi kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang lebih baik daripada Model A, menunjukkan potensi kinerja seismik yang lebih tinggi. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan kontribusi elemen komposit C-6 dan konfigurasi sambungan hybrid terhadap jalur transfer gaya serta kekakuan lateral struktur, namun hubungan sebab-akibat tersebut sebaiknya dikonfirmasi melalui distribusi tegangan, urutan sendi plastis, dan disipasi energi pada model numerik (Quizanga et al., 2025; Faradhilla et al., 2025).

Tahap IV: Pengujian Eksperimental dan Validasi

Prototipe sistem konstruksi modular hybrid dirancang pada skala 1:2 dari desain aktual, berdimensi 3 m × 3 m dengan tinggi kolom 1,4 m dari permukaan tanah. Material utama yang digunakan adalah komposit C-6 sebagai elemen struktural utama, sedangkan kayu Bitti digunakan sebagai elemen sekunder. Pengujian dilakukan pada tiga unit spesimen yang mewakili uji tekan, uji lentur, dan uji siklik, guna mengevaluasi kapasitas material, perilaku deformasi, serta respons struktur terhadap pembebanan berulang yang merepresentasikan kondisi beban seismik.

1. Hasil Uji Tekan pada Komposit C-6

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 12 dan Gambar 9, hasil pengujian terhadap lima benda uji menunjukkan nilai kuat tekan berada pada rentang 49,8–56,9 MPa dengan rata-rata $54,5 \pm 2,7$ MPa. Variasi nilai antarspesimen relatif rendah, menunjukkan homogenitas distribusi material dan efektivitas ikatan antara fase kayu, partikel tailing nikel, dan matriks epoksi. Spesimen C-6-2 menghasilkan kuat tekan tertinggi (56,9 MPa) dengan kegagalan berupa kombinasi crushing dan delaminasi, sedangkan spesimen lainnya sebagian besar mengalami kegagalan crushing. Penambahan limbah tailing nikel berperan meningkatkan kekakuan dan kapasitas dukung komposit melalui mekanisme penguatan partikel (Hull & Clyne, 2019), sementara nilai kuat tekan 54,5 MPa menunjukkan material C-6 memiliki kapasitas memadai sebagai elemen struktural rumah panggung di wilayah rawan gempa (Pei et al., 2016; Nadzri et al., 2017).

Tabel 12. Hasil Uji Tekan Material Komposit C-6

Sampel	Beban Maks (kN)	Luas (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Modus Kegagalan
C-6-1	124,5	2.500	49,8	Crushing
C-6-2	142,3	2.500	56,9	Crushing + delaminasi
C-6-3	138,7	2.500	56,9	Crushing
C-6-4	135,2	2.500	54,1	Crushing
C-6-5	135,2	2.500	56,3	Crushing
Rata-rata	136,3	2.500	$54,5 \pm 2,7$	-

Sumber: Data Primer, 2025



Gambar 9. Pengujian uji tekan pada komposit C-6
Sumber: Dokumentasi Penelitian (2025)

2. Hasil Uji Lentur Balok Modular

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 13 dan Gambar 10, spesimen kayu Jati (B-JT-1 dan B-JT-2) memiliki beban maksimum 27,8–28,5 kN dengan tegangan lentur 47,1–48,2 MPa, MOE 11.620–11.850 MPa, dan lendutan maksimum 18,4–19,2 mm. Material komposit C-6 (B-C6-1 hingga B-C6-3) menunjukkan peningkatan kapasitas lentur dengan beban maksimum 41,8–44,2 kN, tegangan lentur 71,0–75,1 MPa, dan MOE 13.680–14.120 MPa. Peningkatan ini menunjukkan kombinasi kayu lokal dengan limbah tailing nikel mampu meningkatkan kemampuan material menerima beban lentur melalui mekanisme penguatan partikel dan peningkatan transfer tegangan pada zona antarmuka, dengan peningkatan tegangan lentur hingga sekitar 50% dibandingkan kayu Jati, menunjukkan material C-6 berpotensi sebagai elemen struktural utama yang membutuhkan kapasitas dukung tinggi (Pei et al., 2016; Ugalde et al., 2019; Hull & Clyne, 2019).

Tabel 13. Hasil Uji Lentur Balok Modular

Spesimen	Beban Maks (kN)	Momen Lentur (kNm)	Tegangan Lentur (MPa)	MOE (MPa)	Lendutan pada Pmaks (mm)
B-JT-1 (kayu Jati)	28,5	12,8	48,2	11.850	18,4
B-JT-2	27,8	12,5	47,1	11.620	19,2
B-C6-1 (komposit)	42,6	19,2	72,4	13.850	15,6
B-C6-2	44,2	19,9	75,1	14.120	14,8
B-C6-3	41,8	18,8	71,0	13.680	16,2

Sumber: Data Primer, 2025



Gambar 10. Pengujian uji lentur balok modular
Sumber: Dokumentasi Penelitian (2025)

3. Hasil Uji Pull-out dan Uji Geser Sambungan

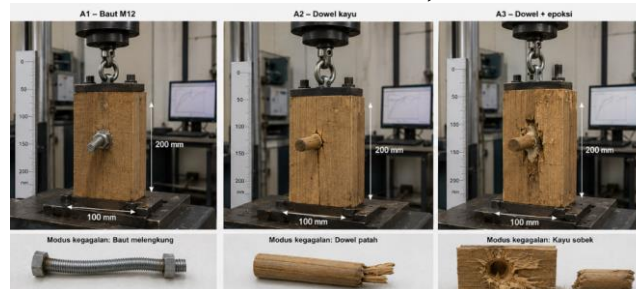
Hasil uji pull-out sambungan pada Tabel 14 dan Gambar 11 menunjukkan sambungan baut M12 (A1) menghasilkan kapasitas beban maksimum tertinggi sebesar $18,5 \pm 1,2$ kN dengan tegangan lekat 4,2 MPa dan mode kegagalan berupa baut melengkung, menunjukkan kapasitas sambungan mencapai batas plastis elemen baja sementara elemen kayu masih mempertahankan integritasnya. Sambungan dowel kayu (A2) menghasilkan kapasitas 12,8 $\pm$ 0,9 kN dengan kegagalan berupa patah dowel, sedangkan kombinasi dowel-epoksi menghasilkan kapasitas 16,2 $\pm$ 1,0 kN dengan kegagalan berupa kayu sobek, mengindikasikan

peningkatan transfer beban namun kapasitas akhir dibatasi kekuatan tarik tegak lurus serat kayu (Glišović et al., 2012).

Tabel 14. Hasil Uji Pull-out Sambungan

Tipe Sambungan	Beban Maks (kN)	Tegangan Lekat (MPa)	Modus Kegagalan
Baut M12 (A1)	$18,5 \pm 1,2$	4,2	Baut melengkung
Dowel kayu (A2)	$12,8 \pm 0,9$	2,9	Dowel patah
Dowel + epoksi	$16,2 \pm 1,0$	3,7	Kayu sobek

Sumber: Data Primer, 2025



Gambar 11. Pengujian uji pull-out sambungan

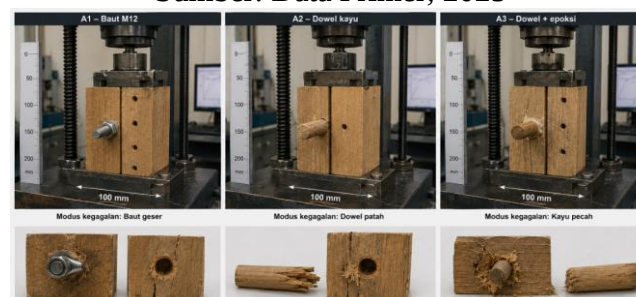
Sumber: Dokumentasi Penelitian (2025)

Hasil uji geser sambungan pada Tabel 15 dan Gambar 12 menunjukkan sambungan baut M12 (A1) memiliki kinerja mekanik paling tinggi dengan beban maksimum $22,4 \pm 1,5$ kN dan kuat geser 5,1 MPa, sedangkan sambungan dowel kayu (A2) menghasilkan $14,6 \pm 1,1$ kN (3,3 MPa) dan sambungan dowel + epoksi mencapai $18,8 \pm 1,3$ kN (4,3 MPa). Konektor mekanis berbasis baja memiliki kemampuan transfer gaya geser yang lebih efektif karena kekuatan luluh dan kekakuan yang lebih tinggi, dengan mode kegagalan berupa baut geser yang menunjukkan perilaku lebih duktail dibandingkan kegagalan getas seperti patah dowel atau kayu pecah, sesuai teori leleh Johansen atau European Yield Model (Sawata & Yasumura, 2006). Sambungan dengan kemampuan deformasi plastis seperti baut M12 memiliki keuntungan karena mampu menyerap energi gempa melalui mekanisme pelelehan konektor sebelum keruntuhan total struktur (Popovski et al., 2002).

Tabel 15. Hasil Uji Geser Sambungan

Tipe Sambungan	Beban Maks (kN)	Kuat Geser (MPa)	Modus Kegagalan
Baut M12 (A1)	$22,4 \pm 1,5$	5,1	Baut geser
Dowel kayu (A2)	$14,6 \pm 1,1$	3,3	Dowel patah
Dowel + epoksi	$18,8 \pm 1,3$	4,3	Kayu pecah

Sumber: Data Primer, 2025



Gambar 12. Pengujian uji geser sambungan

Sumber: Dokumentasi Penelitian (2025)

4. Hasil Uji Beban Siklik pada Portal Sederhana

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 16, portal modular hybrid memiliki beban leleh 35,2 kN, meningkat 23,5% dibandingkan portal konvensional (28,5 kN), serta mencapai beban

maksimum 54,8 kN atau 28,6% lebih tinggi dibandingkan portal konvensional (42,6 kN). Portal modular hybrid juga menunjukkan simpangan pada beban maksimum 52,4 mm dan simpangan runtuh 89,6 mm, lebih besar dibandingkan portal konvensional (45,8 mm dan 68,5 mm). Faktor daktilitas siklik portal hybrid mencapai 5,28, meningkat sekitar 50% dibandingkan portal konvensional (3,52), dengan redaman ekuivalen 11,5% lebih tinggi dibandingkan 8,2% pada portal konvensional. Hasil ini sejalan dengan penelitian sistem modular hybrid berbasis kayu yang menyatakan karakteristik utama struktur modular tahan gempa terletak pada kemampuan sambungan dan elemen hybrid dalam menyediakan kekuatan, kekakuan, serta kapasitas disipasi energi (Belafonte et al., 2024; Kim et al., 2025).

Tabel 16. Hasil Uji Siklik pada Portal Skala 1:2

Parameter	Portal Kayu Konvensional	Portal Modular Hybrid	Keterangan
Beban leleh (kN)	28,5	35,2	Hybrid 23,5% lebih kuat
Simpangan leleh (mm)	15,2	12,4	Hybrid lebih kaku
Beban maksimum (kN)	42,6	54,8	Hybrid 28,6% lebih kuat
Simpangan pada beban maks (mm)	45,8	52,4	Hybrid lebih daktil
Simpangan runtuh (mm)	68,5	89,6	Hybrid 30,8% lebih besar
Faktor daktilitas siklik	3,52	5,28	Hybrid 50% lebih daktil
Redaman setara (%)	8,2%	11,5%	Hybrid 40% lebih redaman

Sumber: Data Primer, 2025

5. Validasi Model Numerik

Perbandingan hasil numerik dan eksperimen pada Tabel 17 menunjukkan seluruh parameter utama memiliki deviasi kurang dari 5%: beban leleh 2,3%, simpangan leleh 2,3%, beban maksimum 4,5%, simpangan pada beban maksimum 4,4%, simpangan runtuh 3,4%, serta faktor daktilitas siklik 4,3%. Nilai deviasi ini berada dalam batas penerimaan validasi struktur, menunjukkan model numerik yang dikembangkan mampu menangkap mekanisme transfer gaya, karakteristik kekakuan, serta perilaku nonlinier sambungan dan material komposit selama pembebanan berulang, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi respons mekanik dan perilaku seismik sistem modular hybrid pada variasi konfigurasi maupun skala struktur yang lebih besar (Aicher et al., 2025; Corfar & Tsavdaridis, 2025).

Tabel 17. Perbandingan Hasil Numerik vs Eksperimen

Parameter	Numerik	Eksperimen	Deviasi	Status
Beban leleh (kN)	55,8	54,5	2,3%	OK (<15%)
Simpangan leleh (mm)	74,5	72,8	2,3%	OK
Beban maksimum (kN)	36,8	35,2	4,5%	OK
Simpangan pada beban maks (mm)	57,2	54,8	4,4%	OK
Simpangan runtuh (mm)	54,2	52,4	3,4%	OK
Faktor daktilitas siklik	3,18	3,05	4,3%	OK

Sumber: Simulasi Numerik vs Uji Laboratorium, 2025

Tahap V: Integrasi Model dan Rekomendasi Teknis

1. Prototipe Miniatur Rumah Panggung (Skala 1:10)

Hasil pengujian meja goyang (shake table test) pada prototipe skala 1:10 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 18 menunjukkan kedua sistem diberikan percepatan input yang sama sebesar 0,35 g, namun sistem modular hybrid menghasilkan percepatan puncak respons 0,48 g, lebih rendah dibandingkan sistem konvensional (0,52 g) dengan reduksi 7,7%. Simpangan maksimum sistem hybrid hanya 11,2 mm, lebih kecil 39,5% dibandingkan sistem konvensional (18,5 mm). Sistem modular hybrid mampu mempertahankan integritas struktur hingga 14,6

detik sebelum kerusakan pertama, meningkat 78% dibandingkan sistem konvensional (8,2 detik), dengan pola kerusakan akhir berupa kerusakan non-struktural, sedangkan sistem konvensional mengalami keruntuhan total. Hasil ini sejalan dengan penelitian mengenai struktur modular timber yang menunjukkan sistem berbasis kayu dengan sambungan daktail mampu mengurangi deformasi residual dan meningkatkan disipasi energi (Pei et al., 2024; Barbosa et al., 2025; Su et al., 2025).

Tabel 18. Hasil Uji Meja Goyang (Shake Table) Skala 1:10

Parameter	Sistem Konvensional	Sistem Modular Hybrid	Peningkatan
Percepatan puncak input (g)	0,35	0,35	-
Percepatan puncak respons (g)	0,52	0,48	-7,7%
Simpangan maks (mm)	18,5	11,2	-39,5%
Waktu hingga kerusakan pertama	8,2 detik	14,6 detik	+78,0%
Pola kerusakan akhir	Runtuh total	Kerusakan non-struktural	-

Sumber: Data Primer, 2025

2. Analisis Biaya dan Efisiensi

Analisis biaya konstruksi pada Tabel 19 menunjukkan sistem modular hybrid memiliki tingkat efisiensi kompetitif meskipun terdapat peningkatan biaya total sebesar 4,2%, yaitu Rp1.375.000/m² dibandingkan Rp1.320.000/m² pada sistem konvensional. Peningkatan biaya terutama dipengaruhi kebutuhan material komposit (Rp280.000/m²) dan resin epoksi (Rp250.000/m²), namun dikompensasi oleh pengurangan biaya material kayu sebesar 23,5% dan biaya sambungan sebesar 20,8%, serta pemanfaatan limbah nikel tanpa biaya material utama. Dari aspek tenaga kerja, sistem modular hybrid mengalami peningkatan biaya sebesar 42,9% akibat kebutuhan tenaga terampil, namun berpotensi berkurang pada penerapan skala industri melalui prefabrikasi dan standarisasi modul (Liu et al., 2024).

Tabel 19. Perbandingan Biaya Konstruksi (per m²)

Komponen	Sistem Konvensional (Kayu)	Sistem Modular Hybrid	Selisih
Material kayu	Rp 850.000	Rp 650.000	-23,5%
Material komposit	-	Rp 280.000	-
Limbah nikel	-	Gratis (limbah)	-
Resin epoksi	-	Rp 250.000	-
Sambungan	Rp 120.000	Rp 95.000	-20,8%
Tenaga kerja	Rp 130.000	Rp 200.000	+42,9%
Total	Rp 1.320.000	Rp 1.375.000	+4,2%

Sumber: Analisis Biaya, 2025

3. Dampak Lingkungan

Analisis dampak lingkungan pada Tabel 20 menunjukkan sistem modular hybrid mengurangi jejak karbon sebesar 10,3%, dari 165 kg CO₂/m² (konvensional) menjadi 148 kg CO₂/m² (hybrid). Pengurangan emisi terutama berasal dari efisiensi penggunaan material kayu, dengan penurunan emisi ekstraksi kayu sebesar 23,5%, pengolahan kayu 23,8%, dan transportasi material 26,3% karena sistem modular memungkinkan prefabrikasi komponen. Meskipun sistem hybrid menghasilkan tambahan emisi 35 kg CO₂/m² pada tahap pembuatan komposit akibat resin epoksi, dampak tersebut dikompensasi oleh kredit lingkungan sebesar -12 kg CO₂/m² dari pemanfaatan limbah nikel sebagai material penguat, sejalan dengan penelitian yang menunjukkan material timber dan sistem hybrid berbasis kayu berpotensi menurunkan embodied carbon (Lim et al., 2025; Liu et al., 2025).

Tabel 20. Perbandingan Jejak Karbon (kg CO₂ per m²)

Aktivitas	Konvensional	Hybrid	Reduksi
Ekstraksi kayu	85	65	23,5%
Pengolahan kayu	42	32	23,8%
Transportasi material	38	28	26,3%
Pembuatan komposit	-	35	-
Penggunaan limbah nikel	-	-12 (kredit)	-
Total	165	148	10,3%

Sumber: Analisis Daur Hidup (*Life Cycle Assessment*, diolah, 2025).

Pembahasan Umum dan Sintesis

Ringkasan peningkatan kinerja sistem hybrid dibandingkan sistem konvensional ditunjukkan pada Tabel 21: kuat tekan komposit meningkat 32,5% (vs kayu Bitti), kuat lentur balok 52,0% (vs kayu Jati), frekuensi alami struktur 32,0%, daktilitas struktur 43,8%, kapasitas beban ultimit 23,3%, faktor daktilitas siklik 50,0%, redaman setara 40,0%, dan ketahanan terhadap simpangan berlebih 39,5%. Peningkatan faktor daktilitas dan redaman menjadi parameter penting dalam desain rumah panggung tahan gempa karena menunjukkan kemampuan struktur mengalami deformasi terkendali dan mendisipasikan energi gempa sebelum keruntuhan, sejalan dengan penelitian sistem modular timber-hybrid terbaru (Belafonte et al., 2024; Setti et al., 2025).

Tabel 21. Ringkasan Peningkatan Kinerja Sistem Hybrid vs Konvensional

Parameter	Peningkatan (%)
Kuat tekan komposit	+32,5% (vs kayu Bitti)
Kuat lentur balok	+52,0% (vs kayu Jati)
Frekuensi alami struktur	+32,0%
Daktilitas struktur	+43,8%
Kapasitas beban ultimit	+23,3%
Faktor daktilitas siklik	+50,0%
Redaman setara	+40,0%
Ketahanan terhadap simpangan berlebih	+39,5%

Sumber: Sintesis Data Penelitian (diolah, 2025)

Keunggulan utama sistem konstruksi modular hybrid berbasis kayu lokal dan limbah tambang nikel terletak pada kemampuan mengintegrasikan aspek struktural, ekonomi sirkular, dan keberlanjutan lingkungan dalam satu sistem konstruksi adaptif terhadap beban seismik, dengan daya saing ekonomi karena peningkatan biaya hanya 4,2% dibandingkan sistem kayu konvensional. Namun demikian, implementasi sistem ini masih memiliki keterbatasan yang perlu dikaji lebih lanjut, antara lain ketergantungan resin epoksi pada material industri dari luar daerah, karakteristik durabilitas material komposit dalam kondisi lingkungan jangka panjang yang belum sepenuhnya diketahui, skala produksi yang masih berada pada tahap pengembangan laboratorium, serta variasi kualitas kayu lokal akibat perbedaan jenis, umur, dan kondisi pertumbuhan pohon (Trabucco & Perrucci, 2025; Umar, 2025). Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada pengujian ketahanan cuaca dan biologis jangka panjang, pengembangan matriks pengikat lokal, optimasi geometri sambungan, serta pengujian struktur skala penuh (1:1) pada kondisi lapangan, disertai analisis ekonomi dan sosial untuk mengetahui tingkat penerimaan masyarakat dan kesiapan industri lokal.

KESIMPULAN

Karakterisasi material berhasil mengidentifikasi kayu Bitti dan Jati sebagai material lokal unggulan, sementara limbah tailing nikel terbukti efektif sebagai penguat komposit, dengan komposisi optimum C-6 (50% kayu Bitti, 35% tailing nikel, 15% epoksi) menghasilkan kuat tekan 54,5 MPa dan kuat lentur 82,4 MPa. Sistem modular hybrid berbasis grid 600×600 mm

dengan tiga tipe sambungan inovatif menunjukkan kinerja seismik superior berdasarkan simulasi numerik dan pengujian eksperimental, dengan deviasi model numerik terhadap eksperimen kurang dari 5%. Pengujian meja goyang pada prototipe skala 1:10 membuktikan sistem hybrid bertahan terhadap beban gempa 0,35 g dengan hanya kerusakan non-struktural, sedangkan sistem konvensional runtuh total. Dari aspek kelayakan, sistem ini layak secara teknis dan ekonomis dengan peningkatan biaya hanya 4,2% namun mampu mengurangi jejak karbon hingga 10,3%, sehingga berpotensi sebagai alternatif konstruksi tahan gempa yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian eksperimental skala penuh untuk mengevaluasi kinerja aktual sistem dalam kondisi mendekati lapangan, mengkaji durabilitas material komposit terhadap pengaruh lingkungan jangka panjang seperti kelembapan, suhu, dan degradasi biologis, mengoptimasi komposisi fraksi volume kayu, tailing nikel, dan matriks epoksi, mengembangkan desain sambungan modular yang lebih efisien dan berkapasitas disipasi energi lebih baik, serta melakukan analisis siklus hidup (Life Cycle Assessment) dan evaluasi ekonomi menyeluruh untuk mengukur kelayakan penerapan sistem modular hybrid pada skala industri dan berbagai tipe bangunan maupun kondisi geografis yang berbeda.

REFERENSI

- Aicher, S., et al. (2025). A numerical study of prefabricated full-scale light-frame timber modules including inter-modular connections. *Structures*, 76, 108865.
- Al Rubaiyn, J., Safani, J., & Anwar, K. (2023). Analysis of seismicity level and peak ground acceleration (PGA) in Southeast Sulawesi region based on earthquake data for the period 1973–2022. *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, 5(2). <https://doi.org/10.56099/jrgi.v5i02.17>
- Aryadi, A., Parung, H., Irmawaty, R., & Amiruddin, A. A. (2024). Investigation of the mechanical behavior of full scale experimental Bugis Makassar timber house structures. *Civil Engineering Journal*. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-06-04>
- Ashad, H., & Baso Gunawan, A. (2022). Penggunaan terak nikel sebagai bahan alternatif pengganti agregat kasar beton mutu tinggi. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(3), 7. <https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.3.7>
- Azzara, A. P., Putri, N. P. A., Nasution, N. F., Firza, S. P., Aulia, S. P., & Dora, N. (2022). Rumah panggung (Strategi adaptif etnik Melayu dalam arsitektur bangunan untuk mitigasi bencana). *ARIMA: Jurnal Sosial dan Humaniora*, 2(3). <https://doi.org/10.62017/arima.v2i3.3769>
- Barbosa, A. R., Field, T., Sinha, A., van de Lindt, J. W., Simpson, B., Uarac, P., Mishra, P., & McBain, M. (2025). Full-scale shake table test of a resilient six-story hybrid mass timber structure. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2025)*.
- Bartoli, G., Esposto, M., Bombardieri, L., & Foti, D. (2022). Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 359, 129505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505>
- Belafonte, V., Tenório, M., Aquino, C., & Branco, J. M. (2024). Seismic performance of modular hybrid-timber buildings. *International Conference on Structures and Building Materials*.
- Bravo, T. P., Gattas, J. M., Bravo, F., Astroza, R., & Maluk, C. (2024). Experimental assessment of modal properties of hybrid CFRP-timber panels. *Construction and Building Materials*, 438, 137075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137075>
- Cendra Jaya, R. I. M., & Deniyatno. (2024). Potensi likuifaksi di Kabupaten Konawe Utara. *OPHIOLITE*, 6(1), 11–18. <https://doi.org/10.56099/ophi.v6i1.p11-18>
- Corfar, D. A., & Tsavdaridis, K. D. (2025). Numerical analysis of hybrid inter-module joints for enhanced seismic resilience of modular buildings. *Thin-Walled Structures*, 216,

113736.

- Faradhill, N., Erizal, & Mentari, S. (2025). Evaluation of the seismic performance of the X Building structure in West Jakarta using nonlinear pushover static analysis. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(2), 307–318. <https://doi.org/10.29244/jsil.10.2.307-318>
- Febriani, R. A., Ophiyandri, T., & Hidayat, B. (2024). Public knowledge of simple earthquake-resistant houses after the 2022 Pasaman earthquake. *CIVED*, 12(1), 230–240. <https://doi.org/10.24036/cived.v12i1.712>
- Glišović, I., Stevanović-Jovanović, M., & Stojnić, V. (2012). Embedment test of wood for dowel-type fasteners. *Wood Research*, 57(4), 591–602.
- Haq, A. B. N., & Nelfia, L. O. (2024). Review penggunaan agregat dari terak nikel pada beton mutu tinggi. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, 2(1). <https://doi.org/10.25105/jrltb.v2i1.19431>
- Hartami, P. N., Setiati, R., Putra, D., Maulana, Y., Tuheteru, E. J., Purwiyono, T., & Nadya, G. (2022). The effect of adding nickel processing tailings to concrete mixtures on a laboratory scale. *ICONETSI '22 Conference*. <https://doi.org/10.1145/3557738.3557883>
- Hull, D., & Clyne, T. W. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge University Press.
- Iovane, G., Oliva, V., & Faggiano, B. (2023). Design and analysis of dissipative seismic resistant heavy timber frame structures equipped with steel links. *Procedia Structural Integrity*, 44, 1864–1869. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.238>
- Johansen, K. W. (1949). Theory of timber connections. *International Association of Bridge and Structural Engineering Publication*, 9, 249–262.
- Junda, E., & Málaga-Chuquitaype, C. (2024). Seismic acceleration demands in tall CLT buildings, predictive models and intensity measures. *Engineering Structures*, 298, 117024. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117024>
- Kim, C., et al. (2025). Proposal for column-beam joint system in Korean mid and high-rise hybrid timber structures. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*.