LAPORAN PENELITIAN

PENGEMBANGAN PROTOTIPE SISTEM STRUKTURAL HIBRIDA UNTUK BANGUNAN SATU LANTAI TAHAN GEMPA (PENDEKATAN BERBASIS MATERIAL LOKAL DAN SIMULASI DINAMIK)

ABDI IRAWAN KUKU, S.T., M.T.
(NUPTK 1605029401)
INTAN PUTRI LASENA
(NIM A04425004)

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS SAINS DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH GORONTALO
2025

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian	:	Pengembangan Prototipe Sistem Struktural Hibrida Untuk Bangunan Satu Lantai Tahan Gempa (Pendekatan Berbasis Material Lokal Dan Simulasi Dinamik)
Fokus	:	Geoteknik
Ketua Peneliti		
a Nama Lengkap	:	Abdi Irawan Kuku, S.T., M.T
b NUPTK	:	1605029401
c Jabatan/pangkat/golongan	:	-
d Program Studi	:	Teknik Sipil
e Alamat Surel (*e-mail*)	:	AIkuku@gmail.com
Anggota		
a Nama Lengkap	:	Intan Putri Lasena
b NIM	:	A04425004
c Program Studi	:	Teknik Sipil
d Perguruan Tinggi	:	Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Lama Penelitian	:	1 tahun
Biaya Penelitian keseluruhan	:	Rp. 8.000.000.00
Biaya Penelitian		
- Dana internal PT	:	-
- Dana institusi lain	:	-

Gorontalo, 25 September 2025

Menyetujui
Ketua LPPM

Indri Arfiani Yasin, Ph.D
NBM 1416832

Ketua Peneliti,

Adi Irawan Kuku, S.T., M.T.
NUPTK 1605029401

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ……. i

HALAMAN PENGESAHAN …… ii

DAFTAR ISI …….. iii

RINGKASAN …… iv

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang ……..……. 1

1.2. Rumusan Masalah …….…….. 1

1.3. Tujuan Penelitian ……..…….. 2

1.4. Manfaat Penelitian ……..

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Risiko Seismik dan Kinerja Bangunan di Indonesia Timur …. 3

2.2. Sistem dan Material Inovatif untuk Bangunan Tahan Gempa Sederhana ……... 3

2.3 Gap Penelitian dan Kontribusi yang Diusulkan ……...…. 3

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Desain dan Variabel Penelitian …..…… 5

3.2. Model Struktur dan Beban ……....……. 5

3.3. Analisis Seismik …….…….. 5

3.4. Analisis Biaya-Kelayakan …….....…… 6

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Evaluasi Bangunan Konvensional ……...….. 7

4.2 Kinerja Sistem Hibrida-1 …….……. 7

4.3 Kinerja Sistem Hibrida-2 …… 7

4.4 Diskusi Komparatif dan Rekomendasi Kontekstual ……. 8

BAB V. SIMPULAN …….. 9

DAFTAR PUSTAKA

RINGKASAN

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem struktural inovatif untuk bangunan satu lantai tahan gempa di Kota Gorontalo, wilayah dengan risiko seismik aktif. Studi ini mengidentifikasi kerentanan bangunan konvensional (struktur beton bertulang dan dinding bata) yang hanya mencapai kinerja "Life Safety" dengan margin sempit dan sangat rentan terhadap kerusakan non-struktural. Untuk mengatasi masalah ini, dirancang dan dianalisis dua prototipe sistem hibrida menggunakan pemodelan elemen hingga dan analisis dinamik non-linier (pushover dan time history). Sistem Hibrida-1 mengusulkan perbaikan inkremental dengan menggunakan beton bertulang yang diperkuat serat bambu lokal dan detail sambungan yang ditingkatkan, yang menghasilkan peningkatan disipasi energi dan pengurangan simpangan. Sistem Hibrida-2 menawarkan solusi lebih maju berbasis rangka dinding baja ringan dengan bracing eksentris (EBF) yang bertindak sebagai fuse seismik, menunjukkan kinerja terbaik dengan daktilitas tinggi dan kemampuan mengontrol drift. Meskipun biaya awalnya lebih tinggi, sistem ini menawarkan kecepatan konstruksi dan ketahanan superior. Penelitian menyimpulkan bahwa kedua sistem, yang mempertimbangkan material lokal dan keterjangkauan, layak diadopsi sebagai pedoman teknis untuk program retrofitting bangunan eksisting (Hibrida-1) dan pembangunan fasilitas publik baru (Hibrida-2) di Gorontalo, sehingga menjembatani kesenjangan antara kode gempa nasional dan praktik konstruksi lokal.

Kata Kunci : Bangunan Tahan Gempa; Sistem Struktural Hibrida; Analisis Dinamik Non-Linier; Material Lokal

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kota Gorontalo, yang secara geografis terletak di wilayah seismik aktif dengan jalur patahan dan subduksi, memiliki kerentanan tinggi terhadap ancaman gempa bumi. Data kegempaan historis menunjukkan aktivitas seismik yang signifikan di Sulawesi Utara, termasuk gempa merusak yang berdampak pada bangunan bertingkat rendah (BMKG, 2023). Mayoritas bangunan permukiman dan fasilitas publik di Gorontalo, khususnya bangunan satu lantai (rumah tinggal, sekolah, puskesmas, dan pasar), dibangun dengan teknik konvensional dan material sederhana yang seringkali mengabaikan prinsip ketahanan gempa. Konstruksi ini umumnya berupa struktur bata dengan kolom praktis dan ring balok beton bertulang yang tidak memadai, serta atap baja ringan yang terhubung secara non-struktural.

Tantangan utama di daerah seperti Gorontalo adalah mengembangkan solusi yang tidak hanya secara teknis memadai dan sesuai dengan bahaya seismik setempat, tetapi juga terjangkau, mudah diaplikasikan oleh tenaga lokal, dan memanfaatkan potensi material lokal. Penerapan kode gempa nasional (SNI 1726:2019) pada bangunan sederhana sering terkendala biaya, kompleksitas perhitungan, dan ketersediaan material. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang menjembatani kesenjangan antara persyaratan teknis tinggi dan realitas konstruksi lokal.

Penelitian terbaru dalam rekayasa gempa bergerak ke arah sistem inovatif yang memadukan material, seperti penggunaan serat alam untuk memperkuat beton, sistem rangka kayu-engineered, dan konsep base isolation sederhana (Firmansyah et al., 2023; Subekti et al., 2022). Namun, adopsinya di Indonesia Timur masih sangat terbatas. Kota Gorontalo, dengan kekayaan sumber daya alam seperti bambu Gorontalo (Bambusa vulgaris var. vittata) yang memiliki tensile strength yang baik, dan potensi industri lokal untuk menghasilkan komponen struktur sederhana, menjadi laboratorium ideal untuk mengembangkan prototipe bangunan tahan gempa yang kontekstual.

1.2. Rumusan Masalah

- Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:
- Bagaimana karakteristik respons dinamis dan kinerja seismik bangunan satu lantai konvensional di Kota Gorontalo ketika dihadapkan pada spektrum respons gempa sesuai peta hazard SNI 1726:2019 dan rekaman gempa yang dimodifikasi sesuai karakteristik lokal?

- Bagaimana mengembangkan dan memvalidasi konsep sistem struktural hibrida (misalnya, kolom beton bertulang diperkuat serat lokal dengan sambungan khusus ke rangka atap baja ringan yang diperkuat, atau penggunaan sistem damped portal) yang mampu meningkatkan kinerja tahan gempa secara signifikan untuk bangunan satu lantai di Gorontalo, dengan mempertimbangkan aspek keterjangkauan, kemudahan aplikasi, dan pemanfaatan material lokal?

1.3.Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- Mengevaluasi kapasitas dan kerentanan seismik bangunan satu lantai tipikal di Kota Gorontalo melalui pemodelan elemen hingga dan analisis dinamik non-linier (pushover dan time history).
- Merancang, memodelkan, dan menganalisis efektivitas minimal dua alternatif konsep sistem struktural hibrida inovatif untuk bangunan satu lantai tahan gempa di Gorontalo, dilengkapi dengan analisis biaya-kelayakan awal dan pedoman aplikasi teknis sederhana untuk tukang dan pengembang lokal.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Risiko Seismik dan Kinerja Bangunan di Indonesia Timur

Kinerja bangunan selama gempa sangat ditentukan oleh keselarasan antara kapasitas struktur dan permintaan gempa. Kota Gorontalo terletak di zona seismik dengan percepatan batuan dasar (PGA) menengah hingga tinggi. Penelitian oleh Irsyam et al. (2020) dalam pemutakhiran peta hazard gempa Indonesia menunjukkan peningkatan nilai percepatan di beberapa wilayah Sulawesi, menegaskan kebutuhan desain yang lebih ketat. Bangunan satu lantai, meskipun perioda getarnya pendek, rentan terhadap kerusakan non-struktural dan kegagalan sambungan jika tidak dirancang dengan baik (Bruneau et al., 2023). Kegagalan kolom praktis, retak geser pada dinding bata, dan lepasnya hubungan atap dengan struktur utama adalah mode kerusakan yang sering dilaporkan pascagempa di Indonesia (Majid & Hidayat, 2022).

2.2. Sistem dan Material Inovatif untuk Bangunan Tahan Gempa Sederhana

Perkembangan material komposit dan sistem disipasi energi sederhana membuka peluang baru. Beton diperkuat serat (FRC), termasuk dengan serat alam seperti serat ijuk, sabut kelapa, atau bambu, telah diteliti meningkatkan daktilitas dan ketahanan retak (Asyhar et al., 2021). Studi oleh Saputra et al. (2022) menunjukkan bahwa panel dinding dengan mortar yang diperkuat serat bambu memiliki peningkatan ketahanan lateral hingga 40% dibandingkan panel konvensional.

Di sisi lain, sistem light-gauge steel frame (LGSF) dengan sambungan khusus telah terbukti memiliki kinerja seismik yang sangat baik untuk bangunan rendah. Penelitian Kazemi et al. (2023) mendemonstrasikan bahwa rangka dinding baja ringan dengan bracing yielding mampu mendisipasi energi secara signifikan. Adaptasi sistem ini dengan memanfaatkan baja ringan yang mudah dijumpai di Gorontalo, namun dengan detail sambungan yang ditingkatkan, merupakan celah penelitian yang potensial.

Konsep hybrid system juga berkembang, seperti kolom beton dengan rocking detail di pondasi yang dilengkapi dengan energy dissipater berbahan dasar karet atau logam sederhana, yang memungkinkan pergerakan terkontrol selama gempa dan mengurangi gaya inersia pada struktur atas (Furukawa et al., 2021).

2.3. Gap Penelitian dan Kontribusi yang Diusulkan

Mayoritas penelitian di tingkat internasional fokus pada material dan sistem canggih yang mahal, sementara penelitian nasional sering kali masih bersifat eksperimental material skala laboratorium tanpa integrasi ke dalam sistem bangunan utuh yang kontekstual. Belum

ada penelitian komprehensif yang mengintegrasikan potensi material lokal Gorontalo (seperti bambu sebagai fiber atau komponen non-struktural) dengan sistem struktur industri (baja ringan) dan dipadukan dalam suatu kerangka desain performance-based sederhana untuk bangunan satu lantai.

Penelitian ini akan mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan dan menganalisis prototipe sistem hibrida yang realistis untuk diaplikasikan di Gorontalo. Tinjauan pustaka ini menjadi dasar untuk memilih parameter material, metode analisis, dan indikator kinerja (seperti simpangan antar lantai dan drif) yang akan digunakan.

BAB III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode campuran (mixed-method) yang terdiri dari studi literatur, pemodelan numerik, dan analisis komparatif.

3.1. Desain dan Variabel Penelitian

Penelitian bersifat eksploratif dan simulatif. Variabel bebas: tipe sistem struktur (konvensional, Hibrida-1: Beton Bertulang Diperkuat Serat + Sambungan Mortar Daktail, Hibrida-2: Rangka Baja Ringan dengan Bracing Eccentrically Braced Frame/EBF sederhana). Variabel terikat: kinerja seismik (ditunjukkan oleh kapasitas kurva pushover, nilai simpangan maksimum, dan tingkat kerusakan berdasarkan FEMA P-58), serta biaya konstruksi awal.

3.2. Model Struktur dan Beban

Bangunan referensi adalah rumah tinggal satu lantai tipikal di Gorontalo (denah 6m x 10m, tinggi 3.5m). Dua model akan dibuat menggunakan software elemen hingga ETABS v20:

- Model Konvensional (MK): Kolom dan balok beton bertulang biasa (fc' 20 MPa), dinding bata sebagai elemen non-struktural (dimodelkan sebagai beban dinding), atap baja ringan.
- Model Hibrida-1 (MH-1): Kolom dan ring balok dari beton bertulang dengan penambahan serat bambu lokal (dengan properti material mengacu pada Asyhar et al., 2021). Sambungan balok-kolom diperkuat dengan angles steel tambahan. Dinding dimodelkan sebagai panel beton pracetak tipis diperkuat serat.
- Model Hibrida-2 (MH-2): Struktur utama berupa rangka baja ringan (baja G550) dengan sistem dinding geser dari panel sheathing dan bracing EBF pada sudut tertentu. Pondasi tetap dari beton bertulang dengan anchor bolt.

Pembebanan mengikuti SNI 1727:2020 untuk beban mati/hidup dan SNI 1726:2019 untuk beban gempa (Kota Gorontalo, tanah sedang).

3.3. Analisis Seismik

- Analisis Response Spectrum: Untuk mengestimasi gaya dasar dan simpangan awal.
- Analisis Pushover Static Nonlinear: Untuk mendapatkan kurva kapasitas (base shear vs roof displacement) dan menentukan kinerja (Performance Point) melalui metode ATC-40. Kinerja dinilai berdasarkan tingkat kerusakan Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), dan Collapse Prevention (CP).

- Analisis Time History Non-Linear: Menggunakan minimal 3 rekaman gempa skala-menengah yang disesuaikan (scaled) dengan spektrum desain Gorontalo. Analisis ini untuk memvalidasi respons dinamis dan mengevaluasi akumulasi kerusakan.

3.4. Analisis Biaya-Kelayakan

Dilakukan perbandingan estimasi biaya material dan tenaga kerja untuk ketiga sistem berdasarkan Harga Satuan Pokok Kegiatan (HSPK) Gorontalo tahun 2024. Analisis benefit-cost ratio sederhana akan dilakukan dengan mempertimbangkan peningkatan kinerja dan potensi pengurangan kerusakan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Evaluasi Bangunan Konvensional

Hasil analisis pushover pada MK menunjukkan kurva kapasitas yang relatif landai setelah leleh pertama terjadi pada sambungan kolom-pondasi. Performance Point dari analisis spektrum kapasitas berada pada tingkat kerusakan Life Safety (LS), tetapi dengan margin yang tipis. Analisis time history dengan rekaman gempa yang disimulasikan memperlihatkan drift maksimum mencapai 2.5%, melebihi batas drift untuk dinding bata (biasanya 0.5-1%) yang menyebabkan kerusakan parah pada elemen non-struktural. Hal ini mengkonfirmasi rumusan masalah pertama bahwa bangunan konvensional sangat rentan terhadap kerusakan non-struktural dan berpotensi mengalami kerusakan struktural pada gempa yang lebih kuat. Mode kegagalan dominan adalah geser pada kolom pendek (short column effect) di daerah yang memiliki bukaan jendela.

4.2. Kinerja Sistem Hibrida-1 (MH-1)

Pada MH-1, penggunaan beton diperkuat serat bambu (dengan asumsi peningkatan ketangguhan tarik 25% berdasarkan literatur) menghasilkan kurva pushover yang lebih gemuk (fatter), mengindikasikan disipasi energi yang lebih baik. Performance Point bergeser ke kondisi yang lebih aman dalam zona LS. Simpangan atap maksimum berkurang 15-20% dibandingkan MK. Detail sambungan yang diperkuat mencegah kegagalan geser prematur. Kelemahan yang teridentifikasi adalah kebutuhan kontrol kualitas pada pencampuran serat dan potensi keawetan material alami. Dari aspek biaya, estimasi menunjukkan kenaikan biaya material beton sekitar 10-15%, namun dapat diimbangi dengan pengurangan volume tulangan baja.

4.3. Kinerja Sistem Hibrida-2 (MH-2)

MH-2 menunjukkan kinerja seismik yang paling unggul dalam simulasi. Sistem EBF pada dinding baja ringan berhasil menjadi fuse yang meleleh terlebih dahulu, melindungi komponen utama. Kurva pushover menunjukkan plateau leleh yang panjang, khas dari perilaku daktail tinggi. Drift maksimum terkendali di bawah 1.5% untuk gempa level desain, mempertahankan integritas arsitektural. Temuan kunci ini menjawab rumusan masalah kedua, dengan menunjukkan bahwa sistem berbasis baja ringan yang didesain secara tepat dapat menjadi solusi sangat efektif. Tantangan utamanya adalah kebutuhan desain dan fabrikasi komponen yang presisi, serta proteksi korosi untuk iklim pesisir Gorontalo. Analisis biaya menunjukkan MH-2 memiliki biaya material tertinggi (sekitar 25% lebih tinggi dari MK), tetapi waktu pemasangan diperkirakan 30% lebih cepat.

4.4. Diskusi Komparatif dan Rekomendasi Kontekstual

Perbandingan ketiga sistem menempatkan MH-1 sebagai solusi incremental yang baik untuk program perbaikan rumah (retrofitting) secara bertahap, karena dapat diterapkan pada sistem konstruksi yang sudah familiar oleh tukang setempat. Sementara MH-2 adalah solusi disruptif yang cocok untuk bangunan baru dengan persyaratan kinerja tinggi, seperti puskesmas atau sekolah.

Implementasi di Gorontalo memerlukan pendampingan teknis dan penyederhanaan detail konstruksi menjadi modul-modul yang mudah dipasang. Kolaborasi dengan industri lokal untuk memproduksi komponen braced panel MH-2 atau campuran serat bambu untuk beton perlu didorong. Temuan ini sejalan dengan penelitian Subekti et al. (2022) yang menekankan pentingnya integrasi teknologi dan kapasitas lokal.

BAB V. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan:

- Bangunan satu lantai konvensional di Kota Gorontalo, yang direpresentasikan oleh Model Konvensional (MK), memiliki kinerja seismik yang terbatas. Analisis menunjukkan bahwa bangunan ini hanya mampu mencapai tingkat Life Safety (LS) dengan margin yang kecil, dan sangat rentan terhadap kerusakan parah pada elemen non-struktural (dinding bata) bahkan pada gempa level desain. Mode kegagalan didominasi oleh kerusakan geser pada kolom dan ketidakmampuan menahan simpangan besar.
- Dua konsep sistem struktural hibrida yang diusulkan terbukti mampu meningkatkan kinerja tahan gempa secara signifikan. Sistem Hibrida-1 (MH-1) dengan beton diperkuat serat bambu dan detail sambungan yang ditingkatkan menawarkan peningkatan kinerja yang moderat dengan biaya yang relatif terjangkau dan kemudahan adopsi oleh tenaga lokal. Sistem Hibrida-2 (MH-2) berbasis rangka baja ringan dengan bracing EBF menunjukkan kinerja terbaik dengan daktilitas dan disipasi energi yang tinggi, meski memerlukan investasi awal dan tingkat presisi yang lebih besar. Kedua sistem memenuhi prinsip keterjangkauan dan kontekstual dengan memanfaatkan material lokal (serat bambu) atau material industri yang tersedia di pasaran (baja ringan), serta dapat dirumuskan dalam pedoman aplikasi teknis yang disederhanakan untuk pemangku kepentingan di Kota Gorontalo.

Penelitian ini merekomendasikan pemerintah daerah untuk mempertimbangkan integrasi sistem MH-1 dalam program bantuan teknis perbaikan rumah dan sistem MH-2 dalam pembangunan fasilitas publik baru. Untuk penelitian lanjutan, diperlukan pengujian eksperimental fisik pada komponen kunci (seperti sambungan beton-serat bambu atau panel bracing EBF) untuk memvalidasi hasil simulasi numerik, serta studi lebih mendalam tentang daur hidup (life cycle cost) dari sistem-sistem yang diusulkan.

DAFTAR PUSTAKA

Asyhar, M., Prayuda, H., Monika, F., & Tista, M. I. (2021). The effect of coconut fiber and bamboo fiber on the mechanical properties of lightweight concrete: A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *708*(1), 012085. https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012085

Bruneau, M., Uang, C. M., & Sabelli, R. (2023). Ductile design of steel structures (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Firmansyah, A., Suhendro, B., & Wijaya, H. (2023). Seismic performance of hybrid cold-formed steel and reinforced concrete wall system: An experimental study. Structures, *47*, 2025–2037. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.043

Furukawa, S., Sato, E., & Ishikawa, Y. (2021). Development of a low-cost rocking foundation for seismic protection of residential houses in developing countries. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, *50*(3), 935–953. https://doi.org/10.1002/eqe.3385

Irsyam, M., Sengara, I. W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D. H., ... & Faizal, L. (2020). Development of the 2019 national seismic hazard maps of Indonesia. Earthquake Spectra, *36*(1_suppl), 112–136. https://doi.org/10.1177/8755293020951206

Kazemi, F., Javadinasab Hormozabad, S., & Rahimian, A. (2023). Seismic performance assessment of lightweight steel frame with yielding brace system using incremental dynamic analysis. Journal of Constructional Steel Research, *201*, 107754. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107754

Majid, T. A., & Hidayat, B. A. (2022). Lesson learned from structural damage due to the 2021 Mamuju-Majene earthquake and recommendations for earthquake-resilient buildings in Indonesia. Civil Engineering Journal, *8*(5), 1024–1041. https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-05-012

Saputra, A., Awaludin, A., & Siswosukarto, S. (2022). Experimental study on the seismic performance of bamboo-fiber-reinforced masonry walls under cyclic loading. International Journal of GEOMATE, *22*(90), 9–16. https://doi.org/10.21660/2022.90.3188

Subekti, S., Bayuaji, R., & Susanto, T. E. (2022). Toward sustainable construction in Indonesia: A review of green building materials and earthquake-resistant technology adoption. Journal of Applied Engineering Science, *20*(1), 260–270. https://doi.org/10.5937/jaes0-33817