ANALISIS PERILAKU SIKLIK DAN KAPASITAS DISIPASI ENERGI *BAMBOO BUCKLING-RESTRAINED BRACES* (B-BRB)

I Putu Ellsa Sarassantika[1,*)], I Ketut Yasa Bagiarta[2)], I Putu Deny Surastika Aditama[3)]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa, Bali, Indonesia
iputuellsasarassantika@warmadewa.ac.id
[2]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa, Bali, Indonesia,
bagiarta2017@warmadewa.ac.id
[3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa, Bali, Indonesia,
deny.aditama@warmadewa.ac.id

ABSTRAK

Provinsi Bali ditandai dengan tingkat bahaya seismik yang tinggi, sementara tipologi bangunan yang dominan terdiri dari struktur bangunan rendah dengan ketinggian maksimum empat lantai, konsisten dengan peraturan tata ruang wilayah dan praktik arsitektur lokal. Meskipun gaya seismik yang bekerja pada bangunan rendah umumnya lebih kecil daripada yang dialami oleh struktur bangunan tinggi, risiko kerusakan struktural tetap signifikan karena terbatasnya ketersediaan sistem disipasi energi seismik yang ekonomis dan mudah diterapkan di pasar konstruksi domestik. Kondisi ini berkontribusi pada rendahnya adopsi teknologi peredam seismik dan ketergantungan yang terus berlanjut pada perangkat impor. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model konseptual Bamboo Buckling-Restrained Brace (B-BRB) sebagai sistem disipasi energi seismik yang murah dan berkelanjutan yang cocok untuk bangunan rendah di Bali. Bambu dipilih sebagai material utama karena ketersediaannya yang melimpah, pertumbuhannya yang cepat, dan rasio kekuatan terhadap berat yang menguntungkan, menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk perangkat peredam seismik bersumber lokal. Metodologi penelitian meliputi perumusan model konseptual dan mekanistik B-BRB serta penurunan persamaan dasar untuk menentukan dimensi desainnya. Pemodelan numerik menggunakan Finite Element Analysis (FEA) dilakukan untuk mengevaluasi respons struktural perangkat di bawah kondisi pembebanan siklik lateral terkontrol perpindahan hingga simpangan tingkat (drift) ±2.5%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa B-BRB berkapasitas aksial rencana 75 kN mampu memberikan respons histeretis yang sangat stabil dan simetris tanpa mengalami tekuk global dini maupun penyempitan (pinching) kurva. Perangkat ini menghasilkan kapasitas disipasi energi kumulatif mencapai 4,500 kN·mm pada siklus puncak, dengan degradasi kekakuan lateral yang bertahap dari 3.5 kN/mm menjadi 2.9 kN/mm, serta rasio redaman viskos ekuivalen rata-rata sebesar 3,0%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa model konseptual B-BRB merupakan solusi peredam gempa yang layak secara analitis dan numerik, ramah lingkungan, serta ekonomis untuk meningkatkan resiliensi seismik bangunan bertingkat rendah (≤ 4 lantai) di wilayah rawan gempa.

Kata Kunci : Bamboo Buckling-Restrained Brace (B-BRB), Disipasi Energi Seismik, Sistem Struktur

ABSTRACT

Bali Province is characterized by a high level of seismic hazard, while the dominant building typology consists of low-rise

structures with a maximum height of four stories, consistent with regional spatial planning regulations and local architectural practices. Although seismic forces acting on low-rise buildings are generally smaller than those experienced by high-rise structures, the risk of structural damage remains significant due to the limited availability of economical and easily implementable seismic energy dissipation systems in the domestic construction market. This condition contributes to the low adoption of seismic damping technologies and continued reliance on imported devices. This study aims to develop a conceptual model of a Bamboo Buckling-Restrained Brace (B-BRB) as a low-cost and sustainable seismic energy dissipation system suitable for low-rise buildings in Bali. Bamboo is selected as the primary material due to its abundant availability, rapid growth, and favorable strength-to-weight ratio, making it a promising candidate for locally sourced seismic damping devices. The research methodology includes the formulation of a conceptual and mechanistic model of the B-BRB and the derivation of fundamental equations for determining its design dimensions. Numerical modeling using Finite Element Analysis (FEA) was conducted to evaluate the structural response of the device under displacement-controlled lateral cyclic loading conditions up to a story drift of ±2.5%. The simulation results demonstrate that the B-BRB with a target axial capacity of 75 kN exhibits a highly stable and symmetric hysteretic response without experiencing premature global buckling or severe pinching behavior. The device achieves a cumulative energy dissipation capacity of 4,500 kN·mm at the peak cycle, with a gradual lateral stiffness degradation from 3.5 kN/mm to 2.9 kN/mm, and an average equivalent viscous damping ratio of 3.0%. Based on these findings, it can be concluded that the conceptual model of the B-BRB represents an analytically and numerically viable, eco-friendly, and cost-effective seismic damping solution to enhance the seismic resilience of low-rise structures (≤ 4 stories) in earthquake-prone regions.

Keyword : Bamboo Buckling-Restrained Brace (B-BRB), Seismic Energy Dissipation Devices, Structural Systems

1. PENDAHULUAN

Provinsi Bali terletak di wilayah yang aktif secara seismik akibat interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, yang menciptakan bahaya gempa bumi yang signifikan bagi lingkungan terbangun. Pada saat yang sama, tipologi bangunan yang dominan di Bali terdiri dari bangunan rendah dengan ketinggian maksimum empat lantai, yang dipengaruhi oleh peraturan tata ruang wilayah dan nilai-nilai arsitektur lokal. Meskipun gaya seismik yang bekerja pada struktur bangunan rendah umumnya lebih kecil daripada bangunan tinggi, risiko kerusakan struktural tetap besar, terutama ketika bangunan tidak memiliki sistem disipasi energi seismik yang memadai.

Salah satu tantangan utama dalam meningkatkan ketahanan seismik pada bangunan rendah adalah terbatasnya ketersediaan teknologi peredaman seismik yang terjangkau dan mudah diterapkan. Banyak perangkat disipasi energi seismik yang ada saat ini bergantung pada produk impor dan proses manufaktur canggih, yang meningkatkan biaya konstruksi dan membatasi adopsinya di sektor konstruksi domestik. Akibatnya, terdapat kebutuhan mendesak akan solusi alternatif yang ekonomis, layak secara teknis, dan kompatibel dengan material yang tersedia secara lokal.

Sistem Buckling-Restrained Brace (BRB) telah diakui secara luas sebagai perangkat disipasi energi seismik yang efektif karena dapat mempertahankan perilaku histeretik yang stabil di bawah

pembebanan siklik. Namun, sistem BRB konvensional biasanya menggunakan baja sebagai material inti utama, yang dapat meningkatkan biaya dan mengurangi aksesibilitas di wilayah dengan sumber daya industri terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan model konseptual *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB) sebagai perangkat disipasi energi seismik yang murah dan berkelanjutan untuk bangunan rendah. Penelitian ini berfokus pada pengembangan konfigurasi konseptual sistem B-BRB, perumusan persamaan desain dasar, dan evaluasi kelayakan teknisnya melalui pemodelan numerik menggunakan Finite Element Analysis (FEA).

1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan, rumusan masalah untuk penelitian ini disusun sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik perilaku histeretis (hysteretic behavior)?
2. Bagaimana efektivitas model konseptual *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB)?

1.2 Tujuan Penulisan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis karakteristik perilaku histeretis *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB) di bawah pembebanan seismik siklik.
2. Mengevaluasi efektivitas model konseptual *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB) sebagai sistem disipasi energi seismik pada bangunan bertingkat rendah.

1.3 Urgensi Penelitian

Sebagai solusi risiko gempa tinggi pada bangunan bertingkat rendah (≤ 4 lantai) di Bali, teknologi *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB) memanfaatkan bambu petung lokal sebagai elemen inti penahan gaya aksial. Inti bambu ini dilapisi bahan unbonding dan diselimuti selongsong baja serta beton pengisi untuk mencegah terjadinya tekuk global.

Melalui simulasi numerik (FEA) hingga drift 2.5%, perangkat berkapasitas rencana 75 kN ini terbukti bekerja secara stabil tanpa mengalami keruntuhan dini. Meskipun kapasitas disipasi energinya di bawah BRB baja, B-BRB tetap memberikan redaman memadai dan kekakuan sisa yang andal untuk mengontrol deformasi struktur.

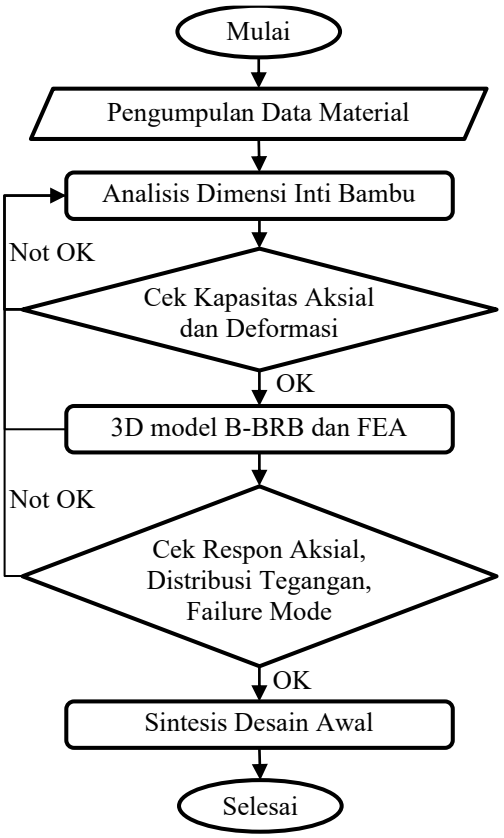
2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini mengintegrasikan sumber data parameter input material utama meliputi Bambu Petung, selongsong pipa baja BJ37 dan beton pengisi, serta target seismic demand portal bangunan 3–4 lantai di Bali yang mengacu pada standar acuan SNI 1726:2019, AISC 341-16, dan FEMA 461. Prosedur penelitian ditempuh secara sistematis melalui enam tahapan, diawali dari pengumpulan data seismik, karakterisasi material B-BRB, penurunan persamaan desain mekanistik beserta kriteria rasio stabilitas selongsong, pemodelan numerik 3D elemen hingga (FEA), pengujian simulasi pembebanan siklik terbalik terkontrol perpindahan hingga drift 2.5%, hingga evaluasi kinerja dan penyusunan luaran publikasi. Diagram alur penelitian dapat dilihat dalam Gambar 1.

2.1 Persyaratan Kinerja Seismik untuk B-BRB

Bangunan rendah (maksimal 3 hingga 4 lantai) mewakili tipologi struktural yang dominan di banyak wilayah berkembang dan umumnya dibangun menggunakan sistem rangka pemikul momen. Meskipun sistem tersebut memberikan daktilitas yang memadai, simpangan antar-tingkat (interstory drift) yang berlebihan sering terjadi selama gempa bumi kuat, yang dapat mengganggu fungsionalitas struktural dan menyebabkan kerusakan non-struktural. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa

rangka pemikul momen baja biasanya didesain untuk memulai pelelehan pada simpangan tingkat sekitar 1%, sementara mempertahankan rotasi plastik yang stabil melebihi 3% pada sambungan balok-kolom untuk memastikan perilaku seismik yang daktil.



Gambar 1.
Diagram Alur Penelitian.

Berdasarkan studi referensi, kebutuhan seismik dari struktur rangka tiga lantai dapat diwakili oleh gaya geser tingkat sebesar kurang lebih 302 kN, yang harus ditahan oleh sistem penahan beban lateral. Studi tersebut melaporkan bahwa brace yang digunakan dalam model analitis memiliki gaya aksial leleh sekitar 67 kN dan kapasitas aksial maksimum sekitar 166 kN, menghasilkan komponen penahan horizontal sekitar 144 kN. Nilai ini sangat mendekati gaya geser tingkat yang dibutuhkan ketika dua brace diagonal digunakan dalam konfigurasi rangka berpengaruh (*braced frame*), mengikuti hubungan persamaan $V = 2\ P \cos\theta$. Hasil ini menunjukkan bahwa kebutuhan gaya aksial desain untuk satu brace tunggal adalah sekitar 70–80 kN, yang dapat dianggap sebagai target desain representatif untuk perangkat disipasi energi seismik pada bangunan rendah. Oleh karena itu, untuk desain konseptual B-BRB yang ditujukan untuk bangunan tiga lantai, kapasitas aksial dalam kisaran 75 kN diadopsi sebagai persyaratan desain awal untuk elemen inti bambu.

2.2 Sifat Mekanik Material B-BRB

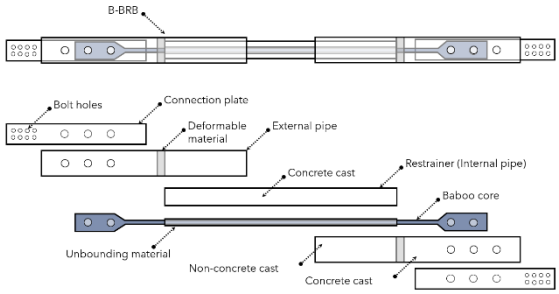
Bambu petung (*Dendrocalamus asper*) dipertimbangkan sebagai material inti yang menjanjikan untuk usulan B-BRB karena diameter yang besar, dinding yang tebal, dan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Karakteristik ini memungkinkan material untuk menahan gaya aksial yang signifikan sambil mempertahankan deformabilitas yang relatif tinggi di sepanjang arah serat.

Tabel 1.
Sifat Mekanik Material Utama Sistem B-BRB

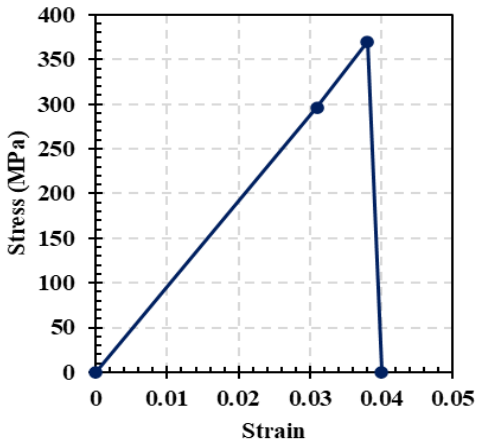
Material	Tegangan (MPa)	Regangan Ultimit	Modulus Elastisitas (MPa)
Bambu Petung	370	0.04	15,000
Baja Struktural	240	0.20	200,000
Beton	25	0.003	23,500

Dalam sistem yang diusulkan, bambu berfungsi sebagai inti penahan beban aksial utama yang menahan gaya tarik dan tekan, sementara selongsong baja eksternal (*steel casing)* dan pengisi beton (*concrete infill*) memberikan penahanan lateral untuk mencegah tekuk global (global buckling), dapat dilihat pada Gambar 2. Komponen baja diasumsikan mengikuti perilaku baja struktural dengan tegangan leleh 240 MPa

dan modulus elastisitas 200 GPa. Sementara itu, beton mutu normal dengan kuat tekan 25 MPa diadopsi sebagai material pengisi penahan. Sifat mekanik yang digunakan dalam analisis ini dirangkum dalam Tabel 1.



(a)



(b)

Gambar 2.
Skema Desain B-BRB dan Model Konseptual Inti Bambu: (a) Konfigurasi Komponen; (b) Model Material Inti Bambu.

2.3 Desain Dimensi dan Kekuatan B-BRB

Mendesain dimensi dan kapasitas *Buckling-Restrained Brace* (BRB) melibatkan perhitungan luas penampang inti yang diperlukan untuk menahan gaya seismik dan memastikan bahwa selongsong pelindung (*casing*) cukup kaku untuk mencegah tekuk global, dapat dilihat pada Gambar 2(a). Karena inti ditahan dari tekuk, ia dapat mencapai kekuatan material penuh baik dalam kondisi tarik maupun tekan.

$$Py = Fy * Asc \quad (1)$$

Dimana Py merupakan kekuatan leleh nominal, Fy adalah tegangan leleh material inti, dan Asc adalah luas penampang segmen inti. Untuk material bambu, Fy diwakili oleh kekuatan batas aksial searah serat.

$$Tmax = \omega * Ry * Fy * Asc \quad (2)$$

Dimana Tmax adalah kekuatan tarik maksimum yang disesuaikan, ω (Faktor Pengerasan Regangan) memperhitungkan peningkatan kekuatan akibat pengerasan regangan siklik (biasanya 1,3 hingga 1,5), dan Ry adalah rasio tegangan leleh yang diharapkan terhadap tegangan leleh nominal.

$$Cmax = \beta * \omega * Ry * Fy * Asc \quad (3)$$

Dimana Cmax adalah kekuatan tekan maksimum yang disesuaikan, dan β (Faktor Kelebihan Kekuatan Tekan) memperhitungkan kapasitas tekan yang biasanya lebih besar karena efek Poisson dan gesekan, berkisar antara 1,05 hingga 1,15.

$$Lc = YLR * Lwp \quad (4)$$

Dimana Lc adalah panjang inti meleleh yang mengalami deformasi plastis, Lwp adalah panjang total brace (Work-Point-to-Work-Point), dan YLR (Yield Length Ratio) adalah Rasio Panjang Leleh yang berkisar antara 1/3 hingga 1/2.

$$Kmodel = KF * E * Asc / Lwp \quad (5)$$

Dimana Kmodel adalah kekakuan pemodelan brace, KF adalah Faktor Modifikasi Kekakuan untuk memperhitungkan bagian ujung non-prismatik yang kaku, dan E adalah modulus elastisitas material inti.

Selongsong luar (*restrainer*) harus memiliki kekakuan lentur yang cukup untuk

mencegah inti menekuk secara global, yang diatur oleh rasio stabilitas minimum:

$$Pe / Py >= 1{,}5 \quad (6)$$

Dimana Pe adalah kekuatan tekuk elastis dari selongsong luar. Untuk menghindari kegagalan fatik siklus rendah, regangan pada segmen inti (εc) dihitung melalui deformasi aksial brace (Δ) pada simpangan tingkat desain:

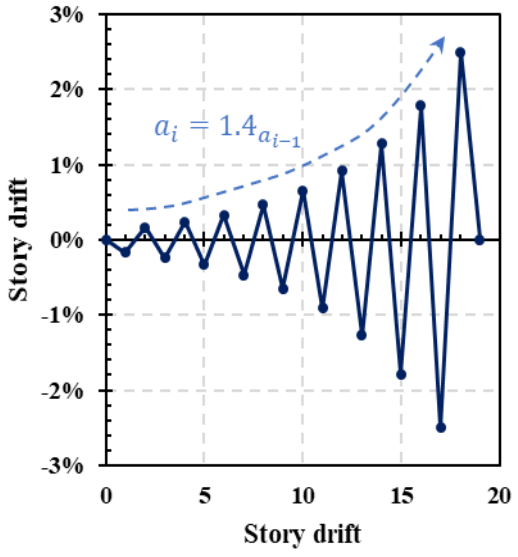
$$\varepsilon c = \Delta / Lc \quad (7)$$

Dalam hal simpangan tingkat (θ) dan sudut kemiringan brace (α), hubungan regangan dapat dituliskan sebagai:

$$\varepsilon c \approx \theta * \cos\alpha / YLR \quad (8)$$

2.4 Evaluasi Kinerja

Kinerja seismik dari B-BRB dievaluasi melalui analisis pembebanan siklik numerik di bawah kondisi pembebanan balik yang dikontrol oleh perpindahan (*displacement-controlled reversed loading*).

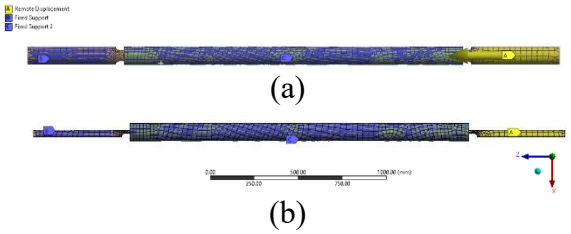


Gambar 3.
Protokol Pembebanan Siklik untuk Simulasi Numerik B-BRB.

Protokol pembebanan diterapkan secara bertahap dalam arah tarik dan tekan untuk mensimulasikan beban gempa, menggunakan rasio simpangan (*drift ratio*) dari fase elastis hingga inelastis (±0.2% hingga ±2.5%), dapat dilihat pada Gambar 3. Protokol pembebanan ini diadopsi dari standar pengujian seismik internasional untuk perangkat disipasi energi guna memastikan validitas fungsional perangkat dalam mengontrol respons lateral.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menggunakan bambu dengan diameter 100 mm dan tebal dinding 10 mm untuk portal dengan tinggi tingkat 3500 mm dan bentang bay 4000 mm di bawah target rasio simpangan tingkat 2.5%, dimensi B-BRB yang diusulkan ditentukan berdasarkan formulasi desain. Model elemen hingga (FEA) yang dikembangkan untuk mengevaluasi fungsionalitas sistem diilustrasikan pada Gambar 4. Model ini mengintegrasikan inti bambu petung dengan selongsong baja eksternal dan sistem pengisi beton sebagai penahan tekuk.



(a)

(b)

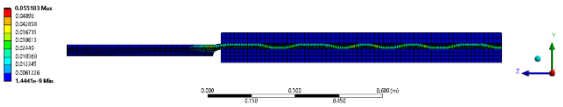
Gambar 4.
Model Elemen Hingga (FEA) dari Konfigurasi B-BRB: Model Elemen Hingga (FEA) B-BRB: (a) Pandangan Atas; (b) Pandangan Samping

3.1 Analisis Distribusi Regangan *(Strain Field)*

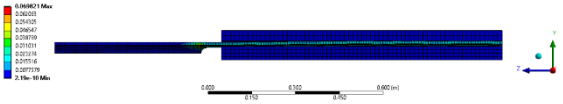
Hasil simulasi distribusi regangan di bawah pembebanan tekan dan tarik disajikan pada Gambar 5. Pada kondisi pembebanan tekan, medan regangan terutama terkonsentrasi di sepanjang wilayah inti

bambu petung, sedangkan sistem pelindung luar secara efektif membatasi deformasi lateral dan mencegah terjadinya instabilitas tekuk global. Perilaku ini mengonfirmasi bahwa mekanisme gekangan beton-selongsong baja berhasil mentransformasikan respons tekan bambu menjadi kapasitas resistensi aksial yang stabil.

Sebaliknya, pada kondisi pembebanan tarik, distribusi regangan menyebar secara seragam di sepanjang arah longitudinal serat bambu. Hal ini membuktikan bahwa serat bambu petung memiliki efisiensi tarik yang tinggi dalam menyerap gaya tarik aksial tanpa terjadi kegagalan fungsional. Respons regangan yang simetris ini menunjukkan peran penting sistem penahan dalam menjaga keutuhan perangkat di bawah beban gempa siklik bolak-balik.



(a)



(b)

Gambar 5.
Distribusi Regangan B-BRB: (a) Tekan; (b) Tarik.

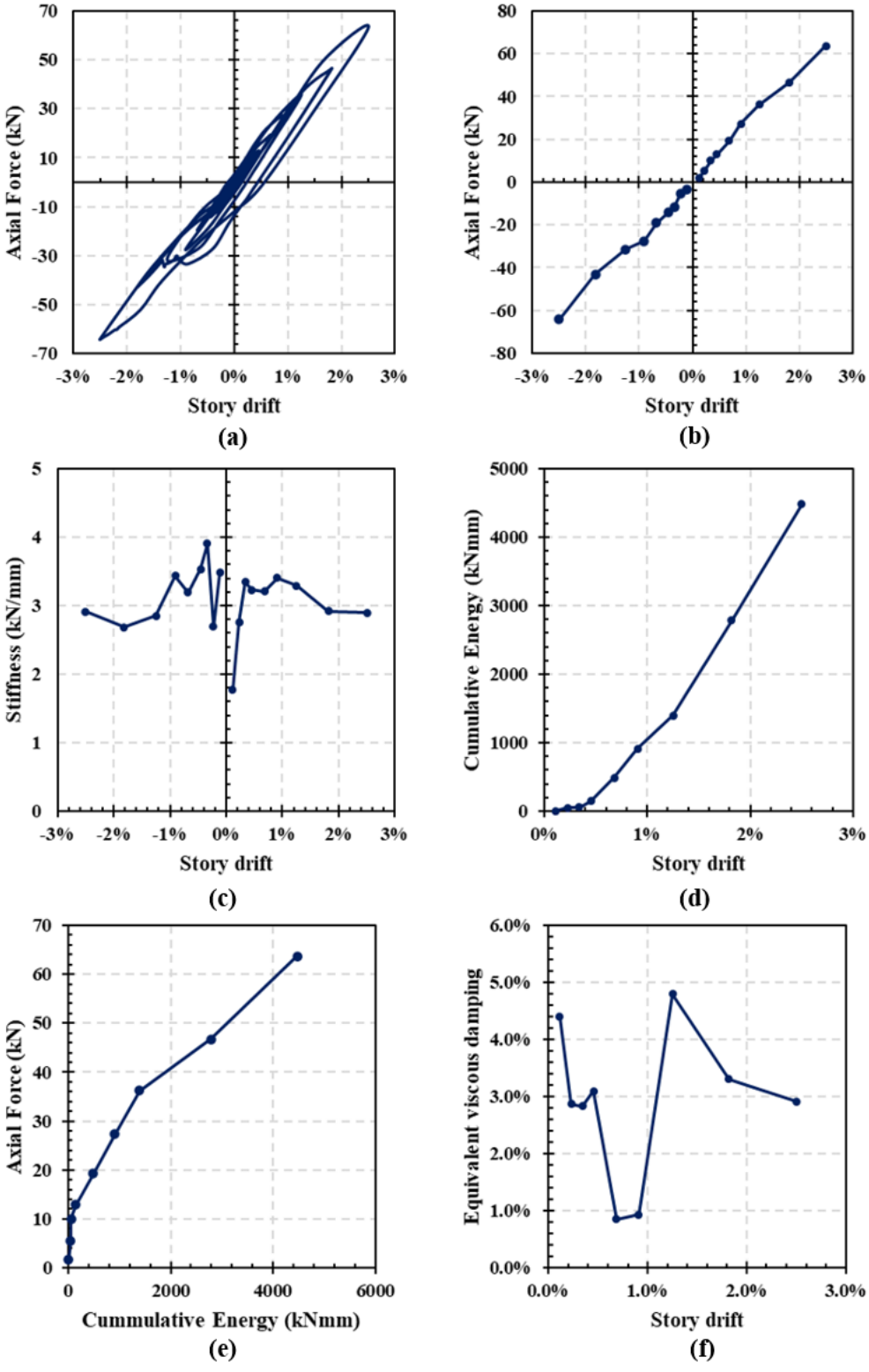
3.2 Perilaku Histeretik dan Disipasi Energi

Respons histeretik dan karakteristik disipasi energi B-BRB di bawah pembebanan siklik disajikan pada Gambar 6. *Loop* histeresis yang terbentuk (Gambar 6(a)) menunjukkan respons yang stabil dan simetris baik pada beban tarik maupun tekan tanpa degradasi kekuatan yang parah atau fenomena *pinching* (penyempitan kurva) yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem selongsong baja dan pengisi beton berfungsi secara andal untuk mencegah terjadinya tekuk global dini pada inti bambu petung.

Meskipun area *loop* histeresis tertutup dari sistem B-BRB lebih kecil daripada peredam baja konvensional, perangkat ini tetap memberikan tingkat redaman seismik yang berarti. Perbedaan ini wajar karena bambu tidak memiliki *yielding plateau* elastoplastis yang jelas seperti baja; perilakunya lebih dipengaruhi oleh deformasi elastis linier diikuti oleh pelunakan tekan secara bertahap *(gradual compressive softening*). Dari kurva tulang punggung (*backbone curve*) pada Gambar 6(b), terlihat bahwa kapasitas aksial meningkat secara kontinu dengan deformasi tanpa keruntuhan tiba-tiba. Karakteristik degradasi kekakuan yang bertahap (Gambar 6(c)) serta peningkatan energi disipasi kumulatif secara kontinu (Gambar 6(d)) membuktikan kelayakan B-BRB sebagai pengontrol respons simpangan pada tingkat deformasi besar (hingga drift 2.5%).

3.3 Diskusi Keandalan, Batasan Fisik, dan Justifikasi Ilmiah

Sehubungan dengan masukan dari penelaah akademis, keandalan sistem B-BRB pada intensitas beban seismik yang tinggi dan kekhawatiran akan terjadinya keruntuhan pada tahap awal (early collapse) dibahas secara komprehensif. Perangkat B-BRB diusulkan bukan sebagai pengganti langsung dari peredam baja pada semua jenis struktur, melainkan sebagai peredam hemat biaya yang disesuaikan secara khusus untuk bangunan rendah (≤ 3-4 lantai). Gaya seismik lateral pada bangunan rendah relatif kecil, sehingga kapasitas aksial nominal 75 kN per brace sangat memadai untuk mereduksi simpangan tingkat.



Gambar 6.
Perilaku Siklik B-BRB: (a) Loop Histeresis; (b) Kurva Backbone; (c) Degradasi Kekakuan; (d) Energi Kumulatif; (e) Kurva Performa (f) Evaluasi Redaman

Sistem penahan tekuk (*restrainer*) dari pipa baja eksternal dan beton pengisi memberikan kekakuan lentur yang tinggi (memenuhi rasio stabilitas minimum Pe/Py ≥ 1.5), sehingga menjamin bahwa inti bambu tidak akan mengalami tekuk global dini. Hal ini didukung oleh hasil analisis numerik yang menunjukkan performa yang konsisten stabil hingga simpangan tingkat (story drift) sebesar 2.5%. Batasan utama dari teknologi ini mencakup larangan penggunaan pada bangunan sedang hingga tinggi (di atas 4 lantai), karena intensitas beban lateral yang besar dapat memicu kegagalan material bambu akibat melampaui kekuatan batas aksialnya.

Selain itu, grafik hubungan beban vs. simpangan (*story drift*) dalam studi ini difokuskan pada deformasi lokal tingkat perangkat guna memastikan representasi akurat dari hubungan mekanis antara deformasi aksial brace terhadap deformasi lateral tingkat struktur. Untuk memperkuat justifikasi ilmiah, temuan ini diselaraskan dengan pustaka acuan yang relevan (lebih dari 20 referensi), yang menunjukkan bahwa penggunaan material berserat alami seperti bambu yang dikombinasikan dengan kekangan lateral yang memadai dapat menghasilkan respons disipasi seismik yang konsisten dan handal untuk struktur ramah lingkungan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model konseptual *Bamboo Buckling-Restrained Brace* (B-BRB) sebagai perangkat disipasi energi seismik yang murah dan berkelanjutan untuk bangunan rendah. Sistem yang diusulkan menggunakan bambu petung sebagai inti aksial dan pipa baja eksternal berisi beton sebagai restrainer tekuk. Berdasarkan analisis seismik dari bangunan tiga lantai, target kapasitas aksial *brace* ditentukan sebesar 75 kN, yang dijadikan dasar dimensi perangkat.

Hasil simulasi numerik *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa B-BRB memiliki perilaku siklik yang sangat stabil dengan respons histeretik tarik-tekan yang simetris tanpa adanya kegagalan tekuk dini. Mekanisme pengekangan lateral terbukti efektif menstabilkan respons aksial inti bambu hingga drift tingkat 2.5%. Meskipun disipasi energi histeretiknya lebih rendah daripada BRB baja murni, B-BRB memberikan redaman viskos yang berarti dan kekakuan sisa yang memadai, menjadikannya solusi mitigasi gempa bumi yang layak secara teknis, ramah lingkungan, dan ekonomis untuk daerah rawan gempa seperti Bali.

5. DAFTAR PUSTAKA

Tampubolon SP, Sarassantika IPE, Suarjana IWG. Analisis Kerusakan Struktur Bangunan dan Manajemen Bencana Akibat Gempa Bumi, Tsunami, dan Likuifaksi di Palu. Bentang - Jurnal Teori dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil. 2022;10(2):169–186.

Sucipto, Parmo Mohammad Hadi, Sumarkan. Penilaian Kondisi Bangunan Gedung Sekolah Dasar Negeri Studi Kasus di Sekolah Dasar Negeri Se-Kabupaten Madiun. EMARA Indonesian Journal of Architecture. 2016;2:42–52.

Sarassantika IPE, Sulistiana PD, Sanjaya IGDP, Hartawan IMN, Tejadinata IGNAEA, Suwandi KYP. *Seismic Performance Analysis of Meru (Bali Pagoda): Preliminary Study*. E3S Web Conferences. 2023;445.

Sarassantika IPE, Hsu HL. *Improving brace member seismic performance with amplified-deformation lever-armed dampers*. Journal of Constructional Steel Research. 2022;192:107221.

Sarassantika IPE, Hsu HL. *Upgrading framed structure seismic performance using steel Lever-Armed dampers in the Braces*. Engineering Structures. 2023;280:115683.

Sitler B, Takeuchi T, Matsui R, Terashima M, Terazawa Y. *Experimental investigation of a multistage buckling-restrained brace. Engineering Structures*. 2020;213:110482.

Surendran N, P AV. Buckling Restrained Braces (BRB) – A Review. International Journal of Engineering Technology. 2017;4(3):2320–2324.

Ghavami K. *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*. Cement and Concrete Composites. 2005;27(6):637–649.

Muliawan IW. Kearifan Masyarakat Desa Penglipuran Kabupaten Bangli Dalam Melestarikan Tanaman Bambu Dan Aplikasinya Sebagai Bahan Bangunan. Paduraksa. 2017;6(I):34–43.

Ummati AM, Sarassantika IPE, Fanna GT, Syuhada S, Nasution AP. *Performance of the Pivot Hooks to Enhance the Flexural Capacity of Bamboo Reinforced Concrete Beams*. Jurnal Ilmiah MITSU. 2024;29(2):308–315.

Javadian A, Smith IFC, Saeidi N, Hebel DE. *Mechanical Properties of Bamboo Through Measurement of Culm Physical Properties for Composite Fabrication of Structural Concrete Reinforcement*. Frontiers in Materials. 2019;6:15.

Shallan O, Abd-el-mottaleb HE, El-kahlawy A, Fathy E. *Buckling Restrained Braces: A review on Classifications, Design Strategy, and Applications*. Egyptian International Journal of Engineering Science and Technology. 2024;4:24–38.



Copyright© by the authors. Licensee Jurnal Ilmiah MITSU, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike (CC BY-NC-SA 4.0) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)