



JURNAL REKAYASA, TEKNOLOGI, DAN SAINS
ISSN 2541-4750 (Print)
ISSN 2549-984X (Online)

INFORMASI ARTIKEL

Received: Desember, 13 2025

Revised: January, 18 2026

Available online: January, 31 2026

at : <http://ejournalmalahayati.ac.id/index.php/teknologi/index>

Potensi konstruksi *tunnel reciprocal* untuk hunian pasca bencana dengan pendekatan parametrik

Fasha Nurliansyah Mahendra¹, Galuh Fajarwati^{1*}, Maqbul Kamaruddin¹

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

Korespondensi Penulis: Galuh Fajarwati*. Email: galuh.fajarwati@ar.itera.ac.id

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara yang memiliki intensitas bencana alam yang tinggi. Sebagai negara berkembang, tentunya Indonesia sangat terdampak terutama dalam sisi ekonomi. Dampak ekonomi tersebut dipengaruhi oleh dampak personal dan dampak kerusakan. Dampak personal dapat diselesaikan dengan pemberdayaan masyarakat terhadap tanggap bencana. Sedangkan dampak kerusakan hanya bisa diatasi dengan pembangunan *shelter* sebagai bangunan sementara yang menggantikan bangunan yang hancur. Keberadaan bangunan sementara tersebut merupakan sebuah usaha agar roda perekonomian dapat cepat berputar kembali. BNPB mengungkapkan bahwa masalah yang dihadapi dalam membangun *shelter* adalah pembangunan yang lambat, dan anggaran yang terbatas. Produksi material di wilayah bencana juga berhenti, sehingga material yang tersedia terbatas. Dalam membangun *shelter* pasca bencana di Indonesia, Andry Widyowijatnoko yang merupakan seorang arsitek mengusulkan penggunaan struktur *tunnel reciprocal frame* sebagai *shelter* pasca bencana. Bangunan tersebut dapat dibangun menggunakan material kayu ataupun bambu yang tersedia di sekitar area bencana. Penelitian ini akan menggali potensi dari *tunnel reciprocal* untuk mengetahui kemungkinan untuk dikembangkan menjadi hunian tetap bagi korban terdampak, dengan menggunakan pendekatan parametrik untuk melakukan analisis struktur. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk membantu percepatan proses pemulihan pasca bencana.

Kata Kunci: bencana, parametrik, pemberdayaan masyarakat, shelter, tunnel reciprocal

ABSTRACT

The Potential of Reciprocal Tunnel Construction for Post-Disaster Housing with a Parametric Approach. As disasters continue to occur and intensify, Indonesia is significantly affected, particularly in terms of its economy. The economic impacts are influenced by both personal losses and physical damage to infrastructure. Personal impacts can be mitigated through community empowerment and disaster preparedness initiatives. In contrast, the impacts of physical destruction can only be addressed by providing temporary shelters to replace damaged or destroyed buildings. The availability of temporary shelters is essential to accelerate the recovery process and restore economic activities in affected areas. According to the Indonesian National Disaster Management Agency (BNPB), the main challenges in post-disaster shelter construction are the slow construction process and limited funding. In addition, the production and supply of building materials are often disrupted in disaster-affected areas, resulting in material shortages. To address these challenges, Indonesian architect Andry Widyowijatnoko

DOI: <https://doi.org/10.33024/jrets.v10i1.26887>

proposed the use of a tunnel reciprocal frame structure as a post-disaster shelter. This structural system can be constructed using locally available materials such as timber or bamboo, making it suitable for emergency conditions. This study aims to explore the potential of the tunnel reciprocal frame system and evaluate its feasibility for further development into permanent housing for disaster-affected communities by employing a parametric approach for structural analysis. The findings are expected to provide a scientific reference for improving post-disaster housing strategies and supporting a faster and more sustainable recovery process.

Keywords: disaster, parametric design, community empowerment, shelter, tunnel reciprocal frame.

1. LATAR BELAKANG

Bencana alam yang sering terjadi di Indonesia antara lain banjir, kebakaran, angin topan, dan tanah longsor. Hampir setiap provinsi di Indonesia memiliki catatan bencana alam yang pernah terjadi. Dampak dari bencana alam tersebut seringkali menimbulkan kerugian berupa harta benda dan hilangnya nyawa (Yana, 2018). Bencana adalah kejadian luar biasa yang disebabkan oleh faktor alam dan non alam serta berdampak pada manusia dan lingkungan (Parker, 1992). Indonesia juga merupakan negara yang rentan terhadap gempa bumi dan tsunami. Hal ini disebabkan karena letak geologis Indonesia yang berada pada pertemuan 3 lempeng litosfer besar, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia. Gaya-gaya antar lempeng selalu bergeser dan menekan patahan, baik di darat maupun di laut (Husein, 2016). Selain itu, Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki gunung berapi paling aktif di dunia, lebih dari 30% gunung berapi aktif dunia ada di Indonesia. Daerah vulkanik ini umumnya padat penduduk, karena tanah yang subur berfungsi untuk kebutuhan pertanian (Pratomo, 2006). 95% bencana alam yang sering terjadi di Indonesia setiap tahun diantaranya adalah bencana hidrometeorologi seperti banjir, kebakaran, puting beliung, dan tanah longsor (Pudjiastuti, 2019).

Persebaran titik gempa saat ini telah tersebar melalui jalur dari lempeng di hampir seluruh wilayah Indonesia. Variasi kedalaman pusat gempa yang dialami antara lain gempa dangkal merupakan gempa dengan radius kedalaman < 70 KM, gempa menengah merupakan gempa dengan radius kedalaman 70 KM – 300 KM, dan gempa dalam adalah gempa dengan radius kedalaman > 300 KM (Saputra, 2016).

Bencana tsunami yang dialami oleh warga Palu, Sulawesi Tengah pada tahun 2018, menyebabkan banyak warga yang kehilangan rumah tinggal. Jumlah korban bencana yang cukup besar, berpengaruh kepada tingginya kebutuhan *shelter* sebagai tempat tinggal sementara. Andry Widyowijatnoko dosen dan arsitek dari Institut Teknologi Bandung, mengaggas dibangunnya

shelter dari material bambu sebagai solusi atas kebutuhan rumah tinggal sementara bagi korban bencana. *Shelter* bambu dibangun dalam bentuk rangka *tunnel reciprocal frame* dari rancangan tersebut dapat dihasilkan bentangan selebar 7 hingga 8 meter. Luas tersebut dapat mengakomodasi kegiatan kesehatan, penyuluhan, dan kegiatan publik lainnya (Permana, 2018).

Penelitian ilmiah tentang struktur *reciprocal frame* pertama kali dilakukan pada tahun 1989 oleh Graham Brown, seorang perancang asal inggris. Studi berikutnya dilakukan oleh John Chilton pada tahun 1992, 1994, dan 1995. Penelitian tersebut memiliki fokus pada sistem struktur dan prinsip *reciprocal frame* (Asefi, 2019). Mengaitkan teknologi *reciprocal frame* dengan *shelter* pasca bencana pada penelitian berikutnya dinilai diperlukan, mengingat kebutuhan *shelter* yang meningkat seiring dengan intensitas bencana yang terjadi di Indonesia. *Reciprocal frame* memiliki sifat self-supported yang minimal terdiri atas 3 batang atau lebih, dan dapat disusun dengan batang yang pendek dengan dukungan sambungan yang tipikal antara satu sama lain (Song, 2013). Beberapa keuntungan dalam menggunakan *reciprocal frame* adalah *Reciprocal frame* dapat disusun dengan batang yang pendek, hingga tersusun menjadi bangunan bentang lebar, disusun secara kompleks dan konsisten, sambungan dapat disusun menggunakan material yang sama, dan cara yang sama, dan terdiri atas batang yang dapat difabrikasi (Larsen, 2011).

Kelebihan tersebut, dapat membantu memenuhi kebutuhan *shelter* atau bangunan sementara untuk menggantikan bangunan yang hancur, *shelter* yang dapat dibangun dengan material yang identik akan membantu proses pembangunan melihat kondisi material di area pasca bencana yang akan sangat terbatas.

Konstruksi *Reciprocal Frame* merupakan sistem struktur yang disusun dari beberapa batang pendek dan saling terkoneksi membentuk bentangan yang luasnya bergantung pada panjang masing-masing batang (Kohlhammer, 2011). Menurut Larsen, *Reciprocal Frame* merupakan konstruksi yang terdiri dari elemen-elemen linier yang saling menahan dan mengunci, membentuk

struktur datar, horizontal atau sistem rangka tiga dimensi yang berirama. Jumlah minimum batang utama yang diperlukan untuk membuat struktur *Reciprocal Frame* bekerja adalah tiga buah. Konstruksi ini telah ada sejak abad ke 11 sebagai konstruksi tradisional arsitektur di Cina dan Jepang. Sambungan dibuat sedemikian rupa untuk mengurangi penggunaan logam pada sambungan, sehingga konstruksi sengaja dibuat kompleks dan saling menahan untuk mencapai kestabilan yang konsisten walaupun terjadi kerusakan pada salah satu batang *frame*. Namun pada beberapa kasus, rancangan *reciprocal frame* menggunakan logam pada konektor batang seperti mur baut untuk memastikan kekuatan dan ketahanan konstruksi (Godthelp, 2019).

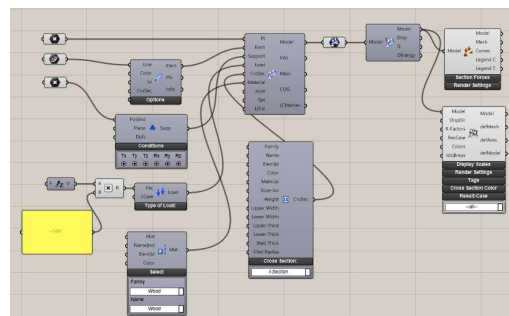
Pekerjaan rekonstruksi dan pembangunan pasca bencana di negara berkembang memiliki beberapa skenario ekstrem dan kendala yang menantang. Pertama adalah keterbatasan sumber daya dalam hal pendanaan, materi, waktu, keahlian, dan aksesibilitas lahan. Dengan melalui pemodelan parametrik akan memungkinkan desain dapat disesuaikan dengan kebutuhan lahan dan diproduksi secara massal (fabrikasi). Kedua, beberapa organisasi dalam pekerjaan pengembangan memiliki peraturan untuk meninjau kembali pekerjaan setelah selesai, untuk menguji apakah desain bekerja sesuai dengan rencana. Bahkan jika evaluasi pasca hunian dilakukan, ini sering tidak diaplikasikan ke dalam rangkaian desain berikutnya karena kurangnya platform terintegrasi untuk mempertahankan pengetahuan terkait *shelter* pasca bencana (Yeung, 2011).

Desain komputasi telah membuktikan memiliki potensi yang kuat sebagai alat dalam menciptakan modularitas, produksi massal, dan fabrikasi secara otomatis, terutama jika kasusnya adalah hunian atau *shelter* pasca bencana (Karaoglan, 2019). Potensi tersebut dapat dimanfaatkan untuk mencari tahu kelayakan rancangan *shelter* pasca bencana inovasi arsitek untuk diterapkan secara menerus. Salah satunya adalah untuk mengetahui potensi rancangan *tunnel reciprocal frame* sebagai *shelter* pasca bencana.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dalam menganalisis struktur, penggunaan *software grasshopper* dan *karamba* berguna untuk mengetahui simulasi respon deformasi konstruksi terhadap tekanan yang diuji. Sifat material yang disimulasikan pada konstruksi *tunnel reciprocal* berupa sifat material yang

menyerupai kayu. Pada hasil simulasi dapat diketahui bagian pada konstruksi yang paling beresiko untuk lepas, dan juga mengetahui kemungkinan *buckling* yang terjadi saat konstruksi menghadapi tekanan. Tahap penelitian diawali dengan studi literatur mengenai sistem struktur reciprocal, sifat mekanik kayu, serta analisis struktur menggunakan metode elemen hingga. Selanjutnya dilakukan perancangan sampel model tiga dimensi tunnel reciprocal. Model kemudian diberi sifat material kayu, kondisi tumpuan pada pondasi, serta pembebanan berupa tekanan sebesar 100 kali gravitasi (100 G). Hasil simulasi dianalisis untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, dan potensi buckling pada setiap elemen struktur, khususnya pada sambungan dan balok horizontal yang menerima beban terbesar. Tahap akhir dilakukan dengan mengevaluasi hasil analisis untuk menilai kinerja struktur serta menyusun rekomendasi pengembangan desain tunnel reciprocal yang lebih aman, stabil, dan efisien.

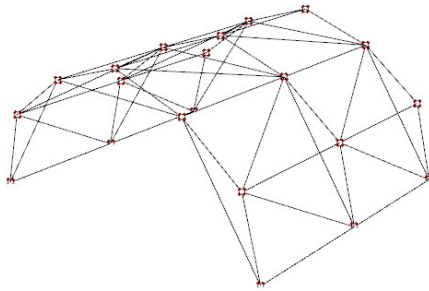


Gambar 1. Algoritma Analisis Struktur

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

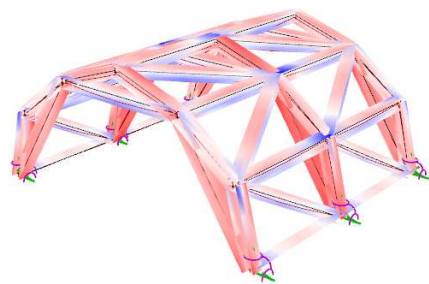
Model *tunnel reciprocal* yang dibuat untuk simulasi berukuran lebar bentangan 8 meter dan panjang *tunnel* 7 meter. Rancangan tersusun oleh 3 buah batang kayu sepanjang 3,8 meter dan 6 batang kayu sepanjang 2 meter. Jarak antar portal adalah 3,5 meter untuk menyesuaikan dengan batasan panjang kayu yang tersedia di pasaran. Sifat mekanik kayu pada penelitian ini dimodelkan secara kuantitatif menggunakan parameter material yang meliputi modulus elastisitas (E) sebesar ± 10 GPa, rasio Poisson (ν) sebesar 0,35, massa jenis (ρ) sekitar 550 kg/m^3 , kuat tekan sejajar serat sekitar 40 MPa, kuat tarik sejajar serat

sekitar 80 MPa, kuat lentur sekitar 75 MPa, dan kuat geser sekitar 9 MPa. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai input pada simulasi Finite Element Method (FEM) untuk menganalisis distribusi tegangan, deformasi, dan potensi buckling pada struktur tunnel reciprocal.

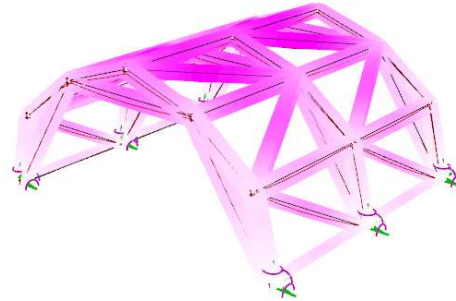


Gambar 2. Rancangan Tunnel Reciprocal

Rancangan *tunnel reciprocal* diuji menggunakan tekanan dengan kekuatan 100 kali gravitasi, dimana konstanta gravitasi Newton adalah sebesar $1\text{ G} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$. Pada pengujian tekanan ini terlihat bahwa bagian konstruksi yang menumpu tekanan lebih besar daripada bagian lainnya adalah pada bagian sambungan. Sedangkan bagian lainnya adalah bagian balok horizontal yang berpotensi mengalami *buckling* ketika menumpu beban di atasnya.

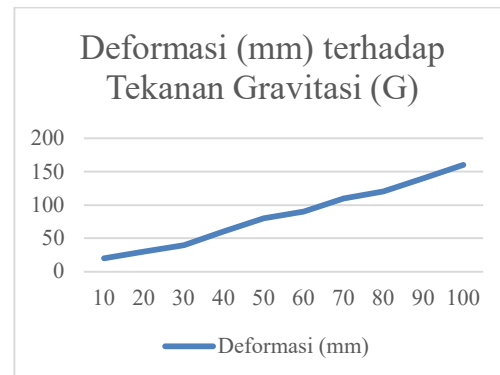


Gambar 3. Analisis Struktur Pengujian Tekan
Analisis struktur berikutnya adalah potensi deformasi yang dialami oleh konstruksi *tunnel reciprocal*. Pondasi pada konstruksi membuat area bagian bawah mengalami lebih sedikit deformasi daripada bagian atas. Hal ini memungkinkan bangunan akan runtuh ke bagian dalam bangunan apabila mengalami beban berlebih.



Gambar 4. Analisis Struktur Deformasi

Deformasi yang dialami oleh konstruksi kayu cukup stabil seiring dengan bertambahnya tekanan pada konstruksi *tunnel reciprocal*. Kemungkinan *buckling* dipengaruhi oleh jenis kayu apa yang akan diaplikasikan pada proyek di lapangan, hal ini disebabkan setiap jenis kayu memiliki sifat mekanis yang berbeda-beda.



Gambar 5. Grafik Analisis Struktur Deformasi

Berdasarkan grafik Deformasi (mm) terhadap Tekanan Gravitasi (G), terlihat bahwa besarnya deformasi meningkat seiring bertambahnya tekanan gravitasi yang diberikan pada struktur tunnel reciprocal. Pada pembebanan 10 G, deformasi masih relatif kecil yaitu sekitar 20 mm, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 160 mm pada pembebanan 100 G. Pola kenaikan yang hampir linier menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi elastis pada tahap awal pembebanan. Namun, mulai pada rentang 60–70 G, laju deformasi mulai meningkat lebih cepat, yang mengindikasikan berkurangnya kekakuan (*stiffness*) struktur akibat meningkatnya tegangan pada elemen dan sambungan.

Dengan menggunakan kayu sebagai material struktur (modulus elastisitas ± 10 GPa, kuat tekan sejajar serat ± 40 MPa, kuat lentur ± 75 MPa, dan kuat geser ± 9 MPa), deformasi yang mencapai sekitar 160 mm pada beban 100 G menunjukkan bahwa struktur telah mengalami lendutan yang cukup besar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa beberapa elemen kemungkinan telah mendekati batas kekuatan elastisnya, terutama pada batang horizontal dan daerah sambungan reciprocal yang menjadi lokasi konsentrasi tegangan.

Potensi kegagalan pertama yang kemungkinan terjadi adalah *buckling* (tekuk) pada batang kayu yang bekerja dominan sebagai elemen tekan. Hal ini disebabkan kayu meranti memiliki modulus elastisitas yang sedang sehingga batang dengan rasio panjang terhadap penampang yang besar akan kehilangan stabilitas sebelum mencapai kuat tekan maksimum. Setelah *buckling* terjadi, distribusi beban menjadi tidak merata dan meningkatkan tegangan pada sambungan.

Selain *buckling*, kegagalan geser pada sambungan juga berpotensi terjadi karena kuat geser kayu meranti relatif lebih rendah (sekitar 9 MPa) dibandingkan kuat tekan dan kuat lenturnya. Sambungan reciprocal akan menerima kombinasi gaya tekan, geser, dan momen, sehingga retak awal umumnya muncul pada area kontak atau lubang baut/pasak apabila menggunakan sambungan mekanis.

4. SIMPULAN

Teknik pemasangan dan material dari sambungan akan sangat mempengaruhi kekuatan dari rancangan *tunnel reciprocal*, hal ini dapat dilihat dari bagian sambungan yang merupakan bagian dengan kerentanan cukup tinggi ketika menerima tekanan. Modifikasi konstruksi untuk memperkuat bagian tengah akan berguna untuk mengurangi potensi *buckling* pada kayu. Semakin pendek kayu yang digunakan maka akan semakin kecil kemungkinan *buckling*, namun biaya yang dikeluarkan untuk membuat sambungan akan lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada **Institut Teknologi Sumatera**

(ITERA) melalui **Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM)** yang telah memberikan dukungan dan fasilitasi sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan izin, bantuan, serta dukungan selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Asefi, M., & Bahremandi-Tolou, M. (2019). Design challenges of reciprocal frame structures in architecture. *Journal of building Engineering*, 26, 100867.
- Godthelp, T. S. (2019). Timber reciprocal frame structures (Doctoral dissertation, Master's Thesis, Eindhoven university of technology).
- Husein, S. (2016). Bencana gempabumi. In *Proceeding of DRR Action Plan Workshop: Strengthened Indonesian Resilience: Reducing Risk from Disasters*.
- Karaoğlu, F. C., Alaçam, S. (2019). Design of a post-disaster shelter through soft computing. *International Journal of Architectural Computing*, 17(2), 185-205.
- Kohlhammer, T., & Kotnik, T. (2011). Systemic behaviour of plane reciprocal frame structures. *Structural Engineering*
- Larsen, O. P. (2007). *Reciprocal frame architecture*. Routledge.
- MLIT of Japan. (2014). <https://www.ktr.mlit.go.jp/showa/tokyorinkai/dinfo/img/201403.pdf>
- Parker. (1992). *Pencegahan dan Manajemen Bencana*. PT Gramedia Utama. Jakarta.
- Permana, A. (2018). Bantu Korban Bencana Palu, ITB Bangun Shelter dari Bambu Sebagai Hunian Sementara. Diakses pada 18 November 2021, dari <https://www.itb.ac.id/berita/detail/56859/bantu-korban-bencana-palu-itb-bangun-shelter-dari-bambu-sebagai-hunian-sementara>.
- Pratomo, I. (2006). Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah. *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(4), 209-227.
- Pudjiastuti, S. R. (2019). Mengantisipasi dampak bencana alam. *Jurnal Ilmu Pendidikan (JIP) STKIP Kusuma Negara*, 10(2), 1-14.

- Saputra, H., Arsyad, M., & Sulistiawaty, S. (2016). Studi Analisis Parameter Gempa dan Pola Sebarannya Berdasarkan Data Multi-Station (Studi Kasus Kejadian Gempa Pulau Sulawesi Tahun 2000-2014). *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 12(1), 83-87.
- Song, P., Fu, C. W., Goswami, P., Zheng, J., Mitra, N. J., & Cohen-Or, D. (2013). Reciprocal frame structures made easy. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), 1-13.
- Yana, M. S., Setiawan, L., Ulfa, E. M., & Rusyana, A. (2018). Penerapan Metode K-Means dalam Pengelompokan Wilayah Menurut Intensitas Kejadian Bencana Alam di Indonesia Tahun 2013-2018. *Journal of Data Analysis*, 1(2), 93-102.
- Yeung, W. K., & Harkins, J. (2011). Digital architecture for humanitarian design in post-disaster reconstruction. *International Journal of Architectural Computing*, 9(1), 17-31.