

KINERJA SISTEM STRUKTUR RUMAH TRADISIONAL AMMU HAWU DALAM MERESPON BEBAN SEISMIK Performance of *Ammu Hawu* Structure System in Responding Seismic Load

¹I Ketut Suwantara, ²Putu Ratna Suryantini

Balai Pengembangan Teknologi Perumahan Tradisional Denpasar
Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum
Jl. Danau Tamblingan No. 49 Sanur, Denpasar

¹E-mail : tara_iwan@yahoo.com

²E-mail : ratnasurya_putu@yahoo.com

Diterima : 25 April 2014 ; Disetujui : 30 Mei 2014

Abstrak

Ammu Hawu merupakan salah satu rumah tradisional dengan struktur kayu Lontar (Borassus flabelifer), memiliki kestabilan secara struktural terhadap beban lateral gempa. Hal ini dibuktikan dengan kondisi struktur yang tetap utuh ketika terjadi gempa Flores (2012). Penelitian ini mengkaji kinerja sistem struktur keseluruhan (3 dimensi) secara numerik dengan input data berupa hasil uji sifat mekanis elemen struktur, friksi pada pondasi, sambungan terkritik pada struktur, dan rekam data gempa riwayat waktu Flores. Hasil analisis menunjukkan deformasi yang terjadi melebihi kinerja batas layan, namun belum melebihi kinerja batas ultimit yang disyaratkan pada peraturan gempa Indonesia, kinerja struktur dinilai baik karena gaya-gaya dalam yang terjadi pada elemen struktur lebih kecil daripada kekuatan tekan kayu Lontar. Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum tidak terjadi kegagalan pada elemen struktur balok maupun kolom, melainkan perilaku kegagalan terjadi pada sistem sambungannya. Hal ini menunjukkan struktur masih kuat untuk menahan beban sendiri, hidup, dan gempa. Tingkat kestabilan yang sangat baik pada struktur karena tidak mengalami kegagalan struktur (collapse) setelah dilakukan analisis numerik dengan gempa riwayat waktu. Sistem pondasi umpak memberikan dampak positif terhadap sistem struktur karena gaya lateral akibat gempa tidak seluruhnya diterima dan ditahan oleh struktur bangunan.

Kata Kunci : Rumah tradisional Ammu Hawu, kayu lontar, uji eksperimental, gempa Flores, kinerja batas layan dan ultimit

Abstract

Ammu Hawu is one of the traditional houses made of Lontar wood structure (Borassus flabelifer), having structural stability upon lateral earthquake load. It is proven when earthquake happened in Flores (2012) the structure condition of the house is undamaged. This research studies the whole structure performance (3 dimensions) numerically based on test result of mechanical properties of element structure, friction on foundation, critical connection on structure, and record of earthquake in Flores. Analysis result shows that deformation exceeds the performance service limit but does not exceed ultimit performance limit as required in earthquake regulation of Indonesia, assessment of structure performance is good because forces earned by element structure is lesser than the Lontar wood's compressive strength. This indicates that generally failure does not happen in element structure of beam or column, but in connection system. This series shows that structure is strong enough to hold up its own burden, existence, and earthquake. Stability level in structure is very good because collapse does not occur after numeric analysis based on time track record of earthquake. Pedestals foundation system gives positive contribution to structure system because lateral force as a result of earthquake is not impinged and held by building structure.

Keyword : Ammu Hawu traditional house, lontar wood, experimental test, Flores earthquake, service limit performance and ultimit

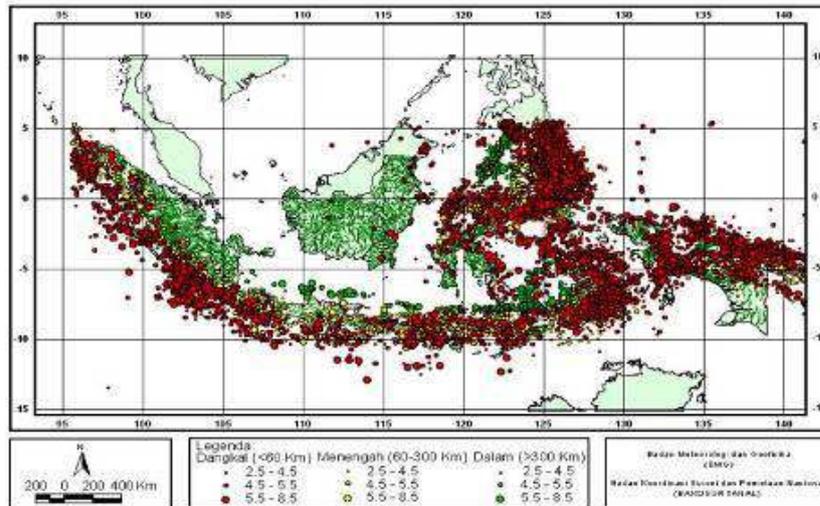
PENDAHULUAN

Secara geografis kepulauan Indonesia terletak pada zona tektonik yang sangat aktif, hal ini dikarenakan tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia serta membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Interaksi antar lempeng yang

terjadi memancarkan energi ke permukaan yang menyebabkan terjadinya gempa bumi. Periode tahun 1900-2009 tercatat lebih dari 50.000 kejadian gempa dengan magnitudo $M \geq 5.0$ dan diikuti oleh gempa lain sebanyak lebih dari 14.000 gempa utama (*main shocks*). Pada Gambar 1 menunjukkan pulau-pulau di Indonesia yang sering

terjadi gempa pada skala 2,5 – 8,5 skala Richter, dimana pulau-pulau tersebut sebagian besar adalah Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara Barat,

Nusa Tenggara Timur, Irian Jaya, Sulawesi, dan sebagian kecil di Kalimantan (Kemen. PU 2010).



Sumber : Peta Hazard Gempa Indonesia 2012, Kementerian Pekerjaan Umum

Gambar 1 Data Episenter Gempa Utama di Indonesia dan Sekitarnya untuk Magnitudo $M \geq 5,0$ yang Dikumpulkan dari Berbagai Sumber dalam Rentang Waktu Tahun 1900-2009

Dalam sepuluh tahun terakhir ini tercatat beberapa gempa besar diantaranya : gempa Aceh disertai tsunami tahun 2004 ($M_w = 9,2$), gempa Nias tahun 2005 ($M_w = 8,7$), gempa Yogyakarta tahun 2006 ($M_w = 6,3$), gempa Padang tahun 2009 ($M_w = 7,6$), dan terakhir Aceh kembali dilanda gempa tahun 2013 ($M_w = 6,2$). Gempa yang terjadi tersebut telah menyebabkan korban jiwa dan keruntuhan bangunan modern secara struktural, namun berbeda dengan bangunan tradisional yang tetap utuh tanpa mengalami keruntuhan struktural.

Rumah tradisional *Ammu Hawu* mayoritas menggunakan material kayu. Jenis material bangunan yang terbatas pada zaman dulu menyebabkan kayu menjadi material utama untuk mendirikan sebuah rumah. Kayu memiliki kelebihan berupa massa jenis yang relatif kecil. Berat total sebuah struktur yang terbuat dari kayu akan relatif lebih ringan. Hal ini menyebabkan gaya geser dasar bangunan akibat gempa juga menjadi jauh lebih kecil. Kayu merupakan material yang tumbuh alami. Secara struktural, kayu memiliki keunggulan dan kelemahan. Kayu mempunyai tiga arah sumbu utama (material *ortotropik*), pada arah sumbu terkuat kekakuan dan kekuatannya sangat besar, lebih besar daripada material lain apabila ditinjau berdasarkan rasio kekuatan terhadap berat jenis material. Sedangkan kelemahannya adalah pada dua arah sumbu lainnya, kayu relatif lemah dan lunak, hal ini dapat mengakibatkan retak dan kegagalan (*failure*) struktur. Karena kayu mempunyai properti mekanis berbeda pada ketiga arah sumbu utama tersebut, maka diperlukan

banyak parameter-parameter pendekatan untuk suatu analisis nonlinier sistem struktur kayu.

Sistem tiang-tiang rumah tradisional di Indonesia pada umumnya bertumpu di atas batu. Hal ini memberikan dampak sistem struktur atas berlaku sebagai *base isolation*, karena tiang-tiang tersebut tidak langsung bersentuhan dengan tanah. Akibatnya rumah tradisional ini dapat bergeser dari tempat asalnya ketika menerima beban lateral (dalam hal ini adalah beban gempa). Sistem *base isolation* pada rumah adat tradisional ini memberikan efek redaman terhadap getaran yang terjadi akibat gempa karena getaran tidak langsung mengenai bangunan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja rumah tradisional *Ammu Hawu* dengan analisis numerik terhadap percepatan gempa riwayat waktu. Manfaat penelitian adalah adanya alasan ilmiah yang menjelaskan sistem struktur rumah tradisional *Ammu Hawu*.

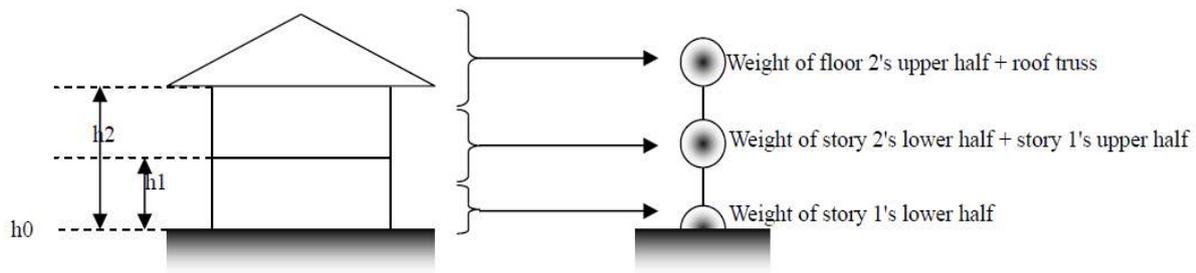
Dalam meneliti dan mengkaji keandalan sistem struktur bangunan tradisional *Ammu Hawu* terhadap pengaruh gaya lateral gempa sangat penting untuk memasukkan gaya gempa yang sebenarnya sesuai dengan wilayah gempalnya. Hal terpenting lainnya adalah menentukan besar koefisien gesek antara tiang dengan pondasi batu, mengingat rumah tradisional yang dikaji berdiri di atas umpak/pondasi batu. Lumantarna, B. dan Pudjisuryadi, P. (2012) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa kolom yang bertumpu pada batu berlaku sebagai *friction damper* atau lebih dikenal sebagai sistem *Base Isolation*. Gesekan

pada tipe friksi ini secara signifikan mampu mengurangi tegangan pada elemen struktur. Analisis struktur yang tepat untuk mengetahui keandalan sistem struktur secara numerik adalah dengan bantuan *software Wallstat* yang telah teruji dan tervalidasi untuk membantu menganalisis kinerja bangunan kayu.

Takafumi Nakagawa dan *Masamitsu Ohta* mengembangkan analisis program yang dapat menyimulasikan proses keruntuhan struktur rangka kayu yang dikenai beban dinamis dengan metode *extended distinct element method (EDEM)* pada model frame dua lantai. Hasilnya disimpulkan bahwa hasil simulasi dengan eksperimental berkorelasi baik sehingga metode *EDEM* terbukti valid digunakan untuk pemodelan (Nakagawa 2003a). *Takafumi Nakagawa* dan *Masamitsu Ohta* juga mengembangkan simulasi dengan metode *EDEM* dengan penyederhanaan dan metode perhitungan kuantifikasi. Hasilnya menunjukkan pemodelan tersebut terbukti valid untuk analisis kuantitatif struktur frame-kayu (Nakagawa 2003b). *Takafumi Nakagawa, Masamitsu Ohta,*

Takahiro Tsuchimoto, dan *Naohito Kawai* telah mengembangkan metode analisis baru yang memungkinkan simulasi numerik pada proses keruntuhan rumah kayu dengan ukuran yang sebenarnya dan mengevaluasinya dengan simulasi numerik pada meja getar (*shaking table*). Hasilnya menunjukkan simulasi proses keruntuhan adalah mungkin dengan analisis *EDEM* (Nakagawa, et al. 2010).

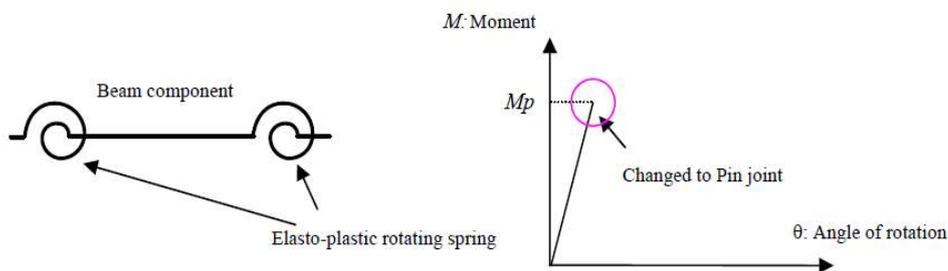
Simulasi keandalan struktur bangunan tradisional *Ammu Hawu* (Sabu) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Wallstat*. Fitur analisis keruntuhan (*collapse analysis*) yang terdapat pada perangkat lunak ini dapat digunakan untuk melakukan simulasi keruntuhan bangunan kayu akibat beban gempa riwayat waktu. Analisis ini bermanfaat untuk mempelajari status kerusakan dan kemungkinan runtuhnya bangunan secara keseluruhan selama masa riwayat waktu gerakan seismik (Building Research Institute 2012). Dasar teori yang digunakan adalah *Distinct Element Method* (Nakagawa 2011) (Gambar 2).



Gambar 2 Pemodelan Berat Tiap Lantai Pada Model Rumah Kayu

Struktur (*frame*) dimodelkan sebagai komponen dengan kombinasi pegas rotasi plastis (sendi

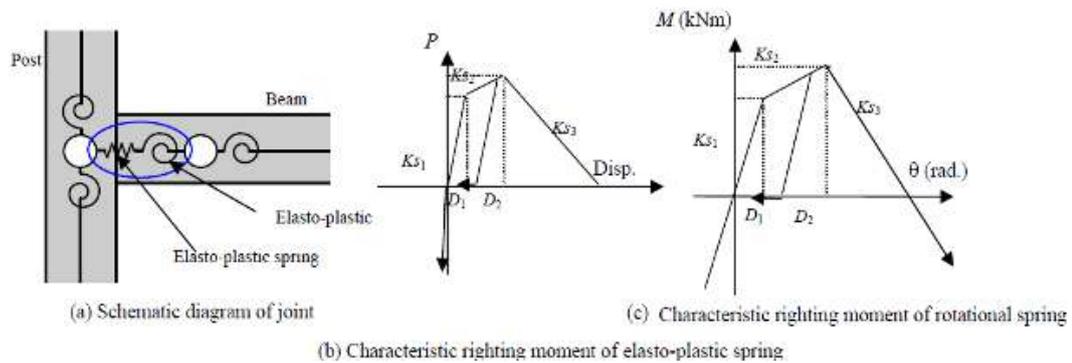
plastis) dan elastik. Skematik model kurva $M-\theta$ secara umum ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Skematik Model Kurva Untuk Pegas

Join dimodelkan dengan kombinasi pegas rotasi dan pegas elasto-plastik (Gambar 4). Fungsi pegas rotasi dapat di-set sesuai masing-masing arah

sumbu kuat dan sumbu lemah (Takatani & Nishikawa 2013).



Gambar 4 Pemodelan Join

Dalam peraturan gempa Indonesia SNI 03-1726-2002 (SNI, 2002), terdapat tolak ukur batasan kinerja, yaitu kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit. Kinerja batas layan struktur gedung ditentukan oleh simpangan antar-tingkat akibat pengaruh Gempa Rencana untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni. Simpangan antar tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung tersebut akibat pengaruh Gempa Nominal yang telah dibagi Faktor Skala. Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung tidak boleh melampaui 0,03/R kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, bergantung yang mana yang nilainya terkecil.

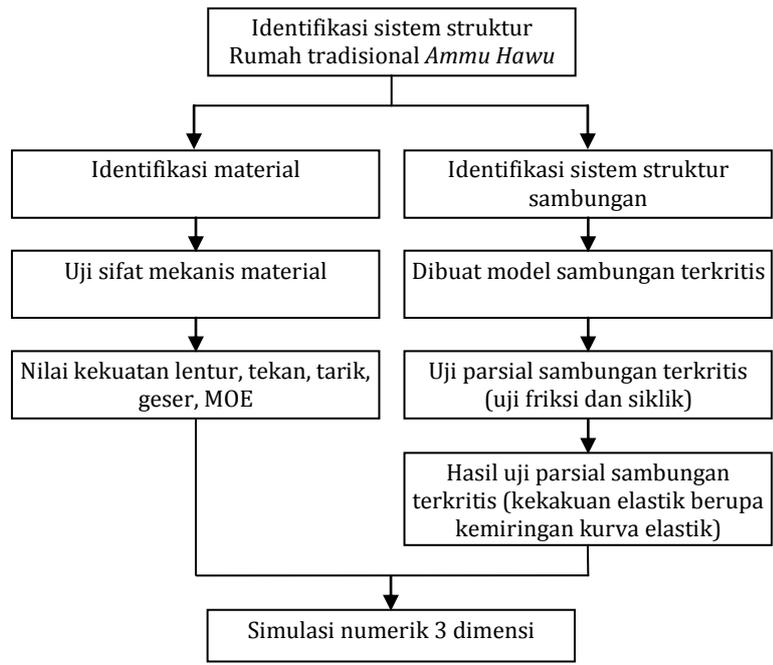
Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar tingkat maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana dalam kondisi struktur gedung di ambang keruntuhan, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan berbahaya antar gedung. Simpangan dan simpangan antar tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung akibat pembebanan gempa nominal, dikalikan dengan suatu faktor pengali $\xi = 0,7R$ (gedung beraturan). Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung tidak boleh melampaui 0,02 kali tinggi tingkat yang bersangkutan (BSN 2002).

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah observasi, pengujian laboratorium, dan uji numerik. Tahapannya adalah sebagai berikut :

- Langkah awal yang dilakukan adalah mengidentifikasi rumah tradisional sebagai objek studi, yaitu identifikasi terhadap material dan sistem sambungan struktur.
- Identifikasi material bertujuan untuk mengetahui jenis material yang digunakan untuk dapat diuji secara mekanis.
- Identifikasi sistem struktur sambungan dengan menemukan sambungan-sambungan terkritis pada sistem struktur untuk dapat dimodelkan pada skala lab yang akan diuji secara parsial.
- Secara paralel dilakukan uji material dan uji parsial sambungan.
- Untuk uji mekanis material dengan menggunakan standar ASTM, diperoleh nilai kekuatan mekanis yaitu : kekuatan lentur, tekan, tarik, geser, dan MOE.
- Untuk uji parsial sambungan dilakukan uji monotonik dan siklik sehingga diperoleh kekakuan elastik sambungan, sedangkan untuk perletakkannya digunakan data pengujian uji friksi sambungan antara kayu Lontar dengan batu.
- Hasil uji tersebut merupakan input untuk melakukan analisis numerik selain beban sendiri, hidup, dan beban gempa riwayat waktu.
- Menganalisis kinerja struktur dengan melihat simpangan terjauh akibat beban gempa dibandingkan dengan kinerja batas ultimit dan perilaku sistem struktur keseluruhan setelah dilakukan analisis numerik.

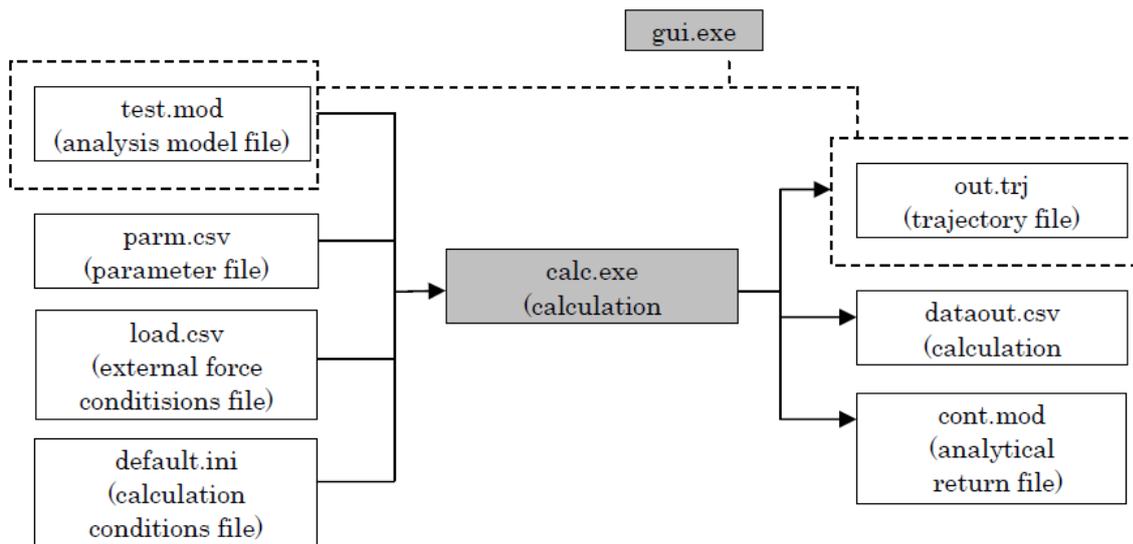
Penjelasan selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Metode Penelitian

Tahapan simulasi sebagai berikut (Gambar 6) :

1. Mula-mula dibuat model struktur bangunan kayu, dengan mempertimbangkan properti non-linier material dan asumsi perilaku sambungan antar elemen struktur.
2. Kemudian model struktur bangunan dikenai beban gempa berdasarkan data riwayat waktu gempa.
3. Kemudian dilakukan *collapse analysis* untuk mempelajari perilaku struktur secara keseluruhan maupun masing-masing elemen struktur, sesaat setelah beban gempa dikenakan, sampai dengan struktur mengalami keruntuhan.
4. Model struktur adalah sistem *frame-wall*.



Gambar 6 Alur Analisis Dengan Perangkat Lunak WALLSTAT

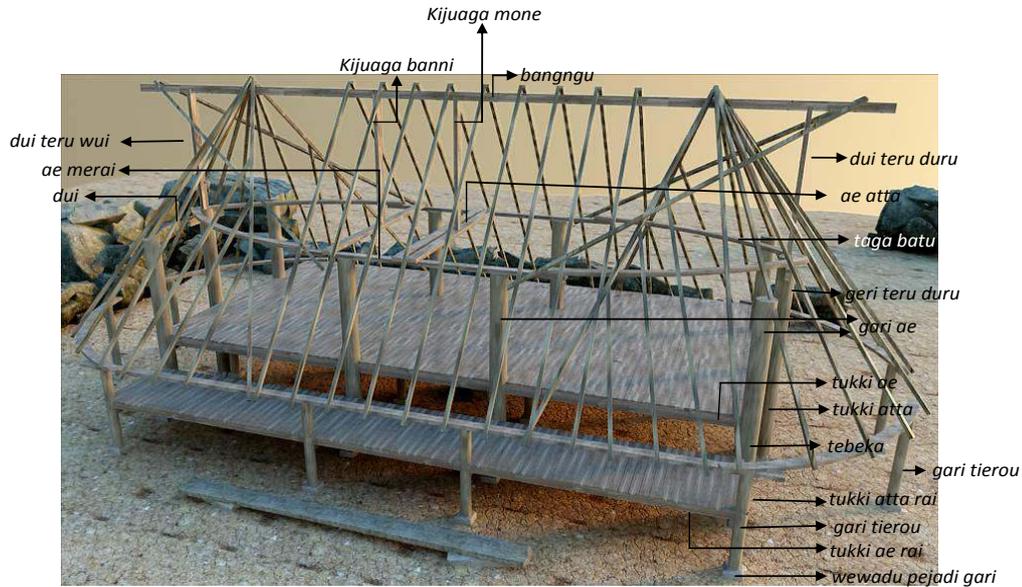
HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur rumah Tradisional *Ammu Hawu* ditunjukkan pada Gambar 7. Rumah tradisional *Ammu Hawu* memiliki 26 buah kolom utama dan 9 buah kolom pendukung yang semuanya terbuat dari kayu Lontar (*Borassus flabellifer*) yang

memiliki nilai sifat mekanis, yaitu : kekuatan lentur sebesar 54 MPa, Modulus Elastisitas (MOE) sebesar 10.206 MPa, kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat masing-masing sebesar 49,7 MPa dan 12 MPa, dan kuat tarik sejajar dan tegak lurus serat masing-masing sebesar 66 MPa dan 20 MPa. Dalam

SNI tata cara perencanaan struktur kayu untuk bangunan gedung kayu Lontar ini termasuk dalam kelas kuat kayu dengan mode mutu E10 (BSN 2012). Ukuran kolom utama rata-rata berdiameter 20 cm sedangkan untuk kolom pendukung

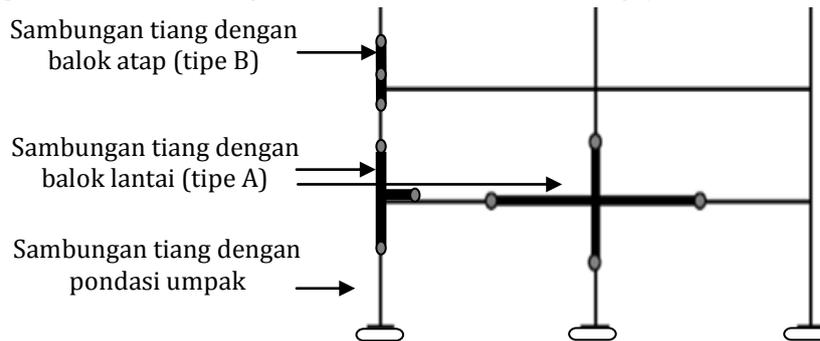
berdiameter 10 cm. Kolom-kolom tersebut tidak ditanam ke dalam tanah melainkan hanya diletakkan di atas batu/umpak tanpa sambungan mekanis.



Gambar 7 Bagian-bagian Struktur Rangka Rumah Tradisional Ammu Hawu

Identifikasi pada sistem sambungan terdapat dua tipe sambungan terkritis yaitu pada sambungan tiang (*tebeka*) dengan balok lantai (*tuki ae rai*), dan tiang (*tebeka*) dengan balok atap (*dui*) seperti pada Gambar 8. Untuk itu dilakukan uji sambungan parsial terkritis pada sistem sambungan tersebut.

Pengujian sambungan parsial ini dilakukan dengan mengatur deformasi (*deformasi control*) yang kemudian dilakukan uji siklik dengan tiga kali ulangan pada satu level deformasi siklik. Sambungan yang diuji dibuat sesuai dengan kondisi eksistingnya.



Gambar 8 Tipologi Sambungan Pada Struktur Rumah Tradisional Ammu Hawu

Hasil uji sambungan pada rumah tradisional *Ammu Hawu* pada sambungan tipe A, yaitu sambungan antara tiang dengan balok lantai memiliki *equivalent viscous damping ratio* sebesar 10-14 %, sedangkan sambungan tipe B, yaitu sambungan antara tiang dengan balok atap memiliki *equivalent viscous damping ratio* sebesar 8,92 %. Artinya perbandingan antara energi yang telah diserap dan diredam dalam satu siklus siklik dari struktur sebenarnya sebesar 0,08 - 0,14. Rasio ini lebih besar jika dibandingkan dengan sambungan baja sebesar 0,02 - 0,03 dan beton sebesar 0,03 - 0,05. Daktilitas sambungan tipe A sebesar 3 jika

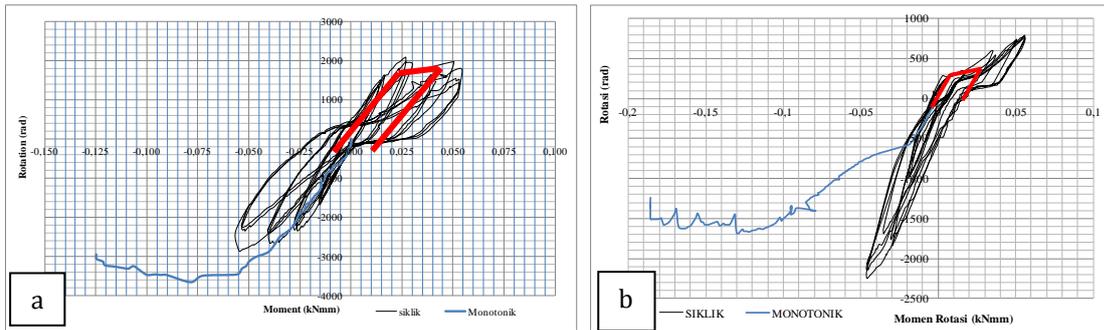
disetarakan dengan faktor perilaku struktur (*q*) yang dijelaskan oleh *Tomu Toratti* (2012) tergolong dalam struktur yang memiliki kapasitas baik dalam mendisipasi energi. Sedangkan tipe B pada kapasitas menengah. Secara umum kinerja sambungan memiliki kinerja yang baik.

Asumsi Pemodelan Sambungan

Asumsi pemodelan pada setiap sambungan menggunakan pemodelan dengan kombinasi pegas rotasi dan pegas elasto-plastik (Gambar 4). Fungsi pegas rotasi dapat di-*set up* sesuai masing-masing arah sumbu kuat dan sumbu lemah. Kurva gabungan siklik dan monotonik ditunjukkan pada

Gambar 9 pada tipe sambungan A dan B, kemiringan grafik siklik pada daerah tekan serupa dengan kemiringan grafik monotonik, hanya saja

pada pembebanan siklik yang lebih besar terjadi pergeseran kurva monotonik yang kemungkinan adanya perubahan pembebanan yang signifikan.



Gambar 9 (a) Pemodelan Sambungan Dengan Menggunakan Kemiringan Kurva Pada Sambungan Tipe A; (b) Pemodelan Sambungan Dengan Menggunakan Kemiringan Kurva Pada Sambungan Tipe B

Sedangkan pada perletakkan dimodelkan sebagai friksi antara sambungan tiang kayu Lontar dengan batu. Besar friksi sambungan tersebut sebesar 0,35 dengan menggunakan kurva elastik hasil pengujian geser friksi (Suwantara & Rusli 2013). Data

parameter-parameter yang dapat diambil dari pengujian sambungan parsial tipe-A dan tipe-B pada Gambar 9 selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter untuk Diagram Join

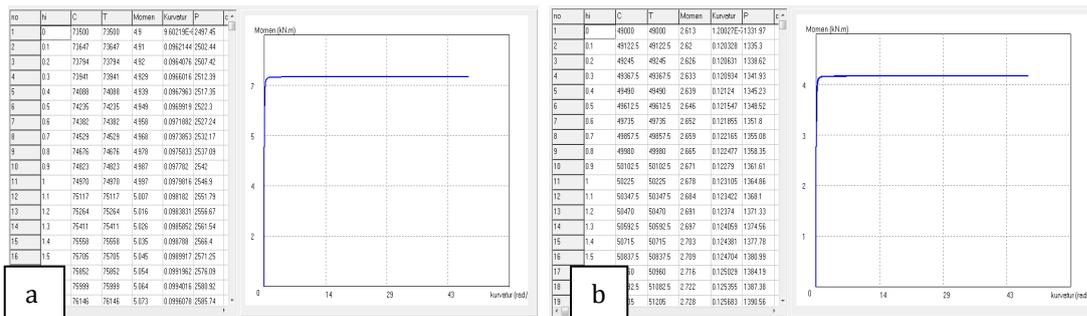
Keterangan	Sambungan Tipe-A	Sambungan Tipe-B
M_p (kN.mm)	1873,40	284,70
K_{S1} (kN.mm)	93670,00	99198,61
K_{S2} (kN.mm)	41481,67	9040,47
D_1 (rad)	0,02000	0,00167
D_2 (rad)	0,034	0,00287

Pemodelan dan Idealisasi Elemen Kolom dan Balok

Data yang diperlukan memodelkan elemen *frame* (keterangan selengkapnya telah disampaikan melalui Gambar 3) maka dibuat kurva hubungan antara momen-kurvatur, dengan tujuan untuk mendapatkan informasi momen maksimum pada masing-masing elemen balok dan kolom. Seluruh elemen struktur rumah *Ammu Hawu* menggunakan material kayu Lontar, maka untuk membuat kurva hubungan momen kurvatur untuk tiap-tiap elemen struktur tersebut digunakan data modulus elastisitas sebesar 10.206 MPa dan kekuatan tekan 49,69 MPa. Model tegangan-regangan kayu diasumsikan berbentuk elasto-plastik.

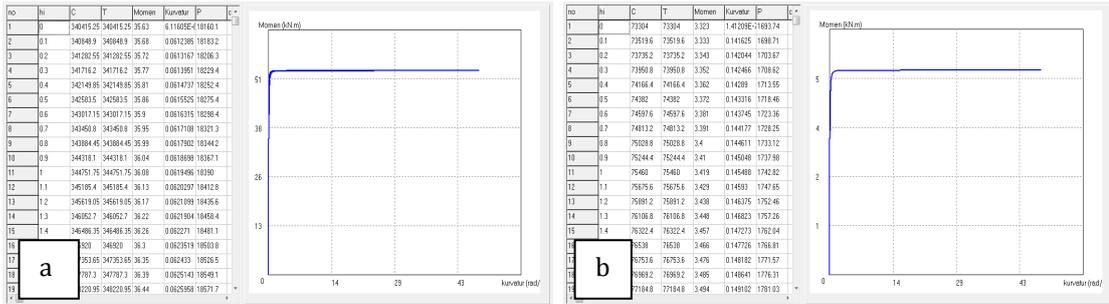
Momen maksimum balok 60 x 120 mm digunakan sebesar 7 kN.m, Momen maksimum balok 50x100 mm digunakan sebesar 4 kN.m.

Gambar 10 memperlihatkan kurva hubungan momen dengan kurvatur untuk balok kayu berukuran penampang 60 x 120 mm dan balok kayu berukuran penampang 50 x 100 mm, Gambar 11 memperlihatkan kurva hubungan momen dengan kurvatur untuk kolom lingkaran diameter 200 mm (luas penampang ekuivalen), dan memperlihatkan kurva hubungan momen dengan kurvatur untuk kolom lingkaran diameter 100 mm (luas penampang ekuivalen). Untuk menunjang kelancaran perhitungan tersebut, maka dalam hal ini dibuatlah perangkat lunak bantu sederhana dengan bahasa pemrograman *DELPHI*.



Momen maksimum balok 60 x 120 mm digunakan sebesar 7 kN.m, Momen maksimum balok 50 x 100 mm digunakan sebesar 4 kN.m.

Gambar 10 (a) Kurva Hubungan Momen-Kurvatur Balok 60 x 120 mm; (b) Kurva Hubungan Momen-Kurvatur Balok 50 x 100 mm



Momen maksimum kolom diameter 200 mm digunakan sebesar 51 kN.m; Momen maksimum kolom diameter 100 mm digunakan sebesar 5 kN.m.

Gambar 11 (a) Kurva Hubungan Momen-Kurvatur Kolom Diameter 200 mm. (b) Kurva Hubungan Momen-Kurvatur Kolom Diameter 100 mm

Rekaman Gempa

Analisis menggunakan rekaman gempa dengan skala asli maupun dengan yang diskalakan intensitasnya terhadap amplitudo maksimum percepatan tanah (A_0) pada kurva respons spektrum SNI 1726-2002 saat $T = 0$. Percepatan gempa yang digunakan adalah rekaman gempa Flores dengan tingkat gempa yaitu beban Gempa Rencana. Perhitungan skala intensitas sebagai berikut, untuk gempa Flores percepatan puncak

tanah asli = 0,1300 g, sedangkan percepatan puncak tanah keras untuk wilayah gempa 4 Flores = 0,24g, maka skala gempa = $\frac{0,24}{0,1300} \cdot 1 = 1,8462$ g.

Percepatan puncak tanah asli beserta skala intensitasnya selengkapnya ditampilkan dalam

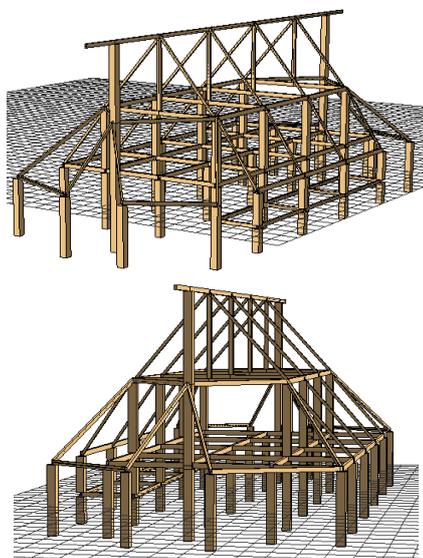
Tabel 2. Dalam simulasi dengan perangkat lunak *Wallstat*, beban gempa diaplikasikan pada level permukaan tanah (± 0 meter).

Tabel 2 Percepatan Puncak Tanah Asli dan Wilayah Gempa 4 Jenis Tanah Keras

Percepatan Gempa	Percepatan Puncak Tanah Asli (g)	Wilayah gempa 4	
		Percepatan Puncak Tanah (g)	Skala gempa (g)
Flores	0,1300	0,24	1,8462

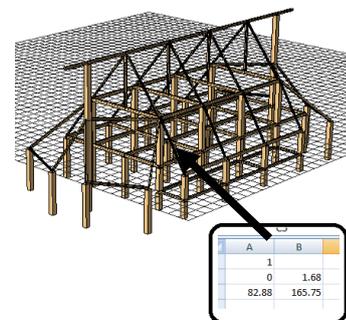
Pemodelan Struktur

Tahapan pemodelan struktur secara 3D menggunakan perangkat lunak *Wallstat* selengkapnya ditampilkan pada Gambar 12. Dimensi dan ukuran penampang, jarak antar bentang, tinggi elevasi menggunakan acuan eksisting rumah tradisional *Ammu Hawu*.



Gambar 12 (a) Model 3D Rumah *Ammu Hawu* (Tampak 3D Bagian Depan), (b) Model 3D Rumah *Ammu Hawu* (Tampak 3D Bagian Belakang)

Gambar 13 memperlihatkan model struktur rumah *Ammu Hawu* yang telah dilengkapi dengan papan-papan kayu yang diasumsikan mempunyai luas penampang sama dan dijejerkan secara berimpit satu sama lain sehingga membentuk lantai yang mempunyai pusat berat dan pusat massa, yaitu pada ketinggian 1,68 meter. Data input berat sendiri dan beban-beban yang bekerja diaplikasikan di pusat massa bangunan pada ketinggian tersebut (unit satuan kN).



Keterangan : satuan tinggi adalah meter, satuan berat adalah kN.

Gambar 13 Model 3D Rumah *Ammu Hawu* Lengkap Dengan Papan Kayu Dimodelkan Sebagai Beban (Fitur Melalui File *Weight.csv*)

Gambar 14 memperlihatkan data input untuk memodelkan rekaman gempa sebagai beban

lateral. Kolom A adalah tipe beban, kolom B adalah informasi nama file rekaman gempa/beban lateral yang akan diaplikasikan pada struktur bangunan, kolom D adalah elevasi yang menunjukkan dimana beban lateral diaplikasikan, dan kolom E adalah kecepatan pembebanan. Baris 1, 2, dan 3 adalah menunjukkan masing-masing orientasi sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Dalam studi kasus penelitian ini, gempa diaplikasikan pada satu arah sumbu yaitu sumbu-x.

	A	B	C	D	E
1		5 cyclic.csv		0	0.1
2		0			
3		0			

Gambar 14 Contoh Data Input untuk Mengaplikasikan Beban Lateral

Gambar 15 memperlihatkan data input untuk rekaman gempa. Kolom A menunjukkan besarnya akselerasi (g). Sedangkan Gambar 16 memperlihatkan data input untuk memodelkan material penyusun elemen struktur balok dan kolom. Data yang diperlukan (unit satuan gaya dalam kN dan panjang dalam meter) yaitu sebagai berikut :

1. Kolom : Modulus elastisitas kayu, momen inersia penampang kolom, momen maksimum kolom (didapat dari kurva hubungan momen-kurvatur, pada kondisi beban batas proporsional), dan luas penampang kolom.
2. Balok : Modulus elastisitas kayu, momen inersia penampang balok, momen maksimum balok (didapat dari kurva hubungan momen-kurvatur, pada kondisi beban batas proporsional), dan luas penampang balok.
3. Kekakuan sambungan : tipe *spring*, kemiringan kurva pada kondisi elastik, kemiringan kurva pada kondisi pasca-elastik, deformasi pada kondisi elastik, dan deformasi pada kondisi pasca-elastik.

	A	B	C
1	-0.0074		
2	-0.0028		
3	-0.0006		
4	0.001		
5	0.0018		
6	0.0031		
7	0.0006		
8	-0.0017		
9	0.0022		

Gambar 15 Contoh Data Input Untuk Rekaman Gempa Masukan

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
101	1	10206000	7.85E-05	7.85E-05	51	51	0.0314			
102	1	10206000	4.91E-06	4.91E-06	5	5	0.0079			
103	1	10206000	8.64E-06	8.64E-06	7	7	0.0072			
104	1	10206000	4.17E-06	4.17E-06	4	4	0.005			
201	2	367	13	-24	0.003	0.011				
202	2	4000	115	-271	0.002	0.015				
203	2	2200	64	-149	0.002	0.015				
204	2	10250	100	-1194	0.002	0.012				
210	2	9900	904	-1600	0.0028	0.05				
211	2	9900	904	-1600	0.0028	0.05				
301	3	61.5	30	-0.1	0.00833	0.0167				

Gambar 16 Pemodelan Material

Pemodelan Beban Gravitasi

Berdasarkan denah lantai ruang utama/rumah tinggal eksisting maka bangunan diasumsikan terdiri dari satu lantai dengan kondisi sebagai rumah panggung. Artinya pusat massa lantai terdapat pada elevasi dimana terdapat papan-papan kayu penyusun lantai ruang utama, yaitu pada elevasi +1,68 meter. Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa beban-beban yang bekerja untuk kategori beban gravitasi, yaitu meliputi : (a). Berat sendiri struktur (beban mati atau DL) ; (b). Beban mati tambahan atau SDL (kabel elektrik yang terdiri dari pipa saluran air yang terletak dibagian luar/bawah papan kayu dan beban lain-lain diasumsikan sebesar 50 kg/m² ; dan (c). beban hidup (LL) diasumsikan sebesar 250 kg/m². Dari denah eksisting diketahui bahwa luas ruang utama adalah sebesar 4,8 m x 8,8 m = 42,24 m². Faktor beban untuk beban hidup dan beban mati adalah sebesar 1,0. Maka beban gravitasi total adalah sebagai berikut, DL = 4.224,02 kg (keterangan : berat sendiri struktur dihitung menggunakan perangkat lunak bantu SAP 2000 dengan

memodelkan struktur secara keseluruhan, selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan berat sendiri struktur).

$$W_u = 1,0 DL + 1,0 SDL + 1,0 LL$$

$$W_u = 4.224,02 \text{ kg} + 50 \text{ kg/m}^2 \times 42,24 \text{ m}^2 + 250 \text{ kg/m}^2 \times 42,24 \text{ m}^2 = 16.896,02 \text{ kg} = 165,75 \text{ kN}$$

Selanjutnya beban-beban gravitasi (W_u) dimasukkan pada struktur, seperti telah ditampilkan pada Gambar 13.

Pembahasan Hasil Analisis

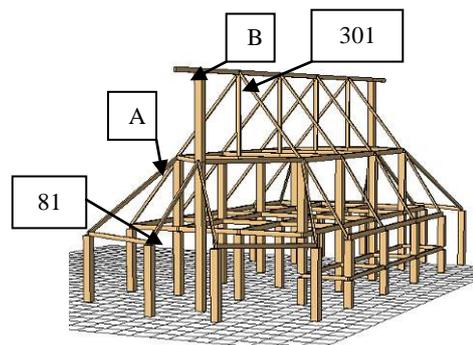
Penelitian dibagi menjadi dua tipe simulasi. Simulasi pertama adalah menggunakan rekaman gempa sesuai skala asli (percepatan puncak tanah asli). Simulasi kedua menggunakan rekaman gempa dengan modifikasi skala sesuai skala intensitas terhadap wilayah gempa di Flores dengan jenis tanah keras (Tabel 2). Perhitungan skala intensitas berdasarkan perhitungan pada Tabel 3.

Tabel 3 Percepatan Puncak Tanah Asli dan Skala Intensitas (dalam g)

Percepatan Gempa	Percepatan Puncak Tanah Asli (g)	Modifikasi skala (g)
Flores	0,1300	1,8462

Simulasi dengan Beban Gempa Flores 1992

Analisis dan simulasi model rumah *Ammu Hawu* dengan tipe pembebanan dengan akselerogram gempa Flores, hasil simulasi yang dibahas dalam penelitian ini, yaitu ditinjau Titik A (elevasi +3,48 m) yang merupakan ujung atas dari Kolom 81, serta titik B dan Balok 301, ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 17, sedangkan hasil analisis disampaikan pada Gambar 18 dan Gambar 19.

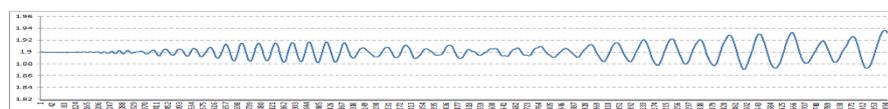


Gambar 17 Balok 301, Titik B, Kolom 81, Titik A Yang Ditinjau



(a). Riwayat Deformasi Titik A.

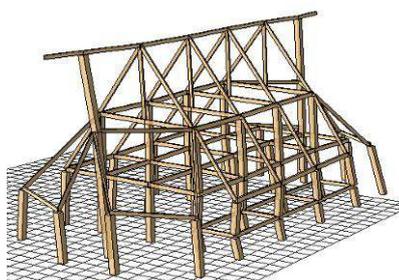
Keterangan : Angka 3.8 adalah Koordinat Awal x = 3,8 Meter



(b). Riwayat Deformasi Titik B.

Keterangan : Angka 1.9 adalah Koordinat Awal x = 1,9 Meter

Gambar 18 Hasil Simulasi : Riwayat Deformasi Akibat Gempa Flores



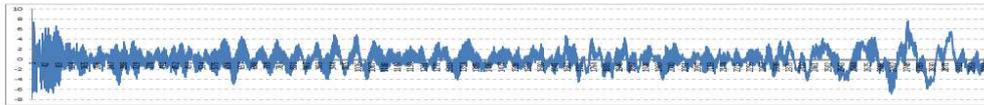
Gambar 19 Hasil Simulasi : Deformasi Struktur Rumah *Ammu Hawu* Akibat Gempa Flores

Pada saat rumah *Ammu Hawu* dikenai beban lateral berupa rekaman gempa Flores, deformasi maksimum (deformasi arah sumbu-x) di titik A pada level ring-balok-atap (elevasi 3,48 meter, tinggi bangunan H = 3,48 meter = 3.480 mm) adalah sebesar 28,21 mm. Berdasarkan tinjauan peraturan gempa Indonesia (SNI 03-1726-2012) batasan kinerja batas layan adalah sebesar $0,03 \times H / R = 0,03 \times 3480 / 5,5 = 18,98$ mm, batasan kinerja batas ultimit sebesar $0,02 \times H = 0,02 \times 3480 = 69,60$ mm. Drift yang terjadi adalah $28,21 \text{ mm} / 3.480 \text{ mm} = 0,00802$. Artinya, deformasi maksimum yang terjadi pada struktur rumah

Ammu Hawu akibat gempa Flores telah melebihi batasan kinerja batas layan, namun belum melebihi batasan kinerja batas ultimit yang disyaratkan oleh peraturan gempa Indonesia. Gaya dalam maksimum kolom 81 adalah sebesar -16,61 kN. Dengan menggunakan prinsip *engineering stress* dimana luas penampang dianggap selalu sama sebelum dan sesudah pembebanan, maka $A_{81} = 31.400 \text{ mm}^2$, maka tegangan normal (aksial) yang terjadi pada kolom 81 (diameter kolom 200 mm) adalah sebesar 0,529 MPa. Secara umum (Gambar 18) memperlihatkan bahwa elemen kolom utama struktur rumah *Ammu Hawu* masih berperilaku elastik selama riwayat waktu pembebanan gempa. Gaya dalam maksimum balok 301 (ukuran penampang balok 50x100 mm) adalah 0,288 kN maka tegangan normal (aksial) yang terjadi adalah sebesar 0,0577 MPa. Secara umum, hasil simulasi yaitu gaya geser dasar struktur rumah *Ammu Hawu* akibat gempa Flores berdasarkan riwayat waktu pembebanan ditampilkan pada Gambar 20 dan Gambar 21. Gaya geser dasar (V_x) maksimum adalah sebesar 130,606 kN. Sedangkan Gaya geser dasar (V_y) maksimum adalah sebesar 7,20 kN.



Gambar 20 Gaya Geser Dasar (V_x) Unit Satuan kN



Gambar 21 Gaya Geser Dasar (V_y) Unit Satuan kN

Simulasi dengan Beban Gempa Modifikasi

Hasil analisis struktur dengan tinjauan rekaman gempa yang telah diskalakan intensitasnya terhadap wilayah gempa 4 di Indonesia dengan

jenis tanah keras. Hasil analisis selengkapnya ditampilkan pada Tabel 4 (deformasi arah sumbu-x), Tabel 5 (gaya-gaya dalam) dan Tabel 6 (gaya geser dasar struktur).

Tabel 4 Deformasi Arah-x Di Titik A

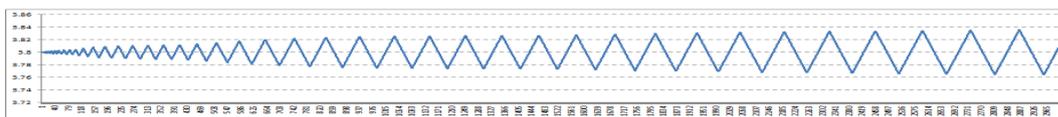
Gempa	Drift (mm/mm)	Deformasi Titik A (mm)	Kinerja Batas Layan (mm)	Kinerja Batas Ultimit (mm)
Flores	0,01035	36,033	18,98	69,60

Tabel 5 Gaya-gaya Dalam Pada Kolom Dan Balok

Gempa	Kolom		Balok	
	Gaya aksial (kN)	Tegangan Normal (MPa)	Gaya aksial (kN)	Tegangan Normal (MPa)
Flores	-15,43	0,490	0,218	0,044

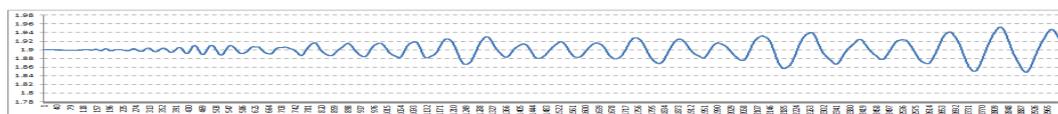
Tabel 6 Gaya Geser Dasar (V) Struktur

Gempa	Gaya Geser Dasar Arah-x (kN)	Gaya Geser Dasar Arah-y (kN)
Flores	121,59	8,18



(a). Riwayat Deformasi Titik A

Keterangan : Angka 3.8 adalah Koordinat Awal $x = 3,8$ meter



(b). Riwayat Deformasi Titik B

Keterangan : Angka 1.9 adalah Koordinat Awal $x = 1,9$ meter

Gambar 22 Hasil Simulasi : Riwayat Deformasi Akibat Gempa Flores Modifikasi

Pembahasan yang dapat disampaikan dari hasil analisis (simulasi) struktur rumah *Ammu Hawu* yaitu sebagai berikut : hasil pada Tabel 7, secara umum deformasi maksimum yang terjadi pada struktur rumah *Ammu Hawu* akibat Gempa Flores telah melebihi batasan kinerja batas layan, namun belum melebihi batasan kinerja batas ultimit yang disyaratkan oleh peraturan gempa Indonesia.

Tabel 8 dan Tabel 9 dapat diambil pembahasan umum bahwa komponen struktur baik itu balok dan kolom, tidak mengalami kegagalan. Hal ini terlihat dari nilai tegangan normal (aksial) yang sangat kecil apabila dibandingkan dengan nilai kekuatan tekan kayu Lontar ($F_c // = 49,69$ MPa). Tabel 10 dapat diketahui besarnya gaya geser dasar struktur (V) dengan rekaman gempa Flores. Gaya geser dasar ini berguna untuk mengetahui respons struktur rumah tradisional *Ammu Hawu* akibat gempa.

Tabel 7 Perbandingan Gempa Modifikasi Dan Gempa Asli : Deformasi Arah-x Titik A

Gempa	Drift (mm/mm)		Deformasi Titik A (mm)		% -beda
	Modifikasi	Percepatan Asli	Modifikasi	Percepatan Asli	
Flores	0,01035	0,00802	36,033	28,210	27,73

Tabel 8 Perbandingan Gempa Modifikasi Dan Gempa Asli : Gaya Geser Dasar

Gempa	Gaya geser dasar arah-x (kN)			Gaya geser dasar arah-y (kN)		
	Modifikasi	Percepatan Asli	%-beda	Modifikasi	Percepatan Asli	%-beda
Flores	121,59	130,606	-6,90	8,18	7,20	13,61

Tabel 9 Perbandingan Gempa Modifikasi Dan Gempa Asli : Gaya Dalam Pada Kolom 81

Gempa	Kolom 81		
	Gaya aksial (kN)	Tegangan normal (MPa)	%-beda
Flores Modifikasi	-15,43	0,490	7,10
Flores Asli	-16,61	0,529	

Tabel 10 Perbandingan Gempa Modifikasi dan Gempa Asli : Gaya Dalam Pada Balok 301

	Balok 301		% -beda
	Gaya aksial (kN)	Tegangan normal (MPa)	
	0,218	0,0440	24,31
	0,288	0,0577	

KESIMPULAN

Kesimpulan

Hasil simulasi numerik keandalan struktur rumah *Ammu Hawu*, menunjukkan bahwa deformasi arah lateral (dalam hal ini arah-x) dengan rekaman gempa Flores melebihi kinerja batas layan pada persyaratan SNI Gempa Indonesia. Sedangkan gaya-gaya dalam yang timbul pada kolom dan balok, besarnya tegangan normal (aksial) yang terjadi jauh lebih kecil daripada kekuatan tekan (sejajar serat) kayu Lontar. Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum tidak terjadi kegagalan pada elemen struktur balok maupun kolom, melainkan perilaku kegagalan terjadi pada sistem sambungannya (kegagalan yang dimaksud adalah terjadi deformasi yang berlebih pada sambungannya namun tidak mengalami kerusakan).

Deformasi yang besar/berlebih pada sistem sambungan dalam konteks ruang lingkup penelitian ini adalah struktur rumah *Ammu Hawu* tidak cukup memiliki kekakuan untuk menahan gempa. Tolok ukur kegagalan yaitu deformasi yang terjadi telah melampaui kinerja batas yang dipersyaratkan sesuai peraturan gempa Indonesia. Meskipun demikian secara umum struktur masih dalam kondisi stabil, hal ini terlihat dari hasil simulasi bahwa tidak ada bagian-bagian pada sistem sambungan yang mengalami patah/kerusakan.

Adanya sistem pondasi tiang utama bangunan (tiang kayu Lontar) berdiri di atas batu, berkontribusi positif terhadap sistem struktur karena gaya lateral akibat gempa tidak seluruhnya diterima dan ditahan oleh struktur bangunan. Sistem ini serupa dengan *base isolation*, dalam bentuk penggunaan model tumpuan berupa kolom di atas batu umpak yang terbukti efektif menghasilkan efek peningkatan keandalan struktur terhadap gempa, khususnya menjaga agar

komponen-komponen struktur utama yaitu balok dan kolom aman dan tidak rusak.

Saran

Saran yang perlu dilakukan untuk penelitian lebih lanjut mengenai struktur rumah tradisional *Ammu Hawu* (Sabu) adalah sebagai berikut :

Simulasi numerikal ini sangat mengandalkan keakuratan data hasil pengujian parsial sistem sambungan kayu. Kecepatan pembebanan dan tipe beban yang digunakan selama pengujian eksperimental sambungan berpengaruh terhadap perilaku kekakuan sambungan tersebut. Oleh karena itu diperlukan penelitian eksperimental lebih mendalam mengenai pemodelan benda uji dan sistem pengujiannya.

Untuk meningkatkan kekakuan sistem struktur, maka diperlukan penelitian lebih mendalam untuk menghasilkan inovasi sistem sambungan struktur kayu. Perkuatan sistem sambungan dapat menggunakan luasan bidang geser yang lebih memadai, atau dengan menggunakan bantuan alat sambung pasak kayu.

Acuan standar kinerja batas layan dan ultimit dengan SNI 1726-2002 merupakan standar untuk gedung, sedangkan rumah yang dikaji adalah rumah kayu, sehingga perlu adanya standar yang mengacu pada rumah kayu di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Balai PTPT Denpasar - Pusat Litbang Permukiman - Kementerian Pekerjaan Umum, yang telah mendanai kegiatan ini pada tahun anggaran 2013.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standar Nasional (BSN). 2002. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung ; SNI-03-1726-2002. Bandung.

- Badan Standar Nasional (BSN). 2012. Tata Cara Perencanaan Struktur Kayu Untuk Bangunan Gedung. SNI-03-xxxx-2000. Bandung
- Building Research Institute. 2012. "Wallstat version 1.09 User Manual", Building Research Institute (independent administrative corporation).
- Jurnal Teknik Sipil, Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil. ISSN 0853-2982. Volume 20 Nomor 2, Agustus 2013. Program Studi Teknik Sipil – Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung (ITB). Bandung.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. Peta Hazard Gempa Indonesia 2010 sebagai Acuan Dasar Perencanaan dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa. Jakarta.
- Lumantarna, B. and Pudjisuryadi, P. 2012. *Learning from Local Wisdom : Friction Damper in Traditional Building*. *Civil Engineering Dimension*, Vol.14, No. 3, December 2012 (Special Edition), 190-195. ISSN 1979-570X online. Surabaya
- Nakagawa, T. 2011. "Development of analysis method for collapsing behaviour of wooden post-and-beam house during earthquake", *Building Research Data, Building Research Institute (in Japanese)*.
- Nakagawa, T., Ohta, M. 2003a. *Collapsing process simulations of timber structure under dynamic loading I : simulations of two-story frame models*. The Japan Wood Research Society. Japan.
- Nakagawa, T., Ohta, M. 2003b. *Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading II : simplification and quantification of the calculating method*. The Japan Wood Research Society. Japan.
- Nakagawa, T., Ohta, M., Tsuchimoto, T., and Kawai, N. 2010. *Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading III : numerical simulations of real-size wooden houses*. The Japan Wood Research Society. Japan.
- Suwantara, I.K. dan Rusli. 2013. Penelitian Eksperimental Geser-Friksi Sambungan Tiang Kayu Lontar (*Borassus flabellifer*) dengan Batu pada Rumah Tradisional Ammu Hawu (NTT).
- Takatani and Nishikawa, 2013; BSI. Japan
- Toratti, T. 2001. "Seismic Design of Timber Structures". Japan.