

PEMODELAN PERILAKU STRUKTUR DINDING KAYU AKIBAT BEBAN TSUNAMI

Gede Pringgana

Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana

Email: gedepriinggana@unud.ac.id

ABSTRAK

Rumah kayu merupakan salah satu tipe bangunan yang paling rentan terhadap bencana tsunami. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku dinding rumah kayu akibat beban lateral tsunami. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) yang digunakan untuk pemodelan gelombang tsunami dengan perangkat lunak DualSPHysics dan metode elemen hingga untuk memodel perilaku struktur dinding kayu menggunakan perangkat lunak ABAQUS/Explicit. Di dalam penelitian ini, pemodelan gelombang tsunami dilakukan berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Linton *et al.* (2013). Pemodelan gelombang tsunami menghasilkan riwayat beban-waktu yang kemudian pada tahap pemodelan elemen hingga, digunakan sebagai beban lateral yang bekerja pada permukaan vertikal struktur dinding kayu. Analisis *dynamic-explicit* digunakan dalam pemodelan elemen hingga, oleh karena beban yang dikerjakan merupakan tipe beban dengan durasi waktu yang singkat. Simulasi elemen hingga dilakukan selama 20 detik dengan peningkatan waktu 0,005 detik. Struktur dinding kayu memiliki ukuran panjang 3,58 m dan tinggi 2,44 m, dengan perletakan jepit. Dinding kayu dibagi dengan ukuran mesh 0,02 m pada bagian yang terbebani dan semakin ke bagian atas ukuran mesh berangsur-angsur membesar. Elemen delapan-nodal *linear brick C3D8R* digunakan untuk memodel elemen dinding kayu. Hasil analisis menunjukkan bahwa, secara umum, lendutan numerik bersesuaian dengan lendutan eksperimen dan lendutan numerik maksimum 10% lebih besar dari data eksperimen. Tegangan tarik maksimum numerik terjadi pada tengah batang horizontal dan hal ini sama dengan lokasi keruntuhan tarik pada uji eksperimen.

Kata kunci : *tsunami, dinding kayu, smoothed particle hydrodynamics, metode elemen hingga*

MODELLING OF THE BEHAVIOUR OF TIMBER WALL STRUCTURE SUBJECT TO TSUNAMI LOADING

ABSTRACT

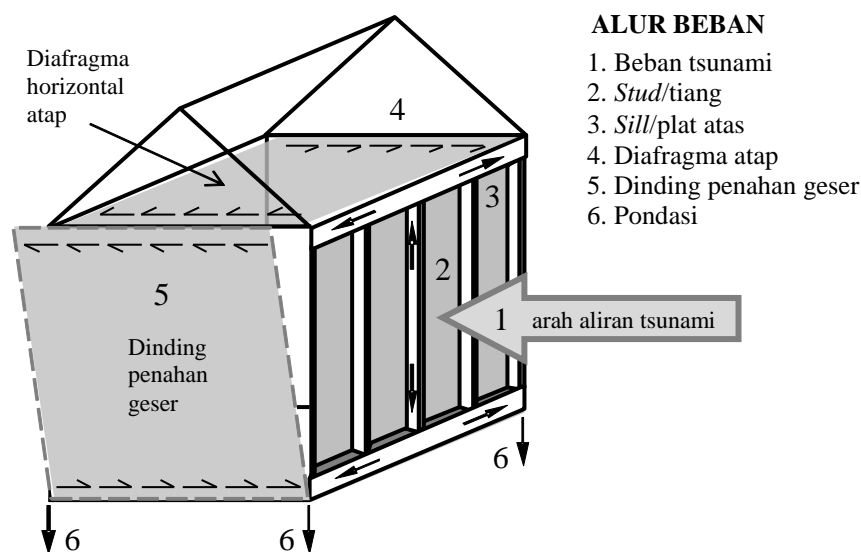
Timber house is one of the most vulnerable type of buildings during tsunami events. This research aims to study the behaviour of timber wall structure under tsunami lateral loads. The methods used in this research were the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for modelling the tsunami waves using DualSPHysics software and the finite element (FE) method for modelling the behaviour of timber wall structure using ABAQUS/Explicit software. In this research, the tsunami wave modelling was undertaken following an experiment by Linton *et al.* (2013). The tsunami wave simulations produced pressure-time histories which were then in the FE modelling stage used as lateral loads acting on the vertical surface of the timber wall structure. The dynamic explicit analysis was implemented for the finite element modelling since the applied loads are typical of transient loads. The FE simulation were conducted in 20 second with time increment of 0.005 second. The timber wall structure has dimensions of 3.58 m long and 2.44 m high and was fixed supported. The timber wall was meshed with size of 0.02 m at the loaded part and gradually change coarser towards the top of the timber wall. The eight-node linear brick C3D8R element was used for modelling the elements of the timber wall. The analysis results show that, generally, the numerical deflections mimic the experimental deflections and the maximum numerical deflection is about 10% higher than experimental data. The numerical maximum tensile stress occurred in the middle of horizontal studs and this was similar to the location of tensile failure in the experimental test.

Keywords : *tsunami, timber wall, smoothed particle hydrodynamics, finite element method*

1 PENDAHULUAN

Bangunan rumah tinggal yang terbuat dari rangka kayu (rumah kayu) merupakan tipe bangunan yang paling banyak mengalami kerusakan akibat bencana tsunami sehingga menarik untuk dikaji secara lebih mendalam. Besarnya jumlah kerusakan rumah kayu karena terjangan tsunami dapat dilihat melalui data yang dilaporkan oleh Suppasri *et al.* (2012) dimana akibat bencana tsunami tahun 2011 di Jepang, sebanyak 115 ribu rumah kayu mengalami kerusakan parah, 162 ribu rumah kayu mengalami rusak sedang dan 559 ribu rumah kayu mengalami rusak sebagian. Fraser *et al.* (2013) mengelompokkan kerusakan rumah kayu ke dalam lima tingkatan yang masing-masing dinotasikan dengan D0 untuk bangunan tanpa kerusakan sama sekali (*immediate occupancy*), D1 untuk kerusakan ringan, D2 untuk kerusakan sedang, D3 untuk rusak berat dan D4 untuk keruntuhan total. Sebagai perbandingan, kerusakan rumah kayu tingkat D4 setara dengan tingkat kerusakan D1-D3 untuk gedung rangka baja atau tingkat kerusakan D1-D2 untuk gedung rangka beton bertulang.

Becker *et al.* (2011) mengemukakan bahwa kerusakan rumah kayu terkait bencana tsunami dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu (1) bangunan yang terendam setinggi batas tertentu yang tidak aman lagi bagi penghuninya, (2) bangunan yang mengalami kerusakan struktur sehingga menyebabkan keruntuhan dan melukai penghuninya, (3) bangunan yang mengalami pengaruh gaya tekanan ke atas dan gaya lateral akibat tsunami yang melampaui beban rencana bangunan. Ketiga kategori kerusakan tersebut disederhanakan istilahnya menjadi terendam, runtuh dan terapung. Tipe kerusakan tersebut terkait erat dengan konsep penyaluran beban pada rumah kayu yang diasumsikan menerima beban lateral pada dindingnya seperti yang terlihat pada Gambar 1. Tahanan lateral struktur rumah kayu terdiri dari empat komponen utama yaitu pondasi, lantai, dinding dan atap. Sistem struktur rangka rumah kayu menyalurkan gaya luar yang bekerja menuju pondasi. Komponen-komponen yang menahan beban pada rumah kayu terdiri dari papan, tiang (*studs*), atap, sambungan paku, dinding yang menahan geser dan angkur pondasi.



Gambar 1. Penyaluran gaya-gaya pada rumah kayu akibat beban lateral tsunami

Untuk lebih memahami perilaku rumah kayu yang dibebani gaya lateral akibat tsunami, beberapa peneliti melakukan pengujian eksperimental menggunakan tangki air yang panjang sebagai sarana pembangkitan dan penjalaran gelombang tsunami, seperti yang dilakukan oleh Linton *et al.* (2013) yang meneliti perilaku sebuah dinding kayu yang dibebani gaya lateral akibat gelombang tsunami. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Wilson *et al.* (2009) dan Lindt *et al.* (2009) yang menguji perilaku rumah kayu skala kecil yang dibebani oleh beban tsunami yang dibangkitkan dengan *paddle wavemaker* dalam suatu tangki air berukuran besar, sedangkan Thusyanthan and Madabhushi (2008) melakukan penelitian tentang pengaruh bukaan (*opening*) pada bangunan kayu dengan menggunakan tangki air berukuran lebih kecil dimana gelombang tsunami dibangkitkan dengan metode *dropped block*.

Penelitian eksperimental dengan tangki air tersebut membutuhkan waktu persiapan maupun pelaksanaan yang relatif lama serta biaya yang besar. Di sisi lain, pesatnya perkembangan teknik komputasi numerik di bidang terkait, baik dari segi *hardware* dan *software*, membuka peluang yang sangat besar untuk menghemat waktu dan biaya penelitian, dengan akurasi hasil yang mendekati eksperimen. Beberapa penelitian tentang perilaku struktur kayu akibat beban tsunami dengan metode pemodelan numerik yang tervalidasi telah dilakukan oleh Como and Mahmoud (2013) yang menggabungkan metode *Eulerian* dan *Lagrangian* untuk simulasi *debris*

impact pada struktur kayu. Pemodelan numerik tentang interaksi tsunami dan struktur bangunan juga dilakukan oleh Cunningham *et al.* (2014) dan Pringgana *et al.* (2016), yang memanfaatkan akselerasi *hardware* untuk mempercepat proses komputasi dengan akurasi hasil yang baik.

Terkait dengan penelitian numerik yang keunggulannya telah disinggung secara singkat, tulisan ini juga menentang suatu penelitian dengan pemodelan numerik yang bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur dinding kayu yang dibebani oleh gaya lateral akibat benturan gelombang tsunami. Pemodelan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu pemodelan pertama berupa pemodelan gelombang tsunami dengan metode *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) menggunakan *software* DualSPHysics hingga menghasilkan prediksi besarnya beban lateral tsunami pada dinding kayu, dan kemudian dilanjutkan dengan pemodelan kedua berupa pemodelan struktur dinding kayu yang dibebani beban lateral dengan metode elemen hingga menggunakan *software* ABAQUS/*Explicit*. Teknik pemodelan numerik ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas tentang interaksi antara tsunami dan dinding rumah kayu sebagai salah satu representasi struktur bangunan di pesisir pantai. Selain itu, teknik pemodelan numerik dalam penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif pembanding bagi penelitian eksperimental dengan akurasi hasil yang tidak jauh berbeda.

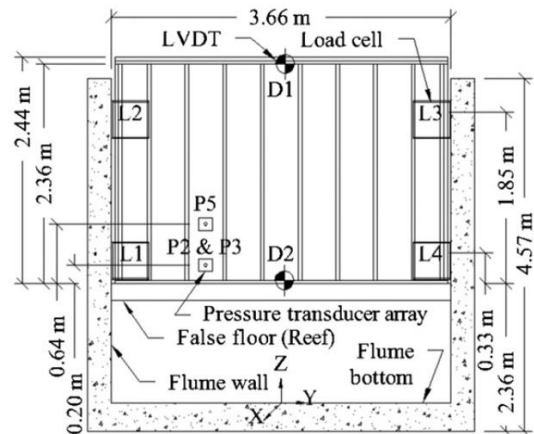
2 MATERI DAN METODE

2.1 Model dan geometri dinding kayu dan tangki air

Model dinding kayu yang dijadikan obyek pemodelan numerik dalam penelitian ini, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2, telah diuji secara eksperimental oleh Linton *et al.* (2013). Dinding kayu skala penuh tersebut diuji di dalam suatu tangki air dan diposisikan di ujung kanan tangki. Dinding kayu disiapkan sedemikian rupa untuk menerima beban benturan gelombang tsunami yang dibangkitkan oleh *paddle wavemaker* yang diposisikan di ujung kiri tangki, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Tangki air tersebut didesain menyerupai topografi pantai yang terdiri dari bagian *offshore*, *sloping bed* dan *onshore*.



(a) Prototipe dinding kayu dan pola keruntuhannya



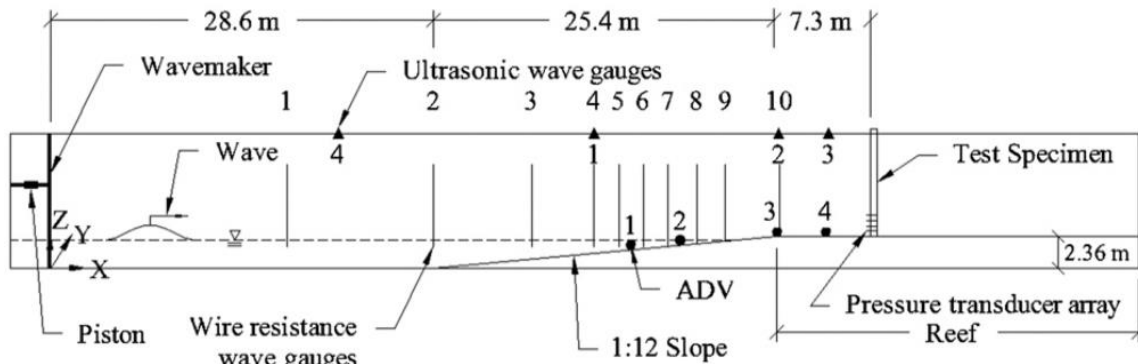
(b) Dimensi dan instrumentasi dinding kayu

Gambar 2. Dimensi dan instrumentasi pengujian prototipe dinding kayu (Linton *et al.*, 2013)

Struktur dinding kayu memiliki dimensi lebar 3,58 m dan tinggi 2,44 m. Struktur dinding kayu terdiri dari komponen vertikal (*studs*) dengan jarak pemasangan teratur. Selain itu struktur dinding kayu ini juga memiliki *studs* ganda yang dipasang horizontal, masing-masing terletak di bagian atas dan di bagian bawah dinding. Permukaan dinding ditutup dengan papan *plywood* setebal 13 mm pada sisi mukanya dan dipaku ke *studs*. Dimensi *studs* vertikal adalah 38x140 mm dengan spasi pemasangan sejarak 420 mm. *Studs* vertikal memiliki dimensi yang sama dengan stud horizontal. Material kayu yang digunakan adalah yang masuk klasifikasi *Douglas Fir kiln-dried No.2* yang merupakan ketetapan dari *International Code Council* (2009). Sifat-sifat material untuk kayu yang digunakan antara lain; *Modulus Young* untuk elastisitas, $E_{stud} = 7.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, *Poisson's ratio* = 0.22, dan berat jenis = 530 kg/m^3 . Sifat-sifat material untuk lembar *plywood* antara lain; *Modulus Young* untuk elastisitas, $E_{plywood} = 7.7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, *Poisson's ratio* = 0.22 dan berat jenis = 750 kg/m^3 .

Perletakan untuk struktur dinding kayu adalah perletakan jepit yang direpresentasikan oleh empat buah pelat baja pada sisi dinding. Pada keempat buah pelat tersebut dipasang *load cell* dan keempat pelat tersebut terhubung ke dinding tangki air dengan tipe perletakan jepit. Namun, dalam eksperimen yang dilakukan oleh Linton *et al.*, (2013), bagian bawah dari struktur dinding kayu tersebut dikondisikan bebas tanpa pengekang sehingga perletakannya tidak berperilaku jepit atau sendi sekalipun, dimana hal ini merupakan skenario yang tidak lazim jika dikaitkan dengan praktek standar pada konstruksi bangunan. Seperti yang dijelaskan oleh Linton

et al., (2013), hal ini dimaksudkan untuk mengontrol mode keruntuhan agar terjadi keruntuhan lentur pada bagian bawah dinding kayu. Agar sesuai dengan kondisi eksperimen, bagian bawah dinding kayu juga dimodelkan tanpa perletakan pada pemodelan elemen hingga.



Gambar 3. Layout tangki air pada eksperimen oleh Linton *et al.* (2013)

Struktur dinding kayu yang terdapat pada Linton *et al.* (2013) dipilih sebagai obyek pemodelan numerik karena memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut:

1. Struktur dindingnya terbuat dari kayu yang merupakan material dari bangunan yang paling sering mengalami kerusakan ketika terjadi bencana tsunami. Struktur dinding kayu yang dipilih telah sesuai dengan standar internasional yang ditetapkan oleh *International Code Council* (2009).
2. Dinding kayu dalam eksperimen dibuat dengan skala penuh sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran perilaku struktur sesuai dengan realitas tanpa perlu mempertimbangkan pengaruh faktor skala yang biasanya terjadi pada benda uji yang sengaja dibuat dalam skala lebih kecil.
3. Dinding kayu dilengkapi dengan instrumentasi berupa tiga buah *pressure transducers* yang dipasang pada ketinggian yang berbeda dan dua buah *linear variable differential transducers* (LVDTs) yang diposisikan di bagian yang dianggap kritis yaitu di bagian tengah-atas dan tengah-bawah dinding untuk mengukur lendutan yang terjadi.
4. Pengujian dilakukan di dalam tangki air berukuran besar dengan hamparan koral kering meyerupai kondisi pantai yang sesungguhnya.

2.2 Pemodelan Gelombang Tsunami

Tahap awal sebelum dilakukan pemodelan gelombang tsunami dengan metode *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) adalah tahap validasi model SPH dengan mengacu pada *dambreak test* yang dilakukan oleh Kleefsman *et al.* (2005) yang merupakan *benchmark test case* untuk kasus-kasus pemodelan yang terkait gerakan air. Validasi ini bertujuan untuk menentukan beberapa parameter penting termasuk diameter partikel SPH dan viskositas fluida. Tahapan validasi model kemudian dilanjutkan dengan pemodelan gelombang tsunami pada tangki air. Teknik pemodelan gelombang tsunami pada tangki air secara lebih detail dapat dilihat pada Cunningham *et al.* (2014) dan Pringgana *et al.* (2016).

Gelombang tsunami direpresentasikan oleh *solitary wave* yang dibangkitkan dengan gerakan *numerical paddle wavemaker* yang trayektori gerakannya disamakan dengan trayektori gerakan *paddle* saat eksperimen di lab. *Solitary wave* menjalar di sepanjang tangki air dengan kecepatan dan ketinggian gelombang yang tervalidasi dengan hasil eksperimen, dimana *solitary wave* ini akan pecah (*breaking wave*) begitu mendekati *shoreline* dan berubah bentuk menjadi *bore*. *Tsunami bore* ini masih memiliki energi sehingga mampu terus melaju ke daerah *shoreline* melewati hamparan koral dan akhirnya membentur struktur dinding kayu sebagai beban lateral.

Pemodelan gelombang tsunami dengan *software* berbasis SPH bernama DualSPHysics terkait dengan eksperimen yang dilakukan oleh Linton *et al.* (2013) telah dilakukan oleh Cunningham *et al.* (2014) sehingga prosedur dan validasinya tidak dibahas lagi dalam tulisan ini, namun hanya hasil pemodelan SPH berupa riwayat beban-waktu (*pressure-time history*) yang akan dipaparkan dalam tulisan ini karena riwayat beban-waktu tersebut akan menjadi input beban pada analisis elemen hingga struktur dinding kayu.

2.3 Konsep Analisis Elemen Hingga dengan ABAQUS/Explicit

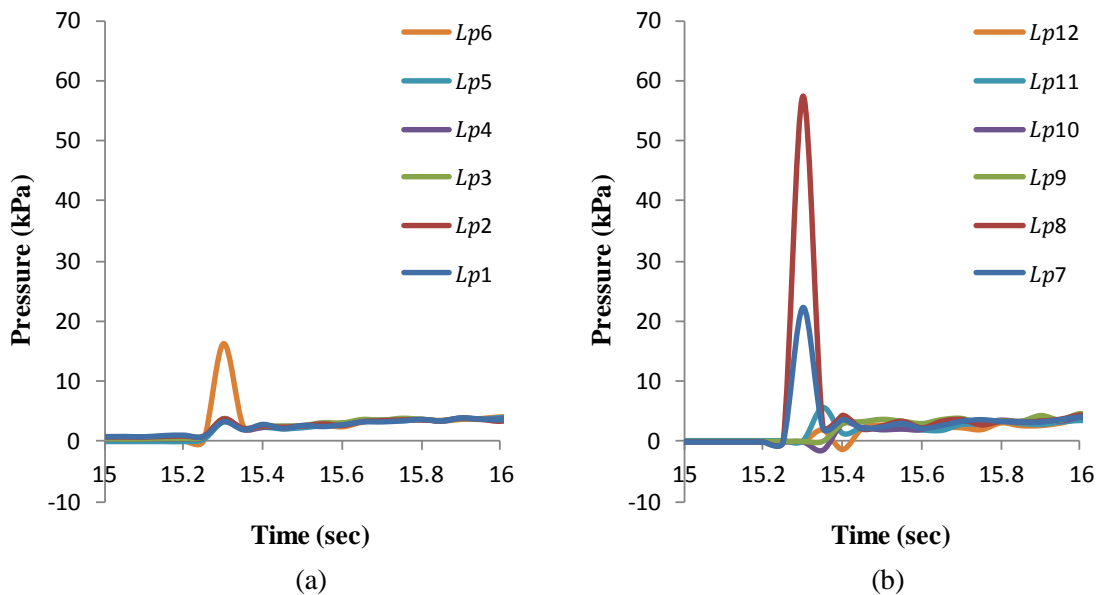
Pemodelan elemen hingga adalah salah satu metode yang paling efektif dan akurat untuk analisis dinamis suatu struktur yang menerima beban benturan (Al-Thairy, 2012). Berbeda dengan program ABAQUS *Standard*, program ABAQUS/Explicit memang diperuntukkan bagi pemodelan yang melibatkan pembebanan dinamis yang berdurasi sangat pendek (*transient dynamic*) seperti ledakan atau benturan (ABAQUS, 2010). Dengan pertimbangan tersebut maka metode *explicit dynamic* pada ABAQUS/Explicit dipilih untuk menganalisis beban benturan gelombang tsunami pada struktur yang sifatnya *transient* dalam penelitian ini.

ABAQUS/*Explicit* mengintegrasikan kuantitas dinamik seperti percepatan, kecepatan, tegangan dinamik dan regangan dalam satu *time increment*. Kuantitas dinamik tersebut di-ekstrak secara kinematis dari satu *time increment* ke *time increment* berikutnya, dimana pada metode elemen hingga biasa, persamaan dinamis diselesaikan secara bersamaan. Prosedur yang diimplementasikan dalam ABAQUS/*Explicit* untuk menghitung percepatan nodal, kecepatan nodal, dan perpindahan nodal, menjamin bahwa nilai suatu kuantitas yang diperoleh pada akhir suatu *time increment* adalah sama dengan nilai kuantitas terkait untuk langkah (*time step*) berikutnya, dan hal inilah yang membuat metode ini disebut *explicit*. Maka dari itu, untuk memperoleh hasil yang akurat, perlu dipastikan bahwa rentang *time increment* yang digunakan haruslah cukup untuk membuat akselerasi yang terjadi mendekati konstan sepanjang *time increment*.

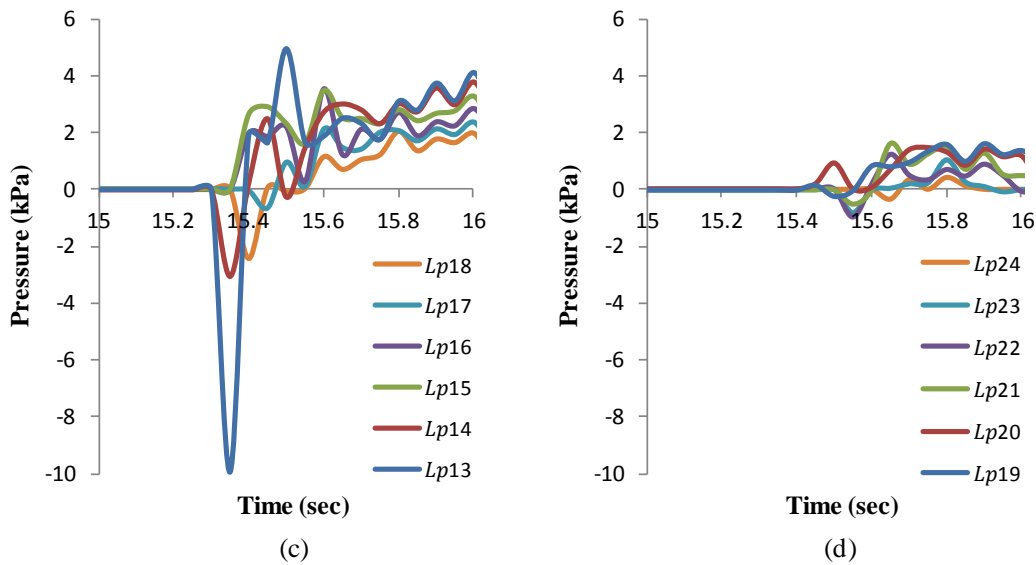
Simulasi perilaku struktur akibat beban benturan dalam durasi yang sangat singkat membutuhkan pemilihan parameter yang tepat baik geometri maupun materialnya, dan terkait hal ini tipe elemen yang umum dipakai adalah elemen *solid*. Elemen *shell* dapat dipakai untuk memodel elemen struktur yang berukuran kecil, sedangkan elemen *spring* dapat digunakan untuk memodel paku yang kerap kali digunakan pada struktur kayu. Hal yang tidak kalah penting lainnya adalah pendefinisian kontak antar elemen, *stability limit*, *time increment* dan efek redaman. Untuk mengintegrasikan berbagai respon output terkait tegangan dan regangan pada elemen *solid* dan *shell*, ABAQUS/*Explicit* mengadopsi teknik yang menggunakan titik integrasi *Gaussian* yang lebih sedikit dibandingkan dengan skema integrasi penuh. Pemakaian teknik integrasi dengan pengurangan titik integrasi dapat menimbulkan masalah numerik yang diistilahkan dengan "*hourglass problem*", sehingga untuk mengatasinya dapat digunakan *artificial hourglass stiffness* yang disediakan dalam ABAQUS/*Explicit*.

2.4 Pembebanan dan Pemodelan Dinding Kayu dengan ABAQUS/*Explicit*

Analisis elemen hingga untuk struktur dinding kayu dilakukan dengan menggunakan ABAQUS/*Explicit* karena beban yang bekerja bersifat *transient* atau berdurasi sangat singkat, dimana hal ini merupakan salah satu aspek yang membedakannya dengan penggunaan ABAQUS *Standard*. Beban yang dikerjakan pada dinding kayu yang merupakan *pressure* yang diperoleh dari hasil pemodelan SPH dapat dilihat pada Gambar 4.



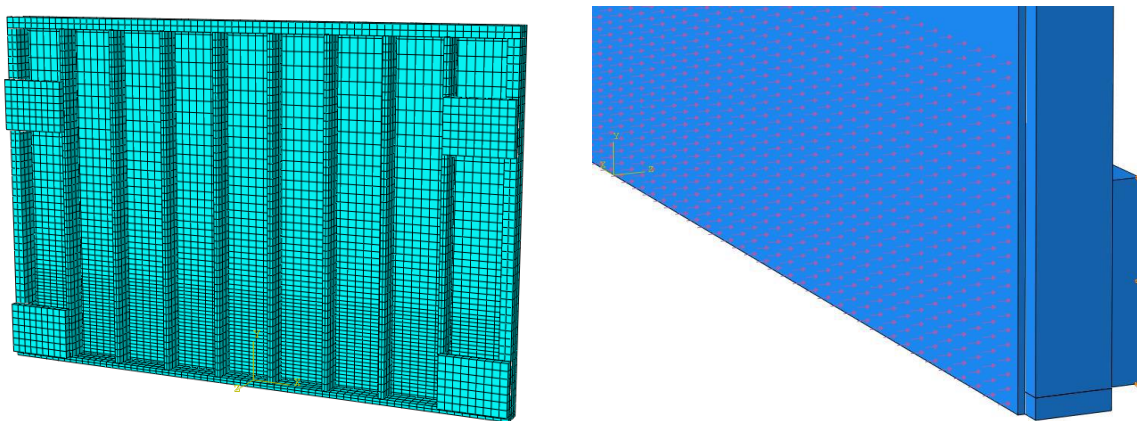
Gambar 4. Riwayat beban-waktu untuk pemodelan elemen hingga dinding kayu



Gambar 4. Riwayat beban-waktu untuk pemodelan elemen hingga dinding kayu (lanjutan)

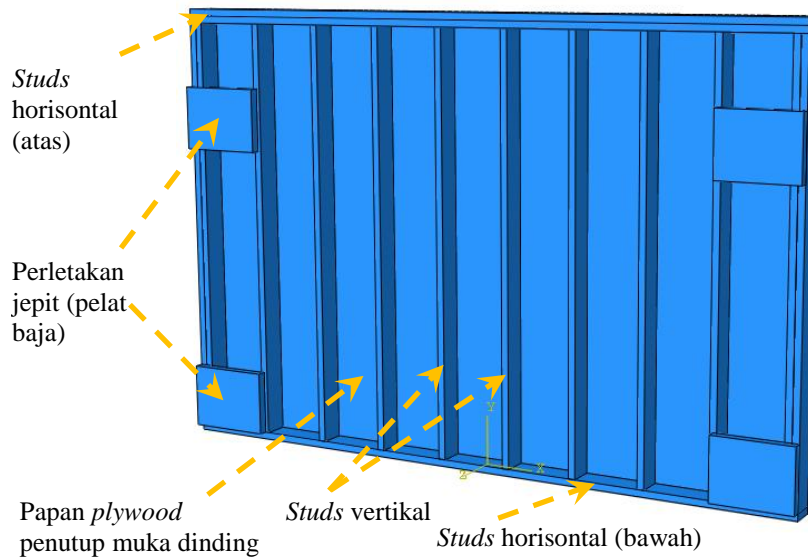
Gambar 4 memperlihatkan adanya 24 nilai beban berbeda yang dinotasikan dengan Lp1 hingga Lp24, dimana beban-beban tersebut bekerja di muka dinding kayu pada level-level berbeda dimulai dari Lp1 yang bekerja di level paling rendah disusul di atasnya oleh Lp2 dan seterusnya hingga Lp24. Nilai terbesar dari pressure ini ditunjukkan oleh Lp8 pada Gambar 4b. Beda tinggi antar lapisan ini adalah 0,02 m, sesuai dengan ukuran *pressure probes* pencatat nilai tsunami *impact pressure* di model SPH. Ketinggian 24 level ini menandakan ketinggian maksimum *tsunami bore runup* pada model SPH dan selebihnya tidak ada *pressure* yang dicatat oleh *pressure probes* pada ketinggian diatas 24 level ini. Untuk memperjelas visualisasi nilainya, beban-beban tersebut digambarkan terbagi menjadi empat buah grafik pada Gambar 4 dengan skala ordinat yang berbeda, dimana pada Gambar 4 (a, b) besarnya *pressure* berada diantara rentang nilai -10 kPa hingga 70 kPa, sedangkan pada Gambar 4 (c, d) besarnya *pressure* berada diantara rentang nilai -10 kPa hingga 6 kPa. Nilai negatif yang tercatat pada Gambar 4 merepresentasikan hisapan (*suction*), dalam suatu interaksi yang kompleks yang melibatkan keberadaan rongga atau gelembung udara pada air, saat terjadinya benturan antara air laut dan struktur *solid*.

Model elemen hingga memiliki *mesh* dengan ukuran berbeda. Pada daerah pembebanan, ukuran mesh diatur agar sama dengan ukuran partikel pada model SPH, yaitu sebesar 0,02 m. Ukuran mesh ini sedikit demi sedikit diubah menjadi lebih besar seiring bertambahnya jarak mesh tersebut dari daerah pembebanan, seperti yang terlihat pada Gambar 5a. Penggunaan ukuran mesh yang beragam ini bertujuan untuk mengurangi jumlah nodal yang secara langsung berpengaruh pada total waktu yang dibutuhkan untuk proses analisis elemen hingga. Gambar 5b memperlihatkan panah-panah kecil yang merepresentasikan arah beban yang bekerja pada struktur dinding kayu sesuai dengan arah beban benturan *tsunami bore*. Elemen-elemen pembentuk struktur dinding kayu beserta perletakan jepit pada model elemen hingga dapat dilihat pada Gambar 6.



(a) Mesh pada model dinding kayu sisi belakang (b) Distribusi beban pada sisi depan dinding kayu
 Gambar 5. Model elemen hingga dinding kayu

Elemen *8-node linear brick* pada ABAQUS/*Explicit* digunakan untuk memodel komponen struktur dinding kayu. Durasi analisis model elemen hingga yang digunakan adalah 20 detik dengan *time increment* sebesar 0,005 detik, dimana rentang waktu 20 detik tersebut disamakan dengan total waktu simulasi model SPH yang mencakup proses penjalaran gelombang tsunami dan proses benturannya dengan struktur dinding kayu. Prosedur analisis yang digunakan pada ABAQUS/*Explicit* untuk simulasi elemen hingga adalah *dynamic-explicit*, dimana prosedur ini dipilih agar simulasi yang dihasilkan mampu mencitrakan respon struktur dinding kayu yang menerima benturan dalam durasi yang sangat singkat dan hal ini terkait dengan pengaturan *time increment* sebesar 0,005 detik. Pemilihan nilai *time increment* ini terkait dengan karakteristik benturan gelombang air pada struktur yang dikategorikan sebagai beban *transient* yang bekerja dalam durasi yang sangat singkat. Bahan kayu untuk dinding pada pemodelan elemen hingga didefinisikan sebagai *anisotropic material*, sedangkan untuk rasio redaman pada struktur diatur sebesar 3% dengan opsi tanpa memperhitungkan *strain rate dependency*.

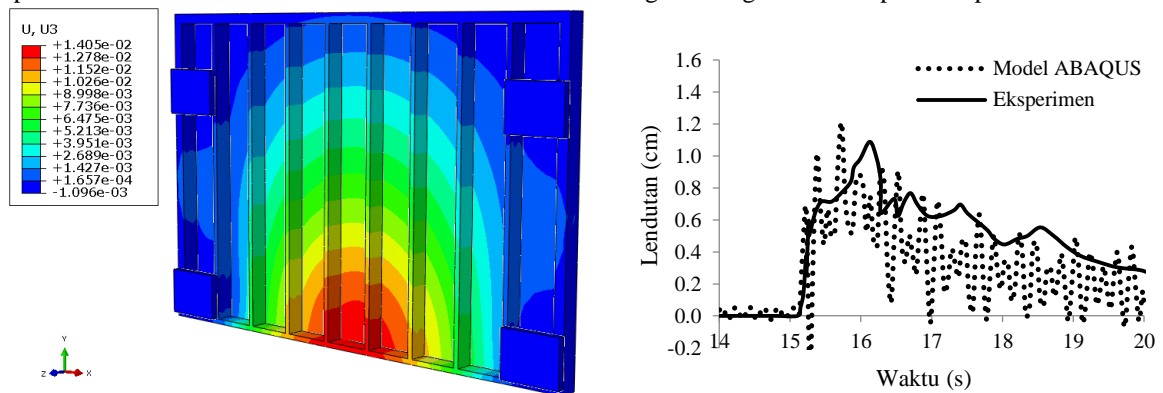


Gambar 6. Sisi belakang model elemen hingga yang menunjukkan komponen struktur dinding kayu

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Lendutan Dinding Kayu

Perilaku struktur dinding kayu yang dibebani benturan gelombang tsunami diamati dari lendutan dan distribusi tegangan hasil analisis elemen hingga. Besarnya lendutan pada dinding dapat dilihat dari kontur yang diperlihatkan oleh Gambar 7a dan lendutan tersebut dibandingkan dengan hasil eksperimen pada Gambar 7b.



(a) Kontur lendutan

(b) Perbandingan lendutan model dan eksperimen

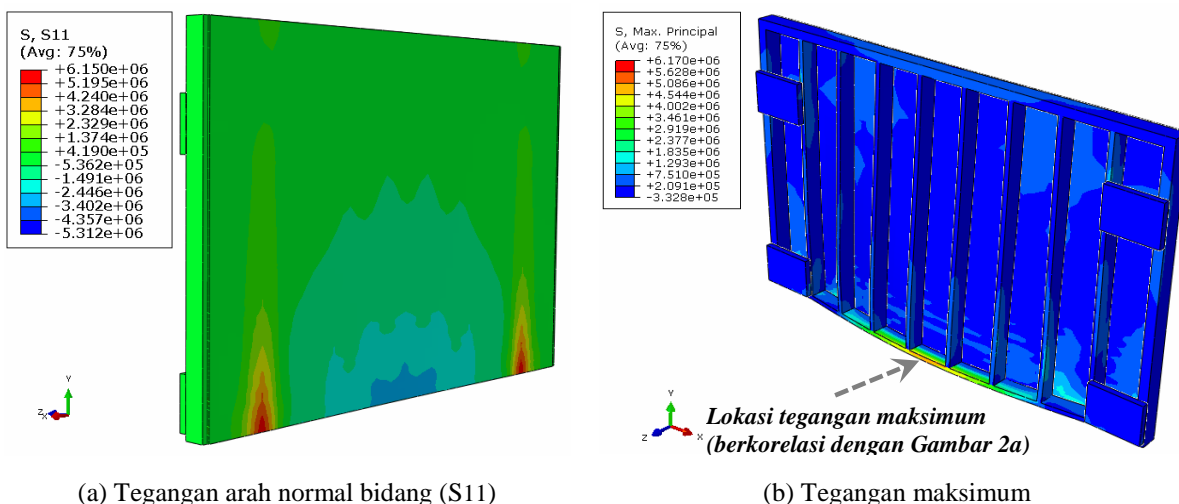
Gambar 7. Lendutan hasil analisis elemen hingga

Lendutan maksimum terjadi pada daerah tengah dinding bagian bawah dan semakin jauh dari pusat lendutan maksimum, besarnya lendutan berangsur berkurang mengikuti pola seperti yang terlihat pada Gambar

7a. Secara umum, lendutan hasil pemodelan elemen hingga memiliki pola yang sama dengan hasil eksperimen seperti yang terlihat pada Gambar 7b. Lendutan maksimum terjadi pada catatan waktu yang sedikit berbeda antara eksperimen dan model elemen hingga, hal ini wajar terjadi karena kompleksitas interaksi antara *solid* (kayu) dan *fluid* (tsunami), selain itu model numerik tidak sepenuhnya mampu memodel kondisi tangki air secara sempurna, misalnya hamparan koral di depan struktur pada eksperimen yang tidak dimodelkan pada model numerik. Lendutan maksimum pada model elemen hingga, lebih tinggi 10% jika dibandingkan dengan data hasil eksperimen dan hal ini dipengaruhi oleh hasil tahapan pemodelan SPH yang menghasilkan riwayat beban-waktu yang dipakai sebagai beban dalam model elemen hingga. Pada model SPH yang mensimulasikan gelombang tsunami yang membentur dinding kayu, interaksi antara *solid* dan *fluid* belum mampu diprediksi sepenuhnya sesuai kenyataan, dimana struktur *solid* pada model SPH termodelkan kaku sempurna (*perfectly rigid*), walau pada kenyataannya tidak kaku sempurna karena kayu mempunyai nilai modulus elastisitas sehingga dapat berdeformasi saat dibebani. Kedepannya, interaksi antara bangunan *solid* dan *fluid* ini perlu diteliti lebih lanjut untuk mendapatkan hasil prediksi yang lebih akurat. Gambar 7b menunjukkan beberapa nilai negatif pada lendutan hasil prediksi elemen hingga, namun tidak ditunjukkan oleh hasil eksperimen. Nilai negatif ini dapat diartikan sebagai lendutan ke arah yang berlawanan dengan arah lendutan positif. Lebih jauh lagi dapat dijelaskan bahwa nilai lendutan negatif tersebut dipengaruhi oleh nilai negatif yang merepresentasikan hisapan (*suction*) pada Gambar 4 yang merupakan input beban untuk model elemen hingga. Hisapan ini adalah fenomena yang memang benar terjadi dalam interaksi *solid* dan *fluid*, namun terkadang luput dari pengamatan eksperimental karena keterbatasan instrumentasi pengujian. Hal ini menunjukkan salah satu keunggulan dari teknik pemodelan numerik, yang jika dilakukan dengan benar, dapat menangkap fenomena tertentu yang tidak terdeteksi dalam pengujian eksperimental.

3.2 Tegangan pada Dinding Kayu

Gambar 8a memperlihatkan kontur tegangan S11 yang menunjukkan tegangan arah normal bidang pada sisi depan lembaran *plywood* saat bekerjanya beban maksimum. Tegangan tarik maksimum terjadi pada daerah tengah dinding bagian bawah, tepat dimana *load cell* terpasang pada uji eksperimen. Gambar 8b menunjukkan tegangan pada permukaan elemen di sisi belakang struktur dinding kayu pada level beban maksimum. Tegangan maksimum terjadi pada bagian bawah elemen struktur horizontal dengan nilai tegangan mendekati kapasitas maksimum elemen kayu. Hasil prediksi model elemen hingga ini sesuai dengan hasil eksperimen oleh Linton *et al.* (2013), dimana keruntuhan tarik juga terjadi pada komponen dan lokasi yang sama, yaitu pada komponen *stud* horizontal bagian bawah, seperti yang ditandai oleh garis putus-putus Gambar 2a.



Gambar 8. Tegangan hasil analisis elemen hingga pada beban maksimum

4 KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemodelan numerik yang merupakan gabungan dari metode *smoothed particle hydrodynamics* menggunakan *software* DualSPHysics dan metode elemen hingga menggunakan *software* ABAQUS/*Explicit* dapat secara cukup akurat memprediksi perilaku struktur dinding kayu yang dibebani oleh gaya lateral tsunami. Perbedaan lendutan maksimum hasil model elemen hingga dan eksperimen sebesar 10 persen menunjukkan bahwa akurasi pemodelan dengan metode SPH perlu ditingkatkan lagi dengan memperhitungkan modulus elastisitas kayu dalam pemodelan. Model elemen hingga mampu memprediksi model keruntuhan struktur kayu hasil eksperimen melalui *output* tegangan maksimum, dimana hal ini menunjukkan bahwa ABAQUS/*Explicit* sangat sesuai digunakan untuk memprediksi perilaku struktur akibat

beban *transient* seperti benturan gelombang tsunami. Teknik pemodelan ini dapat dimanfaatkan dan dikembangkan lebih lanjut oleh perencana struktur untuk mendesain maupun menganalisis bangunan tahan tsunami.

5 DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS. 2010. *ABAQUS analysis user's manual*. Providence, Rhode Island, USA., SIMULIA, Dassault Systèmes.
- Al-Thairy, H. A. B. 2012. Behaviour and design of steel columns subjected to vehicle impact. *PhD Thesis*, University of Manchester.
- Becker, A. B., Johnstone, W. M. and Lence, B. J. 2011. Wood frame building response to rapid-onset flooding. *Natural Hazards Review*, Vol. 12(2), pp. 85–95.
- Como, A., & Mahmoud, H. 2013. Numerical evaluation of tsunami debris impact loading on wooden structural walls. *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 1249–1261.
- Cunningham, L. S., Rogers, B. D. and Pringgana, G. 2014. Tsunami wave and structure interaction: an investigation with smoothed-particle hydrodynamics. *ICE Journal of Engineering and Computational Mechanics*, Vol. 167(EM3), pp. 126–138.
- Fraser, S., Raby, A., Pomonis, A., Goda, K., Chian, S. C., Macabuag, J., Offord, M., Saito, K. and Sammonds, P. 2013. Tsunami damage to coastal defences and buildings in the March 11th 2011 Mw9.0 Great East Japan earthquake and tsunami. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11(1), pp. 205–239.
- International Code Council. 2009. International residential code for one- and two-family dwellings. *Country Club Hills, IL*.
- Kleefsman, K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B. and Buchner, B. 2005. A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems. *Journal of Computational Physics*, Vol. 206, pp. 363–393.
- Linton, D., Gupta, R., Cox, D., van de Lindt, J., Oshnack, M. E., and Clauson, M. 2013. Evaluation of Tsunami Loads on Wood Frame Walls at Full Scale. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 139(8), pp. 1318–1325.
- Pringgana, G., Cunningham, L. S. and Rogers, B. D. 2016. Modelling of tsunami-induced bore and structure interaction. *ICE Journal of Engineering and Computational Mechanics*, Vol. 169(EM3), pp. 109–125.
- Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E. and Yalciner, A. C. 2012. Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Tsunami: Performance of Tsunami Countermeasures, Coastal Buildings, and Tsunami Evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170(6), pp. 993–1018.
- Thusyanthan, N. I. and Madabhushi, S. P. G. 2008. Tsunami wave loading on coastal houses: a model approach. *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, Vol. 161(2), pp. 77–86.
- Lindt, J. W., Gupta, R., Garcia, R. and Wilson, J. 2009. Tsunami bore forces on a compliant residential building model. *Engineering Structures*, Vol. 31(11), pp. 2534–2539.
- Wilson, J. S., Gupta, R., van de Lindt, J. W., Clauson, M., & Garcia, R. 2009. Behavior of a One-Sixth Scale Wood-Framed Residential Structure under Wave Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 23(5), pp. 336–345.