

Teoritikal Bentuk *Bore* Tsunami Menggunakan Metode *Dambreak* Dan *Wavemaker* Dengan Sistem *DualSPHysics*

Kartika Indah Sari¹

Staf Pengajar, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Harapan Medan
mutiyalubis@gmail.com

Yusrizal Lubis²

Staf Pengajar, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Harapan Medan
yrizall@gmail.com

Ditya Andrian Supit³

Mahasiswa, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Harapan Medan
aditandre0@gmail.com

Abstract

A tsunami is a large water wave with the impact of damage and destruction on facilities and infrastructure when it spreads to the mainland. In general, a tsunami approaching the coast forms a bore wave when a single uniform (solitary) wave in a tsunami breaks when it enters the coast. This research was conducted to determine the transition process of tsunami waves to form a bore, as well as to determine the characteristics of the tsunami bore shape. The bore tsunami research was carried out using the dambreak and wavemaker methods using the DualSPHysics simulation computational program, the dimensions of the open channel at the dambreak were 20.7 m x 1.43 m x 1.5 m. The beach modeling on the dambreak has dimensions of 12.7 m x 0.64 m with a slope of 1:20. The channel dimensions on the wavemaker are 135 m x 2 m x 5 m. The wavemaker beach model has dimensions of 60 m x 3 m with a slope of 1:20. The total number of particles in the dambreak simulation is 24,638,764. The simulation results provide information that the bore wave is the result of the transition of a solitary wave breaking as it approaches the shoreline. The wave height that was formed at the beginning of the formation will continue to increase in height until it approaches the shoreline.

Keywords:

Bore, DualSPHysics, wavemaker, dambreak

Abstrak

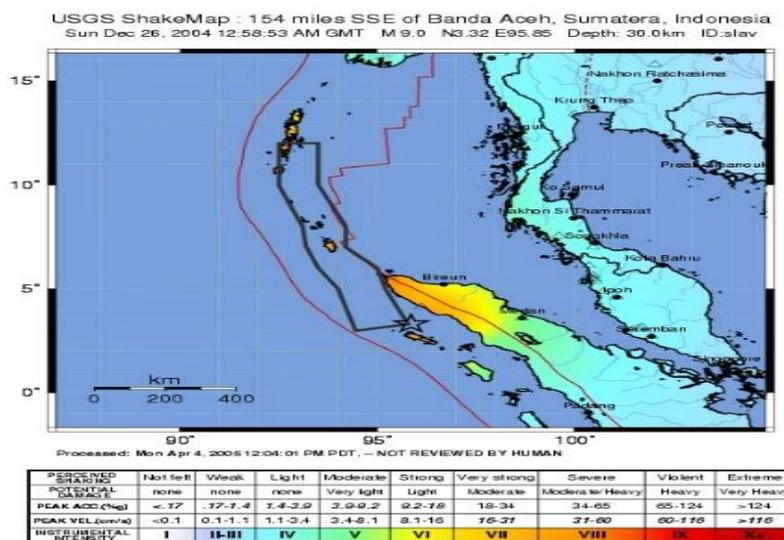
Tsunami merupakan gelombang air besar dengan dampak kerusakan dan kehancuran terhadap sarana dan prasarana ketika menjalar ke daratan. Secara umum tsunami yang mendekati pantai membentuk gelombang bore saat gelombang seragam tunggal (solitary) pada tsunami pecah ketika memasuki pantai. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui proses transisi gelombang tsunami sampai membentuk bore, serta mengetahui karakteristik bentuk bore tsunami. Penelitian bore tsunami dilakukan dengan metode dambreak dan wavemaker menggunakan program komputasi simulasi DualSPHysics, dimensi saluran terbuka pada dambreak 20,7 m x 1,43 m x 1,5 m. Pemodelan pantai pada dambreak berdimensi 12,7 m x 0,64 m dengan kemiringan 1:20. Dimensi saluran pada wavemaker 135 m x 2 m x 5 m. Pemodelan pantai wavemaker berdimensi 60 m x 3 m dengan kemiringan 1:20. Jumlah total partikel pada simulasi dambreak adalah 24,638,764. Hasil simulasi memberikan informasi bahwa gelombang bore merupakan hasil transisi pecahnya gelombang soliter saat mendekati garis pantai. Tinggi gelombang yang terbentuk pada awal pembentukan akan terus meningkat ketinggiannya hingga sampai mendekati garis pantai.

Kata Kunci:

Bore, DualSPHysics, wavemaker, dambreak.

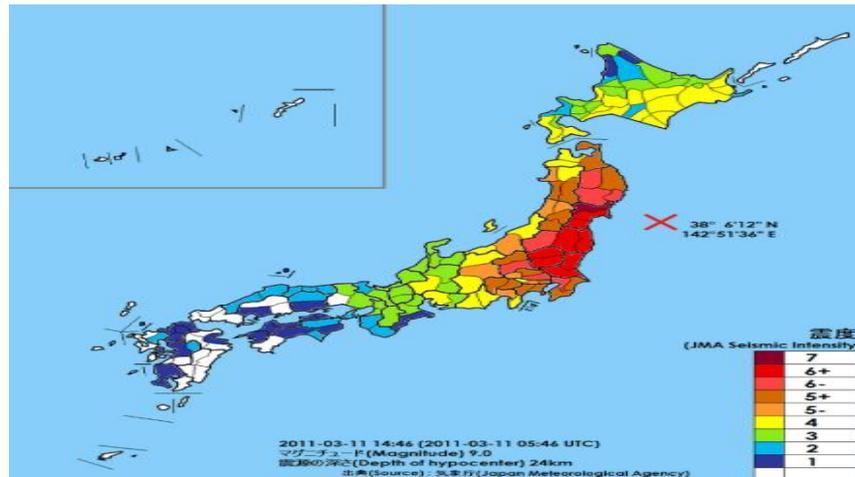
1. PENDAHULUAN

Fenomena tsunami yang terjadi pada suatu lokasi dapat menyebabkan kerusakan serta kehancuran bangunan dan infrastruktur ketika aliran gelombang menjalar permukaan daratan. Hal tersebut dapat terjadi akibat adanya gaya hidrodinamika yang berasal dari tsunami yang kemudian memberikan sebuah gaya berupa dorongan melalui hantaman yang diterima melalui hantaman puing tsunami. Gangguan stabilitas yang dialami di dasar laut dapat berupa adanya dislokasi pada dasar samudra akibat gempa tektonik, letusan gunung api bawah laut, longsoran material dari sebuah tebing, ataupun akibat jatuhnya meteor. Peristiwa tsunami yang melanda wilayah Aceh pada 2004 diawali oleh adanya getaran gempa berkekuatan 9,1 – 9,3 skala *richter* pada kedalaman 30 km dan lokasi pusat gempa (*epicenter*) berada di Samudera Hindia. Dampak yang terjadi akibat adanya getaran gempa yang kuat tersebut berdampak sampai ke 15 negara serta mengakibatkan terjadinya gelombang *tsunami* setinggi 50,9 meter dan memakan korban sebanyak 230.000 – 280.000 jiwa. Jepang pada tahun 2011 juga mengalami peristiwa yang serupa dengan gempa berkekuatan 9.0 skala *richter* pada kedalaman 24 km, yang juga mengakibatkan *tsunami* pada negara ini dengan ketinggian gelombang setinggi 40,5 meter dan memakan korban sebanyak 20.000 jiwa. Suppasri et al., (2012) menjelaskan bahwa saat bencana *tsunami* di Aceh terjadi setidaknya ada sebanyak 120.000 rumah yang mengalami kehancuran, 70.000 lainnya rusak berat, 150.000 korban jiwa. Peristiwa *tsunami* di Aceh juga menghancurkan sebanyak 3.000 bangunan pemerintahan, termasuk rumah sakit dan juga sekolah. Terjadinya peristiwa tersebut berdampak menghancurkan sebanyak 14 pelabuhan, ± 3.000 km jalanan di daerah tersebut mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh adanya bencana alam *tsunami* yang melalui daerah tersebut.



Gambar 1. Pusat gempa (*epicenter*) Aceh, Indonesia, 26 Desember 2004.
(USGS, 2010)

Di Tohoku, Jepang ketika bencana *tsunami* melanda terdapat beberapa kerusakan bahkan kehancuran yang terjadi juga, diantaranya seperti 14.508 korban meninggal dan 11.452 orang hilang 76.000 rumah hancur dan hanyut, 244.000 rumah rusak ringan. Sebanyak 345 kasus di 12 prefektur kebakaran pasca gempa di Jepang. Kerusakan terhadap infrastruktur juga terjadi seperti kerusakan jalan di 3.546 area, 71 jembatan dan 26 bagian pada sistem kereta api.

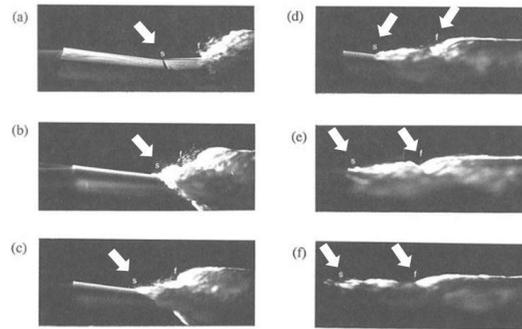


Gambar 2. Pusat Gempa (*epicenter*) Tohoku, Jepang, 11 Maret 2011.
(Japan Meteorological Agency (JMA), 2011)

Simulasi numerik menggunakan sistem *DualSPHysics* dengan metode *dambreak* dan *wavemaker* dilakukan untuk mengetahui karakteristik tsunami yang terbentuk beserta bentuk *bore* yang menjalar membentuk *run up* saat mulai mendekati permukaan daratan pantai hingga ke pemukiman serta mengetahui daya kecepatan sebuah rambatan/penjalaran yang terjadi terhadap gelombang *bore tsunami* saat awal pembangkitan gelombang hingga menuju ke daratan pantai. Bentuk gelombang *tsunami* yang terbentuk dan menjalar kemudian pecah dekat dengan perairan pantai atau pecah di garis pantai, selanjutnya akan terus menjalar ke arah daratan dalam bentuk gelombang *bore* yang memiliki karakteristik kecepatan maksimumnya berada di ujung depan gelombang (H. H. Yeh et al., 1989). Istilah *bore* pada gelombang *tsunami* digunakan untuk menggambarkan suatu lonjakan yang terjadi di perairan dangkal. Yeh *et al.*, (1989) juga menjelaskan proses transisi *bore undular* menuju ke gelombang *run-up* tampaknya berbeda dengan *bore* yang telah berkembang sepenuhnya. Bagian depan gelombang *bore* akan berguling langsung ke permukaan pantai yang kering disusul dengan terbentuknya sebuah *run-up* ditandai dengan lapisan percikan aliran tipis. Simulasi dilakukan untuk membantu memberikan gambaran serta meningkatkan upaya dalam mengembangkan proses mitigasi bencana alam tsunami yang akan diterapkan. *DualSPHysics* merupakan sebuah sistem *software* pembentukan kode yang penggunaannya berupa *open source* yang dikembangkan melalui sistem *SPHysics* oleh peneliti-peneliti dari beberapa universitas dunia, seperti *The University of Manchester* (Inggris), *Università degli studi di Parma* (Italia) dan *Universidade de Vigo* (Spanyol). Pada simulasi pemodelan numerik digunakan metode *SPH* (*Smooth Particle Hydrodynamics*) dengan bahasa komputasi yang digunakan adalah C++ dan *Compute Unified Device Architecture* (CUDA). (Monaghan, et al., 2005) menjelaskan persamaan yang digunakan dalam metode SPH adalah persamaan integral interpolan, yaitu :

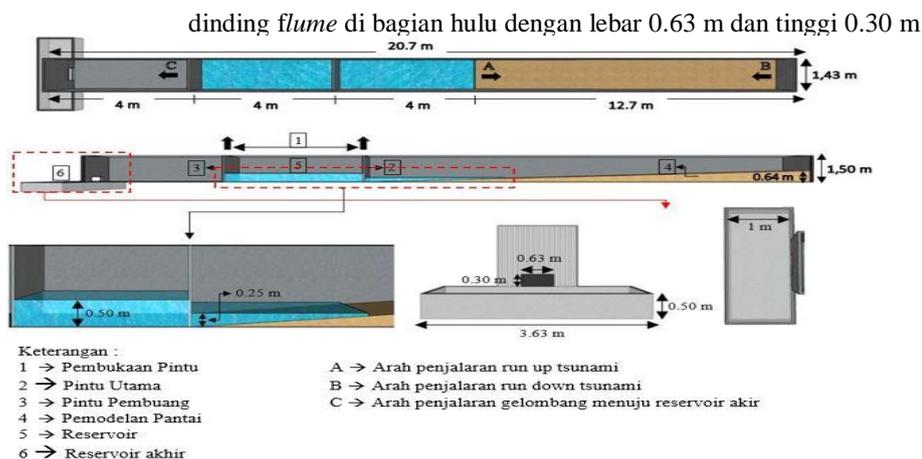
$$A(r) = \int A(r') W(r - r', h) dr'$$

Diketahui, h merupakan *smoothing length* dan $W(r - r', h)$ adalah *weighting function* atau fungsi kernel, dr' merupakan volume elemen diferensial serta A fungsi delta interpolan kernel. Pada simulasi numerik *DualSPHysics* menggunakan sejumlah partikel sebagai susunan suatu objek penelitiannya. Simulasi numerik *DualSPHysics* memiliki keterbatasan dalam waktu komputasinya, dimana semakin kecil ukuran partikel yang digunakan, keakuratan pada simulasi semakin tinggi, tetapi waktu dalam proses *running* simulasi semakin lama. *Bore* merupakan bagian dari depan gelombang *tsunami* yang curam, bergolak, dan bergerak cepat (UNESCO, 2016). (H. H. Yeh et al., 1989) menjelaskan bagian depan gelombang *bore* biasanya dianggap sebagai kondisi lompatan, yaitu kekekalan massa dan momentum pada diskontinuitas matematis. Pada penjalarnya, gelombang *bore* bertransisi menjadi *run-up* hingga gelombang pecah saat digaris pantai dan menjalar menuju daratan pemukiman. Transisi dari *bore* ke *run up* dijelaskan oleh proses “pertukaran momentum” antara *bore tsunami* dan badan air berbentuk desakan kecil di sepanjang pantai. Bagian depan *bore* itu sendiri tidak mencapai garis pantai secara langsung, tetapi massa *bore* yang besar mendorong air yang diam di depannya (H. H. Yeh, 1991).



Gambar 3. Proses transisi dari *bore* menjadi *run up*. Nilai *Froude*, $F=1.43$, (H. H. Yeh, 1991) Penelitian ini dilakukan melalui rangkaian simulasi numerik dengan menggunakan sistem *DualSPHysics*. Pada penelitian ini pun digunakan 2 metode yang dijalankan, yaitu menggunakan rancangan pemodelan *flume* yang mengadopsi rancangan *flume* penelitian *dambreak* yang telah dilakukan oleh Kuswandi, *et al.*, (2017) dan *flume* penelitian *wavemaker* Tonkin, *et al.*, (2003). **Dambreak**

Rancangan pemodelan dilakukan menggunakan saluran terbuka dengan panjang 20.7 m, lebar 1.43 m dan tinggi 1.5 m. Pemodelan pantai atau *slope* pun dibuat sebagai model daratan, kemiringan yang digunakan pada *slope* adalah 1:20 dengan panjang 12.70 m, lebar 1.43 m tinggi 0.64 m. Mekanisme pembangkitan tsunami yang disimulasikan dengan metode *dambreak* melalui pengangkatan 2 pintu yang melepaskan kolom air ke arah hulu dan hilir pintu, (Gambar 4). Gelombang yang terbentuk dan menjaral ke sisi hulu akan di keluarkan melalui lubang pada



Penelitian pada simulasi ini menggunakan susunan partikel berukuran 7.5 mm. Banyak partikel yang digunakan pada simulasi *dambreak* yang membentuk susunan *boundary* dan fluida berjumlah 24.638.764 partikel. Total durasi yang diperlukan pada simulasi dalam pembentukan *bore* tsunami adalah 153.6 jam atau 6.4 hari. Adapun jumlah partikel melalui hasil proses *running* data melalui simulasi menggunakan metode *dambreak* menggunakan sistem komputasi pemrograman *DualSPHysics* dapat dilihat pada tabel 1.

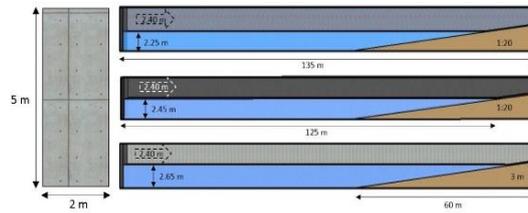
Tabel 1. Hasil *running* simulasi *wavemaker*

Ukuran Partikel (m)	Ketinggian air (m)		Jumlah partikel	Durasi Simulasi (jam)	Durasi Simulasi (hari)
	d_0	d_3			
0.0075	0.5	0.25	24,638,764	153.6	6 hari

Wavemaker

Pemodelan simulasi dilakukan menggunakan saluran terbuka dengan panjang 135 m x 2 m x 5 m. Pemodelan pantai atau *slope* juga dibuat pada simulasi *wavemaker* sebagai bentuk dari pemodelan daratan, kemiringan yang digunakan pada *slope* adalah 1:20 dengan panjang 60 m, lebar 2 m dan tinggi 3 m. Mekanisme pembangkitan tsunami yang disimulasikan dengan metode *wavemaker* melalui dorongan papan pendorong setebal 20 cm dan tinggi 5 m. yang mendorong kolom air dengan bantuan piston sejauh 2.4 m. Penelitian simulasi *wavemaker* menggunakan

3 ketinggian air yang berbeda, (Gambar 5) yaitu, 2.25 m, 2.45 m, dan 2.65 m. Ketiga ketinggian air yang berbeda dimaksudkan untuk memperhatikan jauhnya penjarangan *run up* setelah gelombang *bore* terbentuk dan melihat lokasi pecahnya gelombang pada masing-masing ketinggian air.



Gambar 5. Rancangan simulasi *wavemaker*

Simulasi dengan metode *wavemaker* menggunakan susunan partikel berukuran 4 cm. Banyaknya partikel dan durasi yang dibutuhkan berbeda-beda, seperti pada tabel 2, sesuai dengan ketinggian air pada masing-masing simulasi. Ketinggian air yang berbeda pada simulasi *wavemaker* dilakukan untuk mengetahui tinggi maksimum gelombang yang dibentuk pada masing-masing ketinggian sebelum akhirnya pecah dan membentuk gelombang *bore* tsunami saat mendekati pantai.

Tabel 2. Hasil *running* simulasi *wavemaker*

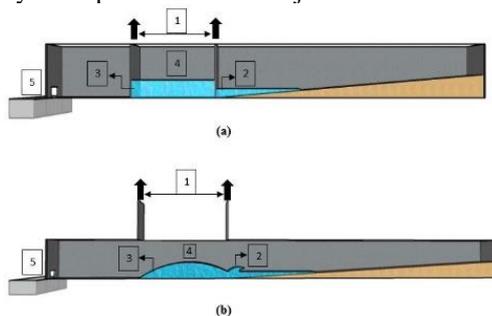
Ukuran Partikel (m)	Tinggi air (m)	Jumlah partikel	Durasi Simulasi (jam)	Durasi Simulasi (hari)
0.04	2.25	7,593,103	132	5.5 hari
	2.45	8,326,388	153.6	6.4 hari
	2.65	9,081,429	175.2	7.3 hari

Sistem komputasi pada simulasi dengan metode *wavemaker* dan *dambreak* menggunakan GPU (*Graphic Processing Unit*). *Hardware* yang digunakan untuk mendukung kedua pemodelan simulasi adalah komputer dengan spesifikasi yang tinggi. Adapun spesifikasi komputer yang dimaksudkan adalah; Prosesor intel core i7, 3820 CPU@ 360 GHz, memory RAM 16 GB, VGA card Nvidia Gforce GTX 1070, 8 GB.

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk *bore* melalui simulasi *dambreak*

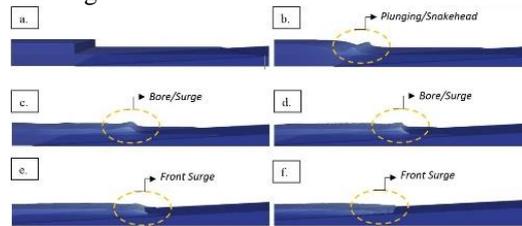
Simulasi yang dilakukan menggunakan metode *dambreak* sistem *DualSPHysics* menggambarkan pembentukan gelombang tsunami dan penjarangannya dari perairan dan menuju ke arah daratan.



Gambar 8. *Flume* pemodelan simulasi *dambreak* sistem 2 pintu

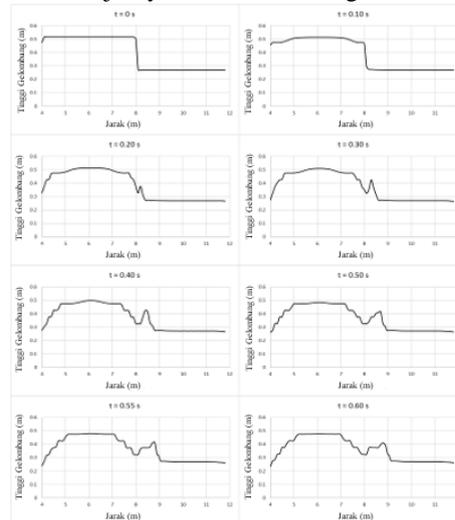
Gambar 8.a merupakan tahapan yang dilakukan dalam mempersiapkan proses simulasi menggunakan metode *dambreak* sistem 2 pintu melalui sistem pemrograman komputasi *DualSPHysics*. Gambar 8.b memperlihatkan adanya reaksi yang dihasilkan dari air yang berada pada *reservoir* dan genangan yang berada di depannya ketika kedua pintu *dambreak* dibuka secara cepat dan bersamaan. Gelombang yang terbentuk pada sisi hulu kemudian melanjutkan penjarangannya menuju ke penampungan pembuang yang berfungsi menghilangkan aliran *run up* kedua yang terbentuk akibat benturan dari aliran terhadap dinding *flume* yang berada di sisi hulu jika tidak adanya penampungan pembuang aliran melewati lubang yang juga dibuat pada dinding yang berada di sisi hulu *reservoir*. Gelombang positif kemudian terbentuk dan bergerak ke arah pemodelan pantai saat kedua pintu *dambreak* dibuka

dengan cepat secara bersamaan, dan mendorong genangan air yang berada didepannya membentuk gelombang *plunging* membentuk lonjakan gelombang.



Gambar 6. Simulasi bentuk *bore* penjalaran tsunami ke arah daratan

Gambar 6.a. dan 6.b. memperlihatkan adanya perubahan bentuk gelombang saat mulai mendekati daerah pantai. Gelombang *bore* (Gambar 6.c.) terbentuk ketika gelombang tsunami pecah, mendorong air didepannya membentuk *surge*. Gelombang *bore* bergerak dengan cepat menuju pemodelan pantai di atas model perairan dengan sifat bentuk gelombang yang dihasilkan memiliki turbulen (Gambar 6.d.). Perubahan bentuk gelombang yang mendekati pantai berubah seiring dengan kecepatan maksimum yang dimiliki gelombang dan berada pada ujung gelombang yang lebih dangkal, (Gambar 6.e. dan Gambar 6.f.). Peningkatan ketinggian maksimum gelombang pada simulasi *dambreak* sampai akhirnya pecah kemudian membentuk gelombang *bore* tsunami dipengaruhi oleh adanya perbedaan antara elevasi pada pusat pembangkitan gelombang tunggal terhadap kemiringan pemodelan pantai yang dibuat pada simulasi metode *dambreak*. Selanjutnya membentuk *surge* ketika sampai di atas daratan.

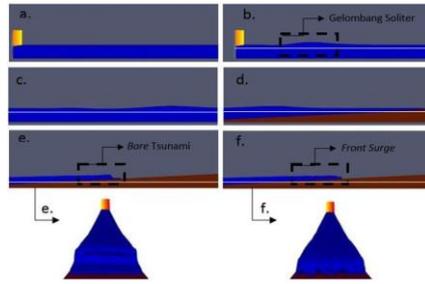


Gambar 7. Grafik pembentukan gelombang tsunami hingga membentuk gelombang *bore*

Ketika kedua pintu *dambreak* dibuka dengan cepat secara bersamaan, maka air yang berada pada *reservoir* akan pecah dan membentuk *plunging/snakehead* pada kolom air yang berada di sisi hilir *reservoir* (Gambar 7 $t = 0.20$ s). Gelombang kemudian menjalar menuju ke arah pantai dengan gelombang yang meningkat sampai dengan batas ketinggian maksimum gelombang (Gambar 7 $t = 0.50$ s). Gambar 7 ($t = 0.55$ s) adalah titik pecahnya gelombang *tsunami* yang sebelumnya terbentuk dan menjalar dengan peningkatan gelombangnya mencapai ketinggian maksimum. Setelah gelombang *tsunami* pecah, selanjutnya gelombang *bore* kemudian terbentuk pada daerah pantai di atas kolom air kecil di depan yang letaknya berada di daerah pantai, (Gambar 7 $t = 0.60$ s). Gelombang *bore* yang terbentuk tidak mencapai garis pantai secara langsung, tetapi massa *bore* yang besar kemudian mendorong genangan air kecil yang awalnya diam dan berada tepat di depannya.

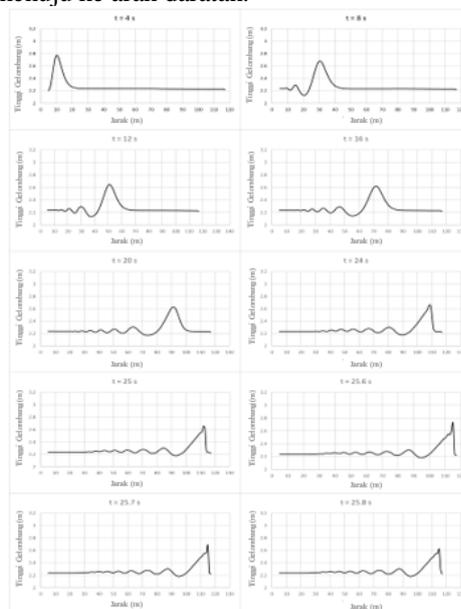
Bentuk *bore* melalui simulasi *wavemaker*

Melalui rangkaian simulasi *dambreak* maupun *wavemaker*, sebelum gelombang *bore* terbentuk oleh *tsunami* maka yang paling awal yaitu terbentuknya sebuah gelombang panjang berbentuk tunggal yang dinamakan juga sebagai gelombang soliter. Simulasi numerik menggunakan program *DualSPHysics* juga dilakukan dalam hal mengamati pembentukan gelombang *bore tsunami* menggunakan metode *wavemaker*.



Gambar 8. Pembentukan *bore* yang gelombang soliter menggunakan metode *wavemaker*.

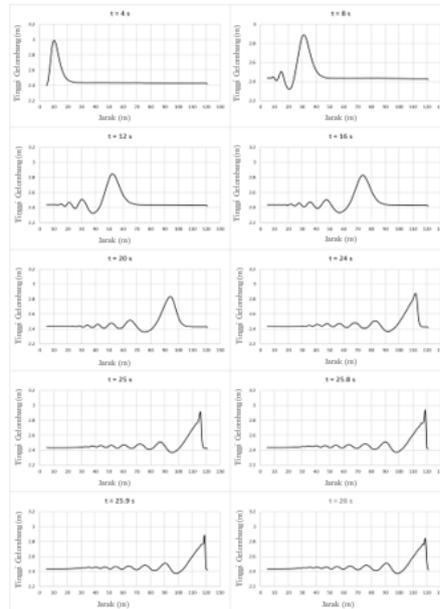
Pembentukan gelombang *bore tsunami* yang terjadi pada simulasi menggunakan metode *wavemaker* dengan sistem program *DualSPHysics* dapat dilihat pada (Gambar 8). Pada (Gambar 8.a) ketika kolom air yang semula diam dengan sebuah papan pendorong yang berada di belakangnya. (Gambar 8.b) memperlihatkan gelombang soliter mulai terbentuk saat ada dorongan yang dilakukan oleh papan pendorong sejauh 2.4 meter. (Gambar 8.c) menunjukkan gelombang soliter mulai menjalar menuju ke arah daratan. (Gambar 8.d) gelombang soliter mulai memasuki daerah daratan, diketahui tinggi gelombang *tsunami* meningkat ketika menuju ke daratan, hal ini terjadi seiring dengan adanya perbedaan elevasi antara perairan dalam dengan perairan dangkal. (Gambar 8.e) saat gelombang *tsunami* telah mencapai ketinggian maksimum maka gelombang tersebut akan pecah kemudian membentuk *bore tsunami* yang selanjutnya membentuk *run up* oleh adanya perubahan momentum antara *bore tsunami* dan badan air membentuk sebuah desakan di sepanjang pantai. Bagian depan yang terdapat pada *bore* sendiri tidak mencapai garis pantai secara langsung, tetapi adanya massa dari gelombang *bore* yang besar mendorong air kecil yang berada didepannya yang semula diam. Pada (Gambar 8.f) *surge* juga mulai terbentuk ketika gelombang *tsunami* dengan ketinggian maksimum pecah dan memasuki daratan dimana kekuatan terbesar pada *surge* berada di ujung depan gelombang (*front surge*). *Bore tsunami* yang terbentuk selanjutnya akan bertransisi menjadi sebuah bentuk berupa gelombang *run up* seiring dengan adanya pertukaran momentum yang terjadi selama penjalaran gelombang terhadap permukaan pantai/daratan. Proses terjadinya *run up* diakibatkan juga karena adanya perbedaan ketinggian antara bagian daratan yang dibentuk melalui pemodelan pantai dengan elevasi permukaan air yang terus menjalar menuju ke arah daratan.



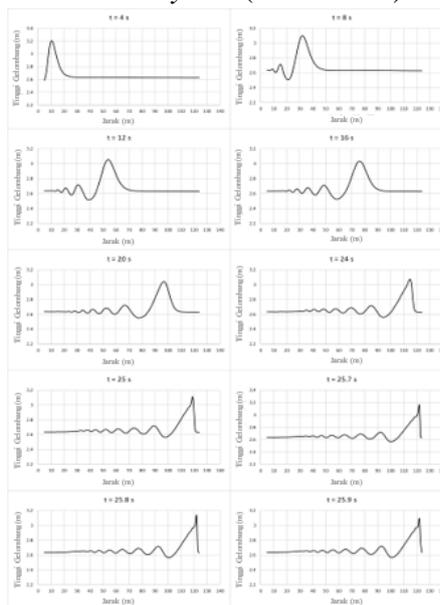
Gambar 9. Grafik simulasi gelombang *bore tsunami* metode *wavemaker* menggunakan sistem *DualSPHysics* ($h = 2.25$ m).

Ketika gelombang mendekati daratan bentuk gelombang *tsunami* menjadi posisi tegak (Gambar 9 $t = 25$ s) hingga ketinggian maksimum seiring adanya perbedaan elevasi antara perairan pada lepas pantai sampai menuju ke arah daratan atau garis pantai (Gambar 9 $t = 25.6$ s). Setelah gelombang *tsunami* mencapai ketinggian maksimum gelombang akan pecah ketika mendekati daerah pantai (Gambar 9 $t = 25.7$ s). Pada gambar grafik 9 ($t = 26$ s) merupakan sebuah grafik gambaran gelombang *bore* yang terbentuk ketika gelombang *tsunami* pecah kemudian membentuk gelombang *bore*. Pada gambar grafik 10 proses penjalaran gelombang sama dengan gambar grafik 9 didorong oleh pembangkit gelombang sejauh 2.4 m. Pada grafik 10 digunakan sebuah pemodelan dengan ketinggian

air mencapai 2.45 m. Gambar grafik 10 ($t = 25.8$ s) merupakan ketinggian maksimum gelombang yang terbentuk saat mendekati daratan sebelum pecah. Gambar 10 ($t = 25.9$ s) adalah waktu sekaligus posisi saat pecahnya gelombang setelah mencapai ketinggian maksimum.



Gambar 10. Grafik simulasi gelombang *bore tsunami* metode *wavemaker* menggunakan sistem *DualSPHysics* ($h = 2.45$ m).



Gambar 11. Grafik simulasi gelombang *bore tsunami* metode *wavemaker* menggunakan sistem *DualSPHysics* ($h = 2.65$ m).

Dalam gambar grafik 10 ($t = 25.8$ s) merupakan ketinggian maksimum gelombang yang terbentuk saat mendekati daratan sebelum pecah. Pada gambar 10 dapat dilihat ($t = 25.9$ s) merupakan waktu sekaligus posisi yang menunjukkan keadaan yang terjadi saat pecahnya gelombang setelah mencapai ketinggian maksimum. Dalam gambar grafik 10 ($t = 26$ s) diperlihatkan suatu bentuk penggambaran terbentuknya gelombang *bore* yang terjadi setelah gelombang sebelumnya pecah. Pada gambar grafik 11 Gelombang yang semakin mendekati pantai akan mencapai ketinggian maksimum (Gambar 11 $t = 25.7$ s) sebelum gelombang akhirnya pecah (Gambar 11 $t = 25.8$ s). Gelombang *bore* kemudian terbentuk akibat gelombang yang telah pecah pada saat gelombang sudah mencapai ketinggian maksimumnya (Gambar grafik 11 ($t = 25.9$ s)). Gelombang soliter yang dibangkitkan adalah hasil dorongan papan pendorong yang dibantu dengan tenaga piston sejauh 2.4 m melalui program simulasi *DualSPHysics*.

3. KESIMPULAN

Gelombang soliter dapat terbentuk akibat adanya gangguan pada kolom air seperti pembangkitan gelombang yang dibentuk secara sistem *wavemaker* maupun dengan metode *dambreak*. Gelombang soliter kemudian pecah di daerah perairan pantai dan selanjutnya membentuk gelombang *bore*. Aliran *run up* yang dihasilkan oleh metode *dambreak* sistem 2 pintu mirip dengan *run up* yang dihasilkan dengan metode *wavemaker*. Tinggi gelombang pada awal pembentukan akan terus meningkat ketinggiannya sampai mendekati garis pantai akibat adanya perbedaan elevasi antara titik pusat pembangkitan gelombang soliter di laut lepas sampai ke garis pantai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1.] (JMA), J.M.A., 2011. Information on the 2011 Great East Japan Earthquake [WWW Document]. URL https://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html
- [2.] Kuswandi, 2017. SIMULATION OF SCOURING AROUND A VERTICAL CYLINDER DUE TO TSUNAMI. SCIENCE OF TSUNAMI HAZARDS 11.
- [3.] Monaghan, J, 2005. Smoothed Particle Hydrodynamics. Reports on Progress in Physics 68, 1703. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>
- [4.] Suppasri, A., Muhari, A., Ranasinghe, P., Mas, E., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., 2012. Damage and reconstruction after the 2004 Indian Ocean tsunami and the 2011 Great East Japan tsunami. Journal of Natural Disaster Science 34, 19–39. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.19>
- [5.] Tonkin, 2001. Tsunami-Induced Scour around a Vertical Cylinder: an Effective Stress Approach. University of Washington.
- [6.] UNESCO, 2016. Tsunami Glossary - International Tsunami Information Center. The Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- [7.] (USGS), U.S.G.S., 2010. Shakemap usslav [WWW Document]. URL <https://web.archive.org/web/20100302231727/http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/slav> (accessed 3.12.21)
- [8.] Yeh, H.H., 1991. Tsunami bore runup, in: Tsunami Hazard. Springer, pp. 209–220.
- [9.] Yeh, H.H., Ghazali, A., Marton, I., 1989. Experimental study of bore run-up. J. Fluid Mech. 206, 563–578. <https://doi.org/10.1017/S002211208900241>.