

Implementasi Staggered Grid Pada Persamaan Air Dangkal Untuk Simulasi Gelombang Tsunami Akibat Longsor Bawah Laut

Arkan Priya Anggana Hadna¹, Didit Adytia², Dede Tarwidi³

^{1,2,3}Fakultas Informatika, Universitas Telkom, Bandung

¹anggahadna@students.telkomuniversity.ac.id, ²adytia@telkomuniversity.ac.id,

³dedetarwidi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Gelombang tsunami tidak hanya ditimbulkan oleh adanya gempa bumi atau letusan gunung berapi bawah laut tetapi juga dapat diakibatkan oleh adanya longsor bawah laut. Makalah ini memfokuskan pada simulasi numerik gelombang tsunami yang dipicu oleh longsor bawah laut. Persamaan gerak untuk gelombang air direpresentasikan oleh persamaan air dangkal. Sedangkan untuk longsor bawah laut dimodelkan dengan cara menurunkan persamaan gerak benda padat yang meluncur pada bidang miring. Solusi dari persamaan air dangkal dicari secara numerik dengan mengimplementasikan metode volume hingga skema staggered grid. Solusi dari persamaan air dangkal yang diselesaikan dengan metode staggered grid kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen kasus run-up yang telah dilakukan oleh (Synolakis, 1986). Hasil simulasi numerik gelombang tsunami yang diakibatkan oleh kemunculan longsor bawah laut menunjukkan kecocokan yang cukup tinggi dengan hasil simulasi yang telah dilakukan oleh (Lynet & Liu, 2002) dengan menggunakan metode boundary integral equation model (BIEM).

Kata kunci : longsor bawah laut, persamaan air dangkal, simulasi numerik, staggered grid, tsunami

Abstract

Tsunami wave is not only caused by an earthquake or underwater volcanic eruption but can also be caused by an underwater landslide. This paper focuses on the numerical simulation of tsunami waves triggered by an underwater landslide. The equation of motion for water waves is represented by shallow water equations. Meanwhile, underwater landslide is modeled by deriving the equation of motion of a solid object that slide down on the sloping bottom. Solution of shallow water equations is numerically determined by implementing finite volume method with staggered grid scheme. The solution of shallow water equation which is solved by the staggered grid method is validated with experimental results for run-up case that have been performed by (Synolakis, 1986). Numerical results of tsunami simulation show a good agreement with the simulation results presented by (Lynet & Liu, 2002) which used the boundary integral equation model (BIEM) method.

Keywords: numerical simulation, shallow water equation, staggered grid, tsunami, underwater landslide

1. Pendahuluan

Secara umum gelombang tsunami dapat disebabkan oleh gempa bumi atau letusan gunung berapi bawah laut. Akan tetapi, dalam beberapa kasus tsunami, longsor bawah laut merupakan salah satu penyebab dari gelombang tersebut. Pada awalnya, penelitian mengenai longsor bawah laut kurang mendapat perhatian dari para peneliti karena pada umumnya penyebab dari tsunami akan dianggap berasal dari aktivitas seismik (Dutykh, 2011). Namun, beberapa dekade terakhir telah diketahui bahwa longsor bawah laut dapat menimbulkan bahaya dan bahkan dapat memicu terjadinya tsunami dengan skala yang besar, sehingga telah dilakukan beberapa penelitian mengenai hal tersebut.

Pada 16 Oktober 1979, tsunami akibat longsor bawah laut terjadi di dekat bandara internasional Nice, Perancis. Tsunami ini bukan berasal dari aktivitas seismik, namun penyebab sebenarnya dari tsunami ini masih menjadi perdebatan. Salah satu dugaan penyebab terjadinya tsunami tersebut adalah tidak stabilnya sedimen di daerah sekitar terjadinya longsor bawah laut (Pelinovsky et al., 2002).

Longsor bawah laut sendiri dapat terjadi karena dipicu oleh beberapa faktor. Sedimen yang menjorok ke laut dengan kepadatan yang tidak terlalu tinggi biasanya berpotensi untuk terjadinya longsor bawah laut (Harbitz et al., 2014). Ketika ombak datang, air laut menabrak sedimen tersebut. Sebaliknya ketika ombak kembali ke laut, air menarik sedimen ke arah laut. Hal ini terus terjadi dan dikhawatirkan akan membuat kepadatan sedimen semakin berkurang dan beresiko terjadi longsor bawah laut.

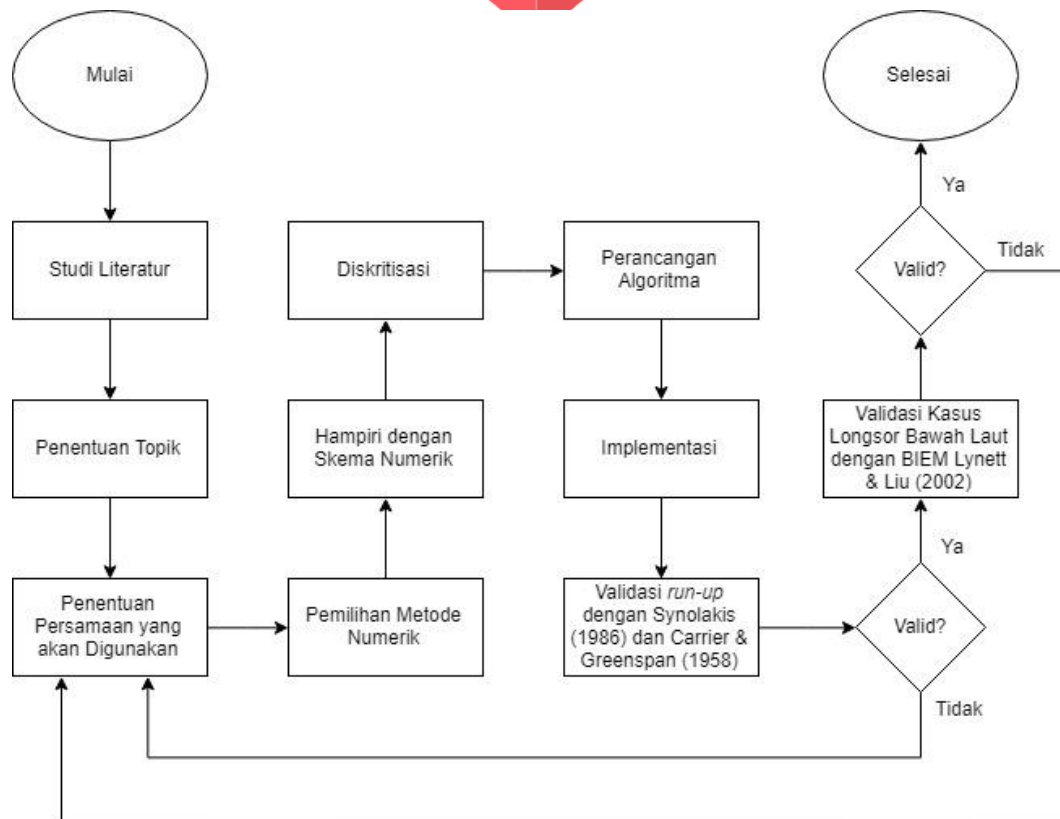
Di Indonesia, tsunami akibat longsor bawah laut sendiri pernah beberapa kali terjadi. Salah satu peristiwa tersebut adalah tsunami di Flores pada tahun 1992. Gempa berkekuatan 7,7 skala Richter pada akhirnya menimbulkan gelombang tsunami hingga setinggi 25 meter dan memakan sekitar 2.200 korban jiwa (Rynn,

2002). Gelombang tsunami tersebut sebenarnya dipicu oleh longsor bawah laut yang terjadi akibat gempa (Tsuji et al., 1995).

Salah satu metode untuk memahami fenomena tsunami yang disebabkan oleh longsor bawah laut adalah dengan pemodelan matematika yang dilanjutkan dengan simulasi komputer. Akan tetapi, proses tsunami longsor bawah laut sendiri tidak mudah dimodelkan. Hal itu dikarenakan adanya interaksi antara struktur dasar laut yang bergerak dengan gelombang air laut. Oleh karena itu, pemilihan model gelombang air dan implementasi numerik yang tepat perlu dilakukan.

Penelitian mengenai pemodelan tsunami akibat longsor bawah laut telah banyak dilakukan. Hammack (1972) telah melakukan eksperimen mengenai beberapa pergerakan dasar laut, salah satunya adalah longsor. Di samping eksperimen, Hammack juga melakukan simulasi pergerakan dasar laut secara teoritis. Lynett & Liu (2002) mensimulasikan gelombang tsunami akibat longsor bawah laut menggunakan model Boussinesq dengan metode beda hingga orde tinggi. Model ini kemudian diperbarui oleh Fuhrman & Madsen (2009).

Makalah ini memfokuskan pada simulasi gelombang tsunami yang diakibatkan oleh longsor bawah laut. Disini, pergerakan air dimodelkan dengan persamaan air dangkal. Solusi dari persamaan air dangkal diselesaikan secara numerik menggunakan metode *staggered grid* yang telah diusulkan oleh Stelling & Duijnmeijer (2003) dan Adytia et al. (2018). Solusi numerik ini kemudian akan divalidasi dengan data eksperimen kasus *run-up* yang diperoleh dari Synolakis (1986) dan Carrier & Greenspan (1958). Model persamaan air dangkal dengan solusi numerik *staggered grid* dibahas secara singkat pada Bagian 3. Selanjutnya, simulasi numerik gelombang tsunami yang diakibatkan longsor bawah laut akan dibahas pada Bagian 4.



Gambar 1. Diagram sistem.

2. Persamaan Air Dangkal

Persamaan air dangkal merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk memodelkan fluida dinamis pada laut, daerah pesisir, muara sungai, atau semacamnya. Sifat dari persamaan air dangkal adalah dimensi vertikal (kedalaman) jauh lebih kecil dibandingkan dengan dimensi horizontal. Pada kasus yang dimodelkan oleh persamaan air dangkal, fluida diasumsikan merupakan fluida ideal, yaitu bersifat *inviscid*, *incompressible*, dan *irrotational*.

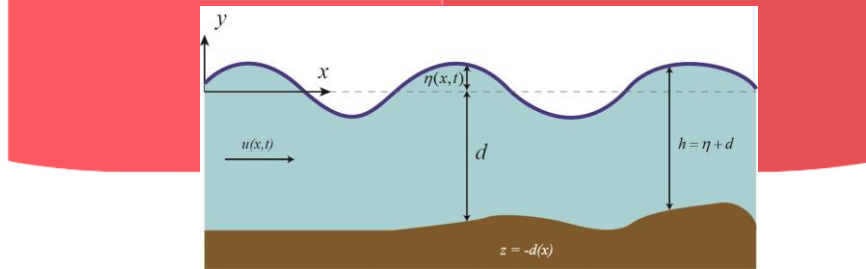
Misalkan $\eta(x, t)$ adalah ketinggian permukaan air pada posisi x pada waktu t yang diukur dari permukaan air tenang, lihat Gambar 2. Misalkan $d(x, t)$ adalah topografi bawah laut dan $h(x, t) = \eta(x, t) + d(x, t)$

didefinisikan sebagai total kedalaman. Selanjutnya, $u(x,t)$ adalah kecepatan air dalam arah komponen horizontal. Persamaan air dangkal satu dimensi diberikan oleh

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + c_f \frac{u|u|}{h} = 0 \quad (2)$$

dengan g dan c_f berturut-turut adalah percepatan gravitasi dan koefisien gesek. Dalam dinamika fluida, persamaan (1) biasa disebut dengan persamaan kontinuitas, sedangkan persamaan (2) disebut persamaan momentum.



Gambar 2. Ilustrasi gelombang air dan notasi-notasi pada persamaan air dangkal satu dimensi.

Untuk longsor bawah laut, topografi $d(x,t)$ akan berubah terhadap waktu. Karena $h(x,t) = \eta(x,t) + d(x,t)$, maka persamaan (1) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

3. Metode Numerik

Nilai pada persamaan *shallow water* di atas akan dihipotesiskan dengan metode volume hingga dengan skema *staggered grid*. Skema ini menempatkan nilai hampiran η pada persamaan (1) pada *grid* penuh x_{i+1} , sedangkan nilai u pada persamaan (2) akan ditempatkan pada *grid* tengahan $x_{i+1/2}$.

Hampiran dari persamaan (1) digunakan metode volume hingga dan dideskripsikan sebagai berikut.

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} + \frac{{}^*h_{i+1/2}^n u_{i+1/2}^n - {}^*h_{i-1/2}^n u_{i-1/2}^n}{\Delta x} = 0 \quad (4)$$

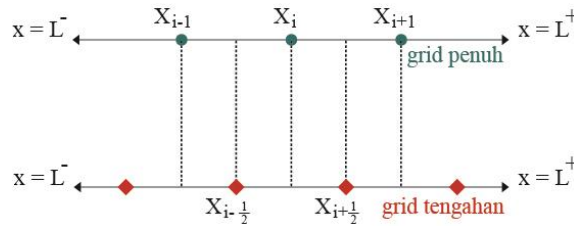
Pada persamaan (4), nilai dari *h tidak terdefinisi. Nilai dari *h dapat dihipotesiskan dengan menggunakan metode *upwind*.

$${}^*h_{i+1/2} = \begin{cases} h_i, & \text{jika } u_{i+1/2} \geq 0 \\ h_{i+1}, & \text{jika } u_{i+1/2} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Kondisi pada (5) menjelaskan bahwa jika gelombang bergerak ke arah kanan atau $u_{i+1/2} \geq 0$, maka nilai ${}^*h_{i+1/2}$ bisa didapat dari h_i . Sebaliknya, jika gelombang bergerak ke arah kiri atau $u_{i+1/2} < 0$, maka nilai ${}^*h_{i+1/2}$ bisa didapat dari h_{i+1} .

Berdasarkan persamaan (3) dan diskritisasi pada persamaan (4), maka untuk mencari nilai η_i pada kasus *bottom motion* dapat ditulis sebagai berikut.

$$\eta_i^{n+1} = \eta_i^n - \Delta t \left(\frac{{}^*h_{i+1/2}^n u_{i+1/2}^n - {}^*h_{i-1/2}^n u_{i-1/2}^n}{\Delta x} \right) - (d_i^{n+1} - d_i^n) \quad (6)$$



Gambar 3. Ilustrasi skema *staggered grid*. Titik dengan gambar lingkaran (atas) melambangkan nilai pada grid penuh, sedangkan titik dengan gambar trapesium (bawah) melambangkan nilai pada grid tengahan.

Hampiran pada persamaan momentum (2) dapat ditulis seperti pada persamaan di bawah.

$$\frac{u_{i+1/2}^{n+1} - u_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta t} + (uu_x)_{i+1/2}^n + g \frac{\eta_{i+1}^n - \eta_i^{n+1}}{\Delta x} + c_f \frac{u |u|}{h} \Big|_{i+1/2}^n = 0 \tag{7}$$

Nonlinear friction term pada (7) dapat dihipotesis seperti bentuk di bawah.

$$c_f \frac{u |u|}{h} \Big|_{i+1/2}^n \approx c_f \frac{|u_{i+1/2}^n| u_{i+1/2}^{n+1}}{\bar{h}_{i+1/2}^n} \tag{8}$$

Pada kasus ini, Nilai dari koefisien c_f adalah 0 karena *bottom motion* dianggap licin sehingga gesekan dapat diabaikan. Selanjutnya, nilai dari \bar{h} pada persamaan (8) didapat dari persamaan berikut.

$$\bar{h}_{i+1/2}^n = \frac{1}{2} (h_i^n + h_{i+1}^n) \tag{9}$$

Pada persamaan (2), bentuk uu_x disebut sebagai *advection term*. Penjabaran nilai dari *advection term* adalah sebagai berikut.

$$uu_x = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(qu)}{\partial x} - u \frac{\partial q}{\partial x} \right) \tag{10}$$

Momentum horizontal dilambangkan dengan $q = hu$. Karena rata-rata kedalaman air $\bar{h}_{i+1/2}$ diasumsikan selalu bernilai positif, maka persamaan (10) dapat dihipotesis dengan persamaan berikut.

$$(uu_x)_{i+1/2} = \frac{1}{\bar{h}_{i+1/2}} \left(\frac{\bar{q}_{i+1}^* u_{i+1}^* - \bar{q}_i^* u_i^*}{\Delta x} - u_{i+1/2} \frac{\bar{q}_{i+1} - \bar{q}_i}{\Delta x} \right) \tag{11}$$

dengan,

$$\bar{h}_{i+1/2} = \frac{1}{2} (h_i + h_{i+1}) \tag{12}$$

$$\bar{q}_i = \frac{1}{2} (q_{i+1/2} + q_{i-1/2}) \tag{13}$$

$$q_{i+1/2}^* = \bar{h}_{i+1/2}^* u_{i+1/2} \tag{14}$$

Kecepatan horizontal fluida berada pada grid tengahan ($u_{i+1/2}$ atau $u_{i-1/2}$) sehingga nilai *u_i yang berada pada *full grid* harus diaproksimasi dengan nilai berikut.

$$^*u_i = \begin{cases} u_{i-1/2}, & \text{jika } \bar{q}_i \geq 0 \\ u_{i+1/2}, & \text{jika } \bar{q}_i < 0 \end{cases} \tag{15}$$

Untuk aliran fluida dengan \bar{q} bernilai positif maka *advection term* diaproksimasi dengan persamaan berikut.

$$\frac{\bar{q}_i}{h_{i+1/2}} \left(\frac{u_{i+1/2} - u_{i-1/2}}{\Delta x} \right) = \frac{h_i u_{i+1/2} + h_{i+1} u_{i-1/2}}{h_i + h_{i+1}} \left(\frac{u_{i+1/2} - u_{i-1/2}}{\Delta x} \right) \quad (16)$$

Secara umum dapat disimpulkan bahwa persamaan (4) hingga (6) digunakan untuk mengaproksimasi nilai dari persamaan kontinuitas, sedangkan persamaan (7) hingga (16) digunakan untuk mengaproksimasi nilai dari persamaan momentum.

4. Hasil dan Diskusi

Pada bagian ini akan diberikan hasil numerik dari persamaan air dangkal yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Untuk menguji akurasi dan konsistensi dari implementasi numerik yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, terdapat dua kasus yang akan diselesaikan dengan persamaan air dangkal berskema *staggered grid*, yaitu kasus *run-up* yang dilakukan oleh Carrier & Greenspan (1958), Synolakis (1986), dan kasus longsor bawah laut.

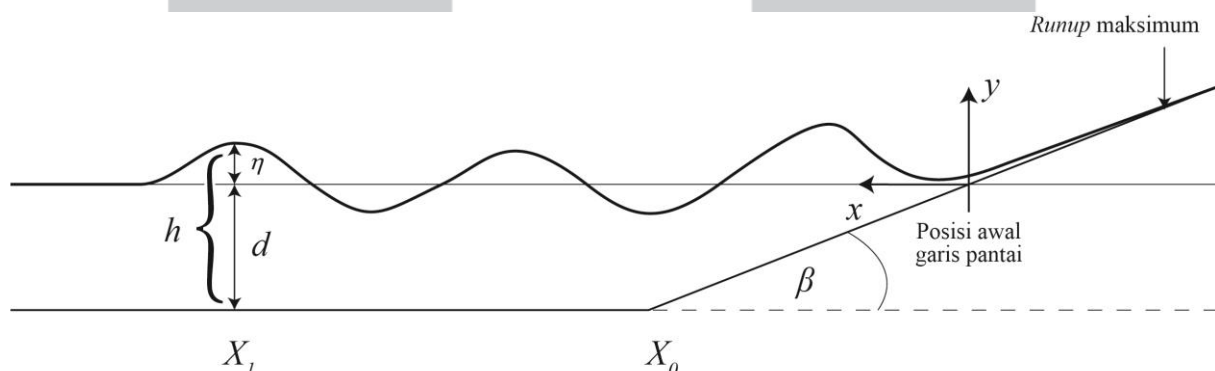
Kasus *run-up* perlu dilakukan validasi. Hal ini dikarenakan pada kasus tsunami akibat longsor bawah laut terjadi juga *run-up* gelombang pada pesisir sehingga validasi perlu dilakukan pada kasus ini.

4.1 Run-up Carrier & Greenspan

Selanjutnya, untuk menguji tingkat akurasi dari persamaan air dangkal dengan skema *staggered grid* digunakan validasi dengan hasil analitik pada kasus *run-up* pantai yang dilakukan oleh Carrier & Greenspan (1958). Gelombang sinusoidal dibangkitkan dengan tinggi 0,006 m. Bidang pantai memiliki kemiringan dengan nilai 1/25. Kedalaman maksimum h_0 adalah 0,5 m. Untuk proses komputasi, digunakan $\Delta x = 0,04$ m dan $\Delta t = 0,05$ s. Nilai diskritisasi waktu ini dipilih agar kedalaman tidak bernilai negatif di seluruh domain (Stelling & Zijlema, 2010).

Pada Gambar 6, dapat dilihat bahwa model yang diajukan pada makalah ini memiliki hasil yang baik ketika divalidasi dengan hasil analitik dari Carrier & Greenspan (1958). Simulasi pergerakan garis pantai horizontal juga mendapatkan hasil yang baik seperti pada Gambar 7.

4.2 Run-up Synolakis



Gambar 4. Simulation setup untuk kasus *run-up* Synolakis (1986)

Untuk simulasi gelombang air laut dengan kasus *run-up* Synolakis digunakan domain x [-20,15m]. Untuk domain y digunakan η [-0.8,0.8m]. Nilai koefisien CFL yang digunakan adalah 0,5. Untuk proses komputasi, digunakan $\Delta x = 0,2$ dan $\Delta t = 0,1$. Pada kasus pertama, digunakan $H/d = 0,3$. H/d merupakan tingkat kecuraman gelombang dengan H adalah tinggi gelombang dari dasar gelombang hingga permukaan air dan d adalah kedalaman air laut diukur dari permukaan air tenang. Hasil numerik dari simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

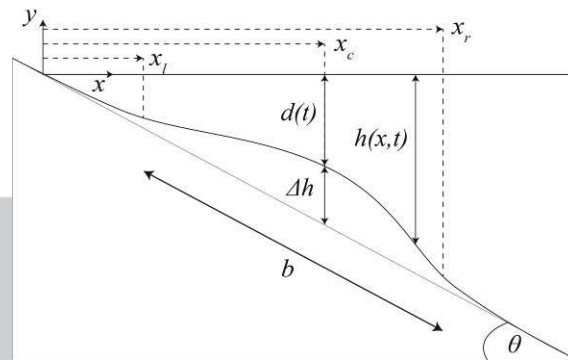
Dari Gambar 8 tersebut dapat dilihat bahwa hasil numerik dari implementasi persamaan air dangkal menggunakan skema *staggered grid* memberikan hasil yang cukup baik pada validasi kasus *run-up* Synolakis dengan $H/d = 0,3$.

Pada kasus *run-up* yang kedua, perbedaan terletak pada nilai $H/d = 0,0185$. Untuk nilai selainnya disamakan dengan kasus pertama. Hasil numerik dari simulasi pada kasus yang kedua ditampilkan pada Gambar 9. Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa hasil numerik yang diajukan pada makalah ini memiliki hasil yang baik.

Dalam Synolakis (1986), terdapat beberapa eksperimen *run-up* dengan tingkat kecuraman gelombang yang berbeda-beda. Validasi pertama kasus *run-up* Synolakis digunakan $H/d = 0,3$ karena tingkat kecuraman ini merupakan tingkat kecuraman tertinggi. Jika nilai H/d melebihi 0,3, maka gelombang akan pecah. Untuk validasi kedua digunakan $H/d = 0,0185$ karena tingkat kecuraman ini yang paling rendah pada eksperimen Synolakis.

Perbandingan secara kuantitatif ditunjukkan pada Tabel 1 untuk $H/d = 0,3$ dan Tabel 2 untuk $H/d = 0,0185$ dengan melakukan perhitungan *Root Mean Square Error (RMSE)* dan koefisien korelasi (*CorrCoef*). Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa pada saat $t = 3.1928, 4.7891, 6.3855s$ nilai error cenderung lebih besar ($RMSE > 0,05$) dibandingkan dengan dua *snapshot* setelahnya yang bernilai $RMSE < 0,012$. Hal ini disebabkan karena persamaan air dangkal tidak dapat mengakomodir sifat dispersif pada gelombang air sehingga semua gelombang bergerak dengan kecepatan yang sama. Ketika gelombang mulai terpecah, maka hasil simulasi mulai mengikuti hasil eksperimen. Sedikit berbeda dengan Tabel 1, pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa hasil simulasi menunjukkan nilai yang lebih mendekati hasil eksperimen. Nilai dari $RMSE$ pada semua *snapshot* berada di bawah 0,006 dan nilai koefisien korelasi berada di atas 0,9.

4.3 Longsor Bawah Laut



Gambar 5. *Simulation setup* untuk kasus longsor bawah laut

Pergerakan tanah di bawah laut atau disebut sebagai longsor bawah laut dapat dimodelkan sebagai gerak benda padat yang meluncur pada bidang miring. Akibat pergerakan tanah cukup besar ini dapat menimbulkan gelombang air atau tsunami yang cukup merusak. Simulasi longsor bawah laut telah disimulasikan oleh Lynett & Liu (2002) dan kemudian diperbarui oleh Fuhrman & Madsen (2009) dengan model persamaan gerak air yang berbeda. Persamaan gerak untuk longsor bawah laut yang dipaparkan di Lynett & Liu (2002) adalah

$$h(x,t) = sx - h'(x,t) \quad (17)$$

dengan $s = \tan \theta$ adalah kemiringan pantai tempat terjadinya longsor. Selanjutnya,

$$h'(x,t) = \frac{\Delta h}{4} [1 + \tanh(2(x - x_l(t) \cos \theta))] \cdot [1 - \tanh(2(x - x_r(t) \cos \theta))] \quad (18)$$

$$x_l(t) = x_c(t) - \frac{b}{2} \cos \theta, \quad x_r(t) = x_c(t) + \frac{b}{2} \cos \theta \quad (19)$$

$$x_c(t) = x_0 + S(t) \cos \theta \quad (20)$$

Di sini, x_0 merepresentasikan posisi awal x sebelum benda padat meluncur, dan

$$S(t) = S_0 \ln \left(\cosh \left(\frac{t}{t_0} \right) \right), \quad (21)$$

$$S_0 = \frac{u_t^2}{a_0} , t_0 = \frac{u_t}{a_0} \tag{22}$$

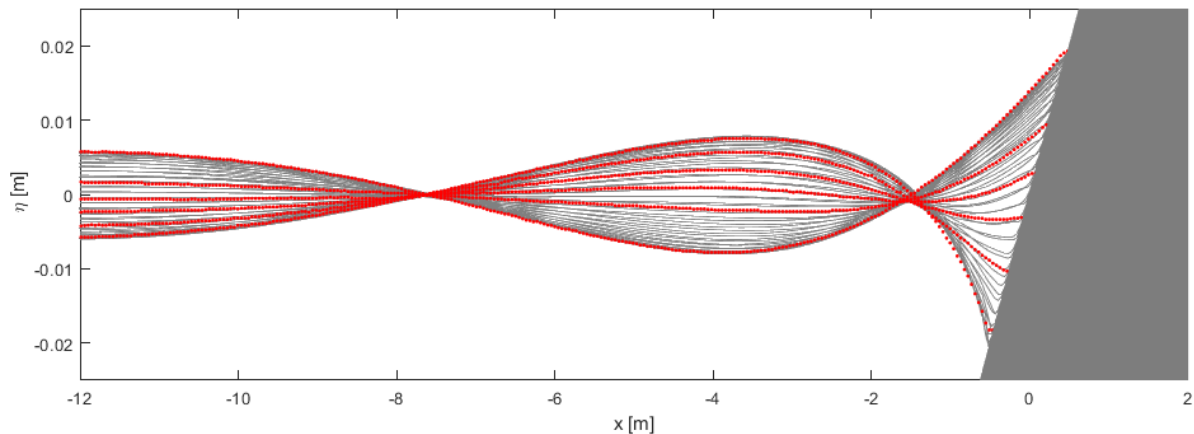
Nilai percepatan awal a_0 dan kecepatan akhir u_t dari longsor diberikan oleh

$$a_0 = g \frac{\gamma - 1}{\gamma + C_m} \sin \theta \tag{23}$$

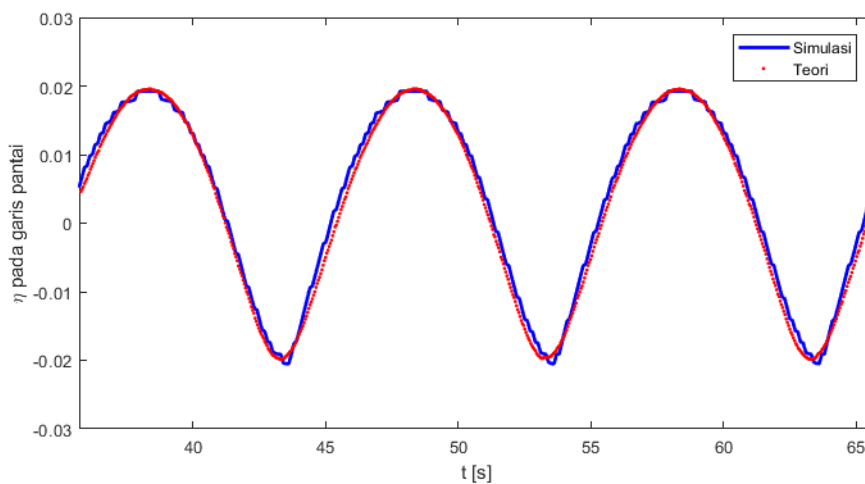
$$u_t = \sqrt{gb \frac{\pi(\gamma - 1)}{2C_d} \sin \theta} \tag{24}$$

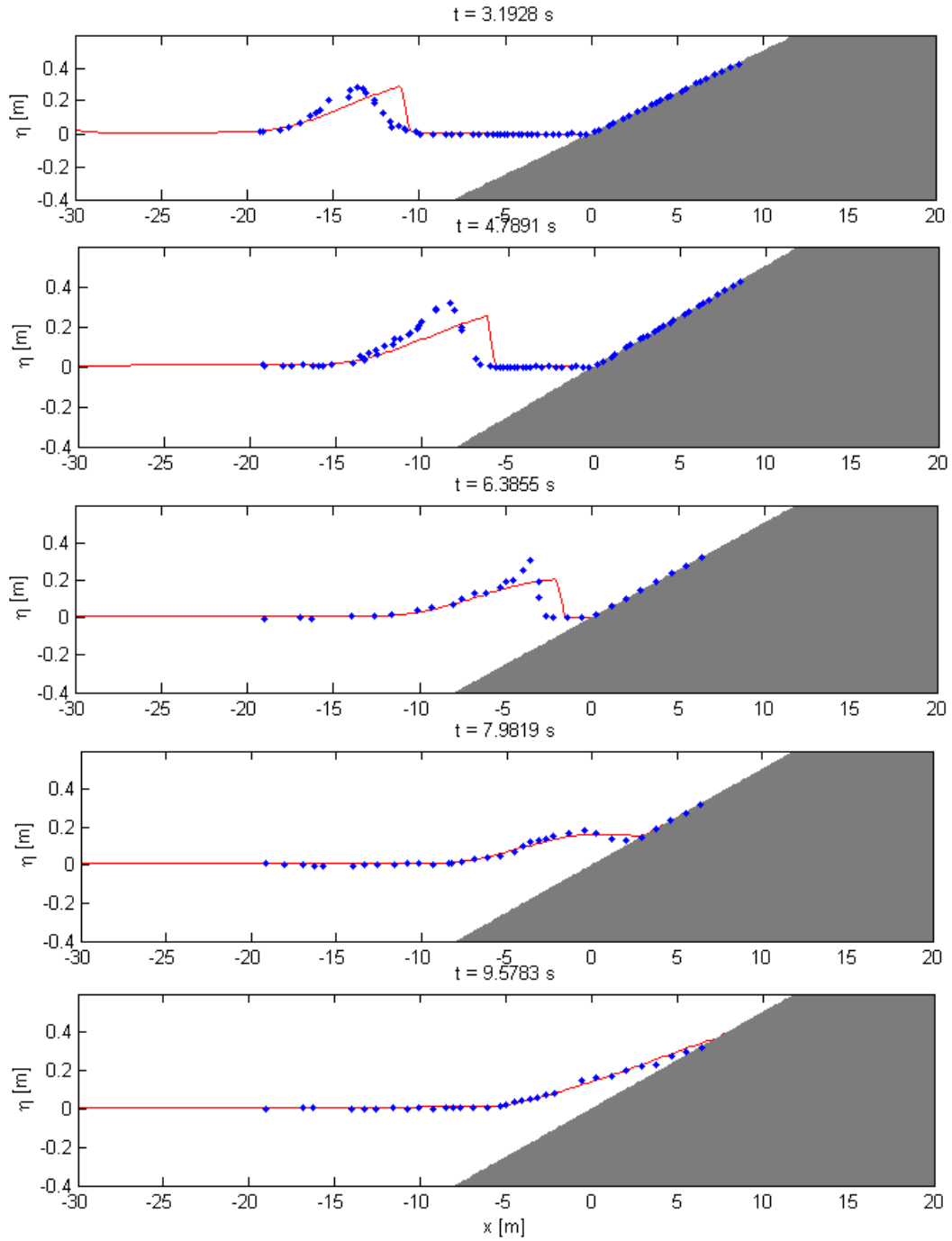
dengan γ adalah rasio antara kepadatan tanah yang longsor dengan kepadatan air. C_m merupakan nilai aproksimasi dari koefisien massa. C_d adalah nilai aproksimasi dari koefisien pergerakan tanah yang terseret ke bawah (*drag*). Notasi b digunakan untuk nilai perkiraan tinggi dari tanah yang longsor.

Parameter yang digunakan dalam simulasi ini akan disamakan dengan simulasi yang telah dilakukan oleh Lynett & Liu (2002) dan Fuhrman & Madsen (2009). Nilai dari beberapa parameter tersebut adalah $\gamma = 2$, $C_d = C_m = 1$, $b = 1 \text{ m}$, dan $\Delta h = 0,05 \text{ m}$, dan $\theta = 6^\circ$. Gambar 11 menunjukkan perubahan ketinggian permukaan air $\eta(x, t)$ yang diakibatkan oleh adanya longsor bawah laut untuk $t = 1.51, t = 3.00, t = 4.51$, dan $t = 5.86$ detik. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil simulasi dengan metode staggered grid memiliki kecocokan cukup tinggi dengan hasil simulasi yang telah dilakukan oleh Lynett & Liu (2002). Perhitungan



Gambar 6.. Ketinggian permukaan air hasil simulasi dibandingkan dengan solusi analitik kasus *run-up* gelombang periodik untuk pantai datar (Carrier & Greenspan, 1958). Hasil simulasi (garis hitam tipis), solusi analitik (garis titik-titik tebal), batimetri pantai (daerah diarsir).

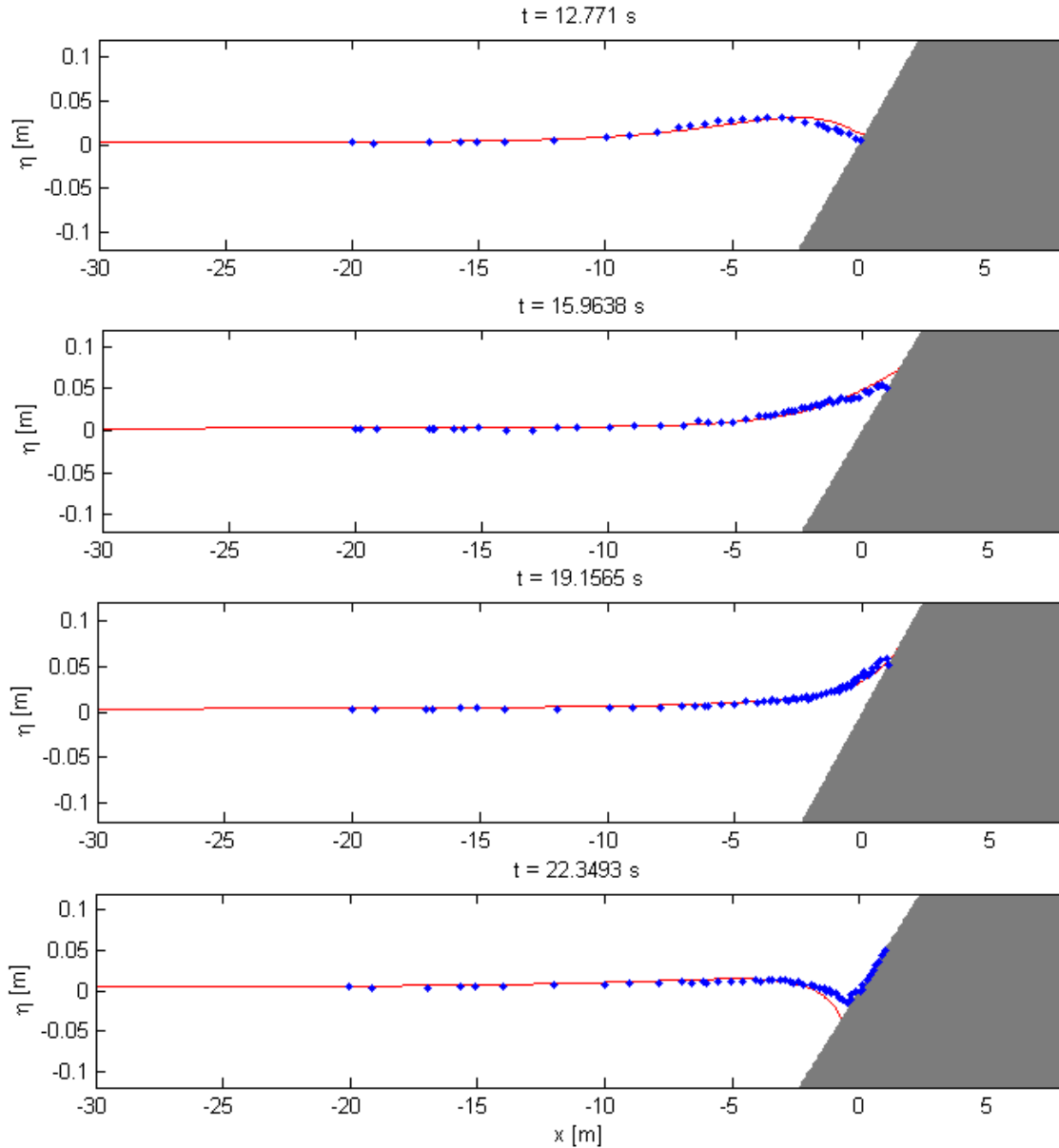




Gambar 8. Hasil simulasi menggunakan persamaan air dangkal dan divalidasi dengan hasil eksperimen Synolakis (1986) dengan $H/d=0,3$.

time t (s)	3.1928	4.7891	6.3855	7.9819	9.5783
RMSE	0.05836	0.05215	0.05953	0.01147	0.01031
CorrCoef	0.89447	0.90658	0.81387	0.99209	0.99613

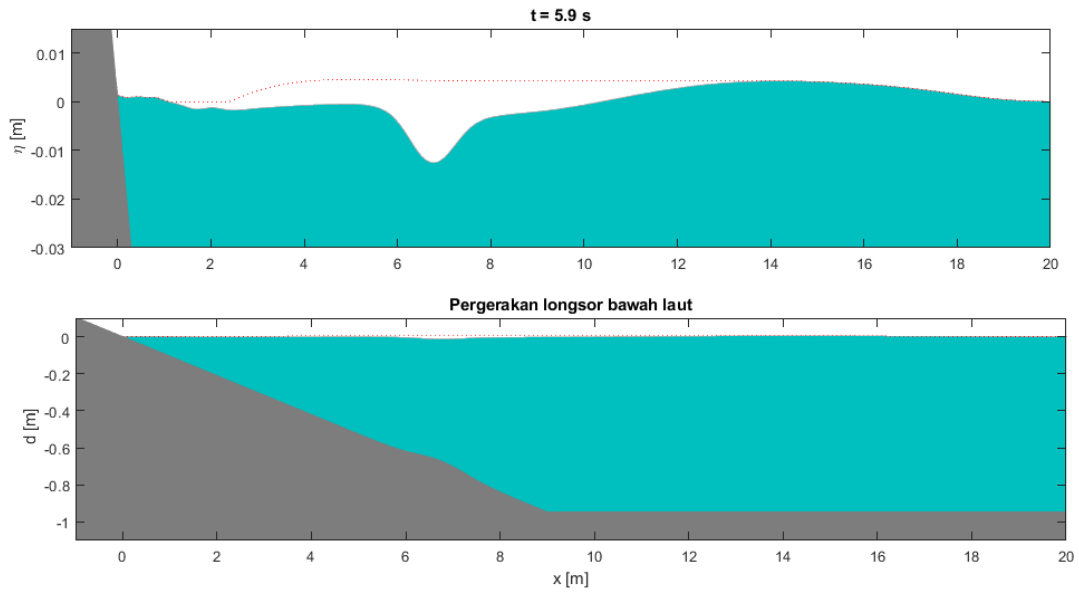
Tabel 1. RMSE dan koefisien korelasi untuk kasus *run-up* Synolakis (1986) dengan $H/d = 0,3$.



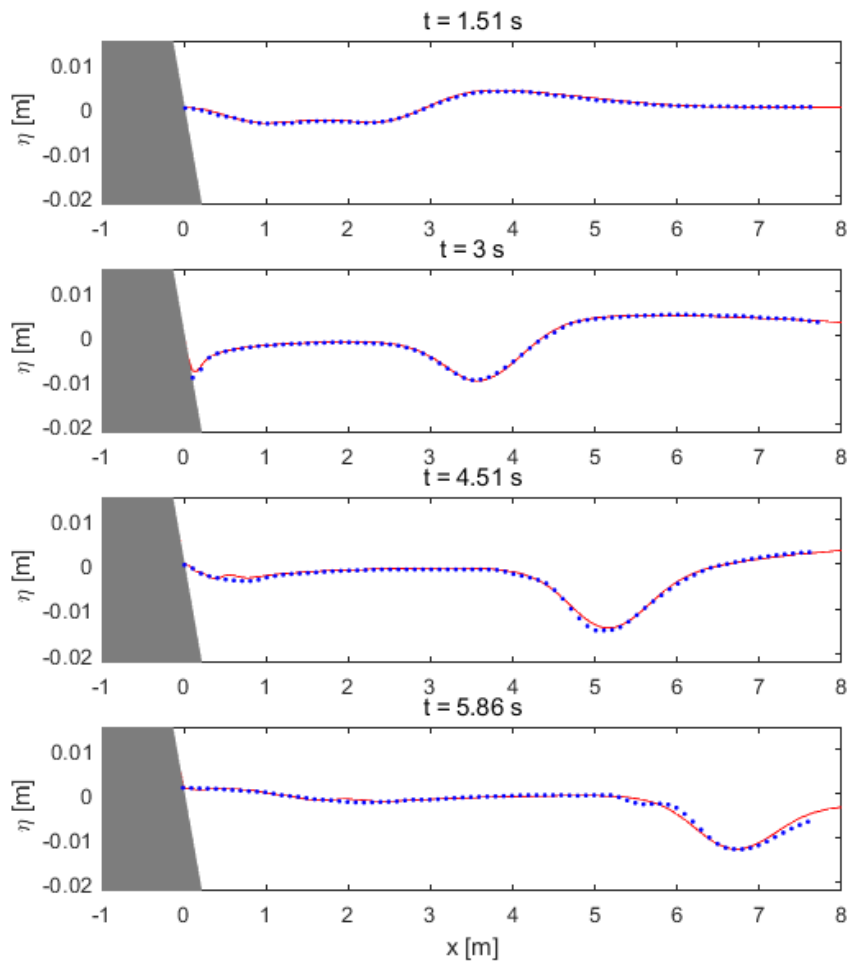
Gambar 9. Hasil simulasi menggunakan persamaan air dangkal dan divalidasi dengan hasil eksperimen Synolakis (1986) dengan $H/d=0,0185$.

time t (s)	12.771	15.963	19.156	22.3493
RMSE	0.00464	0.00384	0.00336	0.00688
CorrCoef	0.90257	0.98040	0.98724	0.94035

Tabel 2. RMSE dan koefisien korelasi untuk kasus run-up Synolakis (1986) dengan $H/d = 0,0185$.



Gambar 10. Hasil simulasi ketinggian permukaan air (gambar atas) dan pergerakan longsor bawah laut (gambar bawah) saat $t = 5.9$ detik.



Gambar 11. Hasil simulasi ketinggian permukaan air menggunakan metode staggered grid dibandingkan dengan hasil simulasi oleh Lynett & Liu menggunakan BIEM saat (a) $t=1.51$, (b) $t=3.00$, (c) $t=4.51$, dan (d) $t=5.86$ detik. Hasil simulasi dengan staggered grid (garis utuh), hasil simulasi dengan BIEM oleh Lynett & Liu (garis titik-titik).

time t (s)	1.51	3	4.51	5.86
RMSE	0.00021	0.00026	0.00043	0.00058
CorrCoef	0.99817	0.99853	0.99741	0.98901

Tabel 3. RMSE dan koefisien korelasi untuk kasus longsor bawah laut dan divalidasi dengan hasil simulasi oleh Lynett & Liu (2002) menggunakan BIEM.

5. Kesimpulan

Simulasi numerik gelombang tsunami yang dipicu oleh longsor bawah laut telah berhasil dilakukan. Metode volume hingga dengan skema staggered grid untuk mendapatkan solusi numerik dari persamaan air dangkal telah divalidasi dengan hasil eksperimen Synolakis dan menunjukkan hasil numerik yang cukup mendekati hasil eksperimen. Lebih jauh, hasil simulasi gelombang tsunami akibat longsor bawah laut memperlihatkan kecocokan cukup tinggi dengan hasil simulasi yang telah dilakukan Lynett & Liu. Pada penelitian selanjutnya, simulasi numerik ini dapat dikembangkan untuk kemudian diimplementasikan pada persamaan air dangkal 2-dimensi.

Daftar Pustaka

- [1] Adytia, D., Tarwidi, D., Kifli, S.A. dan Pudjaprasetya, S.R.. 2018. March. Staggered grid implementation of 1D Boussinesq model for simulating dispersive wave. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 971, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [2] Dutykh, D. dan Kalisch, H.. 2011. Boussinesq modeling of surface waves due to underwater landslides. arXiv preprint arXiv:1112.5083..
- [3] Fuhrman, D.R. dan Madsen, P.A.. 2009. Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering*, 56(7), pp.747-758.
- [4] Hammack, J.L.. 1973. A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 60(4), pp.769-799.
- [5] Harbitz, C.B., Løvholt, F. dan Bungum, H.. 2014. Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely?. *Natural Hazards*, 72(3), pp.1341-1374.
- [6] Lynett, P. dan Liu, P.L.F.. 2002, December. A numerical study of submarine-landslide-generated waves and run-up. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 458, No. 2028, pp. 2885-2910). The Royal Society.
- [7] Pelinovsky, E., Kharif, C., Riabov, I. and Francius, M.. 2002. Modelling of tsunami propagation in the vicinity of the French coast of the Mediterranean. *Natural hazards*, 25(2), pp.135-159.
- [8] Rynn, J.. 2002. A preliminary assessment of tsunami hazard and risk in the Indonesian region. *Science of Tsunami Hazards*, 20(4), p.193.
- [9] Stelling, G.S. dan Duijnmeijer, S.A.. 2003. A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow numerical methods in fluids, 43(12), pp.1329-1354.
- [10] Stelling, G.S. dan Zijlema, M.. 2009. Numerical modeling of wave propagation, breaking and run-up on a beach. In *Advanced Computational Methods in Science and Engineering* (pp. 373-401). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [11] Synolakis, C. E.. 1986. The runup of long waves. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology
- [12] Tsuji, Y., Matsutomi, H., Imamura, F., Takeo, M., Kawata, Y., Matsuyama, M., Takahashi, T. Dan Harjadi, P.. 1995. Damage to coastal villages due to the 1992 Flores Island earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 144(3-4), pp.481-524.