

Aplikasi Model Numerik Berbasis Finite Volume untuk Fenomena Tsunami

Aditia Rojali

Mahasiswa Program Pengkhususan Rekayasa Sumber Daya Air, Teknik Sipil, FTSL
Kampus ITB Jl.Ganesha No.10 Bandung. Email: aditiarojali@yahoo.com.

Syahril Badri Kusuma

Program Pengkhususan Rekayasa Sumber Daya Air, Teknik Sipil, FTSL
Kampus ITB Jl.Ganesha No.10 Bandung. Email: msbadrik@yahoo.com

Dhemi Harlan

Program Pengkhususan Rekayasa Sumber Daya Air, Teknik Sipil, FTSL
Kampus ITB Jl.Ganesha No.10 Bandung. Email: dhemi@si.itb.ac.id

Abstrak

Model FVCOM model hidrodinamika dengan grid tidak teratur pada modul barotropik digunakan dan telah disesuaikan untuk aplikasi kasus tsunami. Semua kasus dijalankan tanpa paralelisasi. Hasil verifikasi model FVCOM dengan kasus uji laboratorium plane beach dan canonical island yang merupakan standard benchmark test menunjukkan kesesuaian satu sama lain yang menunjukkan bahwa fenomena gelombang perairan dangkal dapat disimulasikan secara baik oleh Model FVCOM. Selanjutnya model FVCOM diujicobakan juga pada kasus tsunami Pangandaran (2006) dan kasus tsunami Flores (1992). Pada aplikasi kasus historis tsunami, secara umum model FVCOM memberikan pola gelombang dan tinggi tsunami yang cukup menjanjikan untuk aplikasi praktis melihat hasilnya yang mendekati data lapangan. Kedua kasus tsunami menggunakan jumlah mesh yang sama dimana Pangandaran (2006) memiliki sumber yang lebih jauh dari kasus Flores (1992). Hasil simulasi tsunami Flores lebih mendekati data lapangan diakibatkan resolusi perhitungan yang jauh lebih detail daripada Pangandaran (2006) dimana pada kasus Flores (1992) telah diterapkan mesh terkecil sebesar 10 m di sekitar Pulau Babi.

Kata-kata kunci: fvcom, tsunami, Pangandaran, Flores

ABSTRACT

FVCOM model with unstructured triangle grid on barotropic mode has been used and adapted for application of tsunami case. All cases were run without parallelization. The results of the model verification FVCOM with laboratory test case and the canonical plane beach island which is a standard benchmark test for tsunami model demonstrated the agreement between data and model, it means that the shallow-water wave phenomena can be simulated well by the FVCOM model. Furthermore FVCOM model was tested in the case of tsunami in Pangandaran (2006) and Flores (1992). In the real case application of the tsunami, the general model of FVCOM provide tsunami wave high and patterns that is promising for practical applications considering at the results of comparison between field data and FVCOM. Both cases of the tsunami event using almost the same number of mesh where Pangandaran (2006) has more distance source than the (1992) Flores was. Flores tsunami simulation results has a closer value to the field data which is resulting from the resolution of the calculations where Flores case has denser mesh than the Pangandaran (2006) where in the case of Flores in (1992), the smallest mesh of 10 m near Babi Island.

Keywords: fvcom, tsunami, Pangandaran, Flores

I. Pendahuluan

Perubahan yang signifikan dalam cara pandang seluruh masyarakat dunia terhadap bencana tsunami pada umumnya terjadi saat kejadian tsunami Aceh yang tercatat paling mematikan dalam sejarah atau oleh kalangan peneliti tsunami disebut sebagai “Boxing Day”. Sejalan dengan hal tersebut penelitian dan pengembangan oleh komunitas manajemen bencana di bidang tsunami terkait dengan pengurangan kerentanan dan mitigasi semakin meningkat dan berkembang. Pengembangan tersebut salah satunya adalah penelitian yang semakin luas dan mendalam dalam model numerik yang dipergunakan untuk mengestimasi tinggi tsunami dan rendaman di darat. Dalam model numerik hidrodinamika yang diaplikasikan untuk kasus tsunami, model tersebut sangat sensitif terhadap initial waveform dan bathymetry-topography. Maka kebutuhan dalam mendeskripsikan geometri yang kompleks dan menggambarannya secara presisi semakin tinggi untuk mendapatkan hasil model yang cukup akurat. Sedangkan hampir semua model tsunami yang dipergunakan secara luas saat ini menggunakan finite difference pada grid teratur atau segi empat. (Titov and Synolakis, 1995; Lynett et al., 2002; Yalciner et al., 2002). Hal ini masih menjadi masalah karena kemampuan alamiah dari grid teratur untuk merepresentasikan geometri yang kompleks dari suatu daerah pesisir sangat terbatas. Serta penempatan yang tepat dari pembuatan multigrid pada grid teratur masih menjadi isu yang sangat menantang untuk kebanyakan model *finite difference* dimana tantangan tersebut berupa kontinuitas massa dan momentum antar grid (Venturato et al., 2007). Sedangkan grid *unstructured* memiliki kemampuan untuk merepresentasikan geometri, batimetri dan topografi yang kompleks. *Finite volume* merupakan salah satu metode numerik yang dapat menggunakan *unstructured* grid yang memiliki kemampuan konservasi seperti *finite difference*. Akan tetapi masih sedikit model yang menggunakan metode ini untuk aplikasi tsunami. Beberapa diantaranya adalah ADCIRC yang digunakan oleh (Myers dan Batista, 1995), SELFE oleh Zhang dan Batista (2008) dimana keduanya adalah model sirkulasi barotropik dan baroklinik berdasarkan prinsip *finite element*. Adapun model hidrodinamika berdasarkan *finite volume* yang dilaporkan sedang dalam pengembangan untuk aplikasi tsunami dan rendamannya adalah ANUGA (Nielsen et al. 2005) dan FVCOM (Chen et al.2003). Sasaki et al. (2011) melaporkan telah berhasil mensimulasikan tsunami menggunakan FVCOM untuk kasus tsunami Aceh 2004 dengan beberapa penyesuaian dari kode orisinilnya. Akan tetapi karakteristik hasil model FVCOM *benchmark* terhadap kasus uji laboratorium dan analitik untuk kasus tsunami belum pernah dilaporkan. Oleh karena itu, pada makalah ini difokuskan mengenai aplikasi fvcom dalam kasus tsunami dan perbandingannya dengan model lain dan data lapangan pada kasus Flores 1992 dengan terlebih dahulu melihat hasil perbandingannya dengan data laboratorium sehingga dapat terlihat batasan dari model FVCOM ini untuk aplikasi tsunami.

II. Persamaan Pembangun Model

Persamaan pembangun selengkapnya dalam model fvcom terdiri dari persamaan momentum, kontinuitas, temperatur, salinitas dan densitas dimana model fvcom menggunakan persamaan

hidrodinamika 3 dimensi dengan pemisahan koordinat sigma. Sedangkan pada penelitian ini hanya digunakan bagian hidrodinamika dua dimensi dari keseluruhan modul yang terdapat pada fvcom. Persamaan terintegrasi secara vertikal 2-D pengembangan dari persamaan utama adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}D)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}D)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}D}{\partial y} - \bar{v}\bar{v}D = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_o} + D\tilde{F}_x + G_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 D}{\partial y} + \bar{u}\bar{u}D = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_o} + D\tilde{F}_y + G_y \quad (3)$$

Dimana G_x dan G_y didefinisikan sebagai

$$G_x = \frac{\partial \bar{u}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}D}{\partial y} - D\tilde{F}_x - \left[\frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial u\bar{v}D}{\partial y} - D\bar{F}_x \right] \quad (4)$$

$$G_y = \frac{\partial \bar{u}\bar{v}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 D}{\partial y} - D\tilde{F}_y - \left[\frac{\partial \bar{u}\bar{v}D}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} - D\bar{F}_y \right] \quad (5)$$

Dan suku difusi horizontal didekati oleh

$$D\tilde{F}_x \approx \frac{\partial}{\partial x} \left[2\bar{A}_m H \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\bar{A}_m H \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

$$D\tilde{F}_y \approx \frac{\partial}{\partial x} \left[\bar{A}_m H \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\bar{A}_m H \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] \quad (7)$$

$$D\bar{F}_x \approx \frac{\partial}{\partial x} \overline{2A_m H \frac{\partial u}{\partial x}} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{A_m H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \quad (8)$$

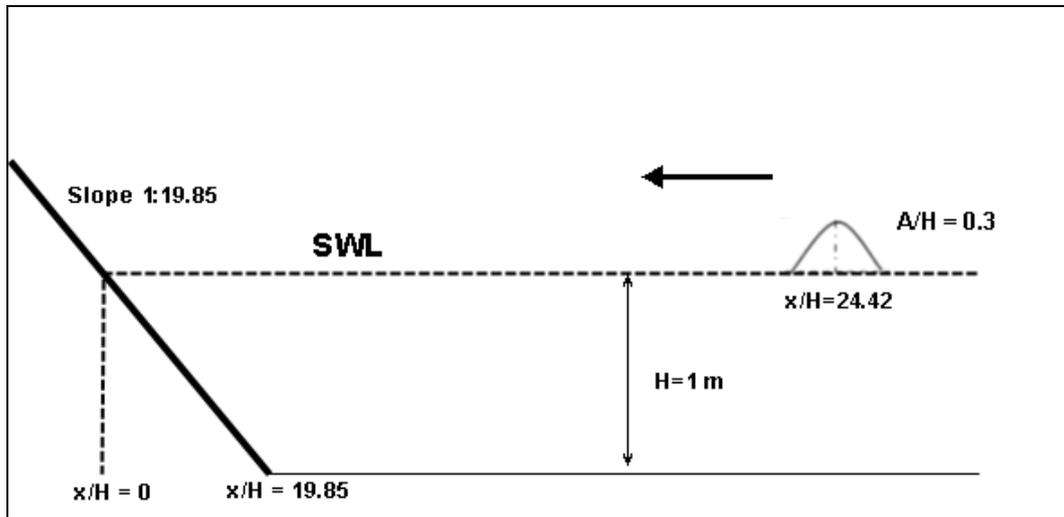
$$D\bar{F}_y \approx \frac{\partial}{\partial x} \overline{A_m H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{2A_m H \frac{\partial v}{\partial y}} \quad (9)$$

Tanda rata – rata menunjukkan integrasi terhadap kedalaman. Persamaan hidrodinamika selengkapnya dapat dilihat di Chen et al. (2003).

III. Simulasi *Plane Beach*

Model fvcom pada penelitian ini akan digunakan sebagai model prediksi fenomena tsunami. Maka model fvcom sebelumnya harus divalidasi terhadap *benchmark test* yang sudah menjadi standar dalam aplikasi model tsunami. Studi perbandingan simulasi *plane beach* ini bertujuan untuk mengukur kemampuan model fvcom dalam mensimulasikan gelombang pecah yang menjalar, rayapan gelombang

nya pada suatu pantai dengan *slope* yang cukup landai dan konservasi volume selama gelombang pecah terjadi. Skema permasalahan model diilustrasikan oleh Gambar 1 berikut.



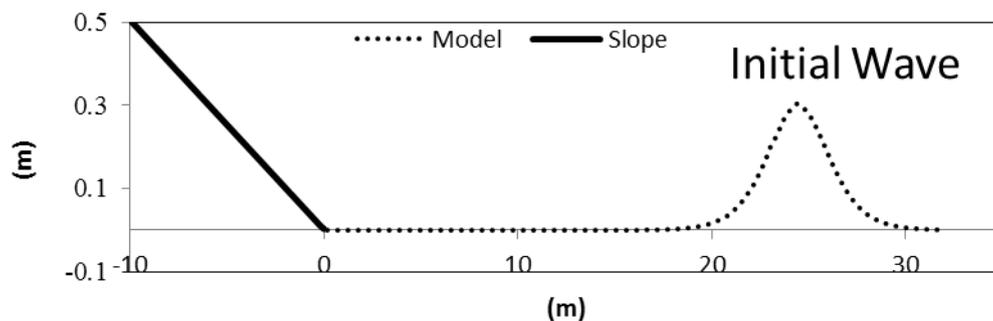
Gambar 1 Ilustrasi simulasi *plane beach*

Pada Gambar 1 tersebut A adalah tinggi gelombang, h adalah kedalaman, β adalah slope dari pantai dan R adalah tinggi run up. Koefisien Manning yang digunakan dalam percobaan ini adalah 0.01 yang menggambarkan kekasaran pantai yang terbuat dari kaca yang digunakan dalam eksperimen. Synolakis (1987) menggambarkan gelombang datang yang memiliki parameter $A/h = 0.3$. Slope pantai sebesar 1:19.85. Ujung pantai berada pada jarak $x/h=19.85$ dan gelombang soliter pada $x/h=24.42$. Gelombang soliter dibentuk oleh persamaan berikut.

$$\zeta(x) = A \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3A}{4h^3}} (x - 24.42) \right] \quad (9)$$

$$u(x) = -\zeta(x) \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (10)$$

Pada Gambar 2 diperlihatkan bentuk gelombang soliter awal yang akan dijalarkan ke arah pantai yang memiliki slope sebesar 1:19.85. Puncak gelombang awal adalah setinggi 0.304 m.



Gambar 2 Gelombang initial soliter

Hasil simulasi diperlihatkan oleh Gambar 3 sampai Gambar 13 dalam deret $t\sqrt{gh}$. Pada $t\sqrt{gh} = 10$ model fvcom memperlihatkan pengaruh kedalaman untuk gelombang soliter hal ini juga diperlihatkan oleh data dimana profil gelombang berubah bentuk dibandingkan dengan kondisi awalnya. Pada $t\sqrt{gh} = 15$ gelombang dari model fvcom memperlihatkan bahwa pada waktu tersebut gelombang telah melewati proses *shoaling* dimana puncak gelombang berkurang menjadi 0.25 m sedangkan data laboratorium memperlihatkan bahwa gelombang masih akan bertambah tinggi akibat proses shoaling. Pada $t\sqrt{gh} = 20$ data laboratorium memperlihatkan puncak dari efek *shoaling* pada gelombang dengan puncak setinggi 0.32 m sedangkan model fvcom memberikan profil gelombang dengan tinggi puncak semakin meluruh dengan puncak sekitar 0.19 m. Selanjutnya pada $t\sqrt{gh} = 25$ pada kedua deret data mulai memperlihatkan rendaman pada slope diatas 0 m atau diatas garis pantai. Profil kedua deret data memperlihatkan kemiripan satu sama lain namun data laboratorium memperlihatkan rendaman yang lebih jauh yaitu sampai kepada elevasi topografi 0.12 m sedangkan data model fvcom menghasilkan rendaman sejauh 0.11 m. Pada $t\sqrt{gh} = 30$ data laboratorium memberikan rendaman sampai kepada elevasi 0.31 m sedangkan model fvcom memberikan rendaman sampai ke 0.23 m. Pada $t\sqrt{gh} = 35$ kedua data tampak akan mendekati puncak rendaman terjauh nya dimana data laboratorium mencapai elevasi 0.44 m sedangkan model fvcom mencapai 0.34 m. Selanjutnya pada $t\sqrt{gh} = 45$ adalah puncak aliran rendaman pada data laboratorium sedangkan model fvcom memperlihatkan bahwa pada $t\sqrt{gh} = 45$ aliran dominan telah mengarah kembali ke arah lepas pantai. Data laboratorium memperlihatkan rendaman mencapai elevasi 0.45 m sedangkan model fvcom mencapai 0.35 m. Pada $t\sqrt{gh} = 50$ model fvcom memperlihatkan gelombang akan kembali memasuki daerah rendaman dimana gelombang terlihat kembali mendekati pantai sedangkan data laboratorium memperlihatkan bahwa aliran dominan masih mengarah ke lepas pantai sampai pada $t\sqrt{gh} = 55$ sedangkan fvcom memperlihatkan profil gelombang kembali akan memasuki daerah rendaman begitu pun pada $t\sqrt{gh} = 60$ sedangkan profil gelombang data laboratorium baru mengarah ke daerah rendaman. Pada $t\sqrt{gh} = 50$ data laboratorium memperlihatkan awal terbentuknya lompatan hidrolis sedangkan model fvcom memperlihatkan dari $t\sqrt{gh} = 35$. Secara umum model fvcom menghasilkan profil yang mendekati data gelombang tetapi sebelum memasuki daerah rendaman model fvcom menghasilkan profil gelombang yang lebih cepat terdispersi dibandingkan dengan data laboratorium sehingga hal ini mengakibatkan rendaman model fvcom yang mencapai elevasi positif lebih rendah daripada data laboratorium. Hal ini menurut Wei (2006) adalah konsekuensi dari efek nonlinier model yang menggunakan persamaan perairan dangkal non linier atau yang disebut juga *Nonlinear Shallow Water Equation* tanpa menyertakan suku orde tinggi dari dispersi gelombang sehingga efek yang ditimbulkan oleh efek nonlinier tidak diimbangi oleh suku dispersif. Perbandingan juga dilakukan dengan menggunakan persamaan analitik Synolakis (1987) yang juga disebut hukum rayapan gelombang sebagai berikut.

Synolakis (1987) memberikan persamaan untuk gelombang tidak pecah ditentukan dari pendekatan teori non linier dan memiliki hasil perbandingan yang bagus dengan data laboratorium. Rayapan maksimum untuk gelombang tidak pecah

$$R = 2.831\sqrt{\cot\beta} (\zeta)^{\frac{5}{4}} \quad (11)$$

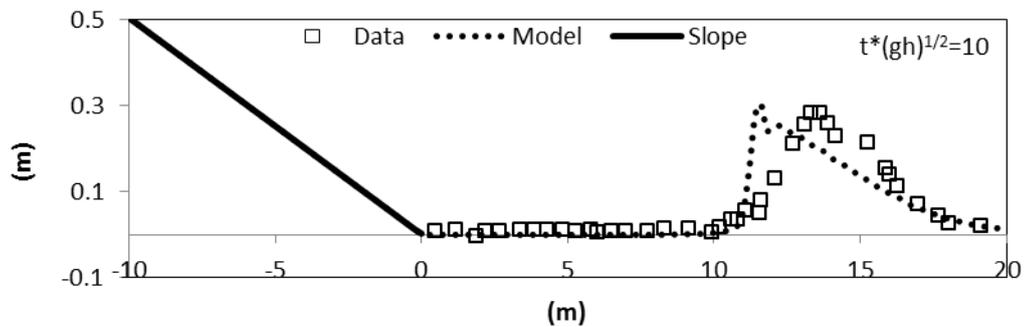
dimana

R = run up gelombang

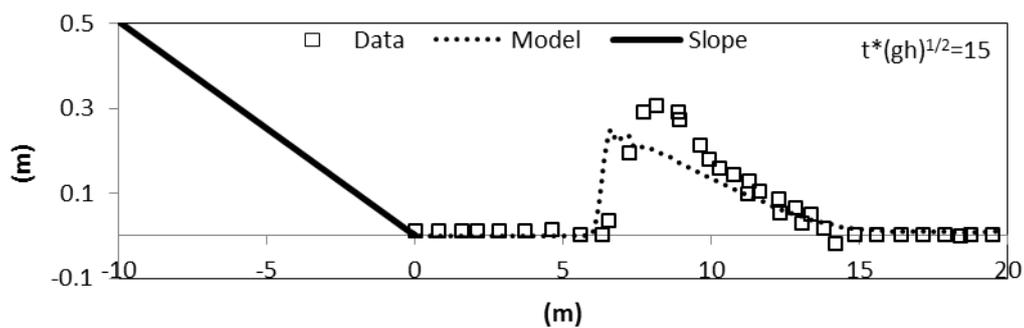
ζ = tinggi gelombang datang

β = slope saluran

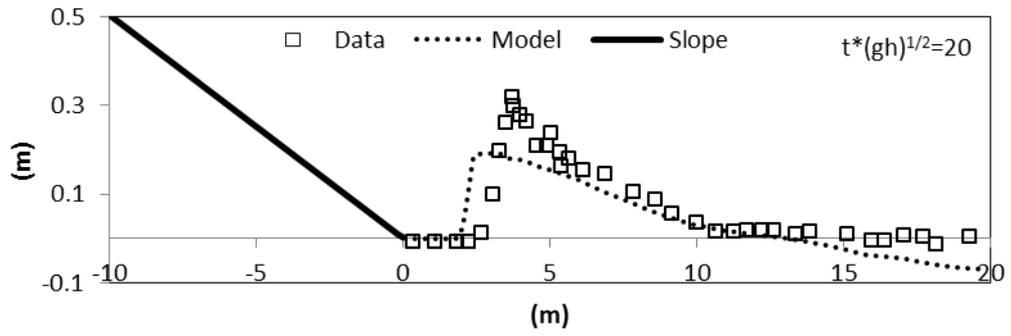
Hasil analitik memberikan nilai 0.141079 m sedangkan model fvcom memberikan nilai sebesar 0.15629 m dan data memberikan 0.1522431 m.



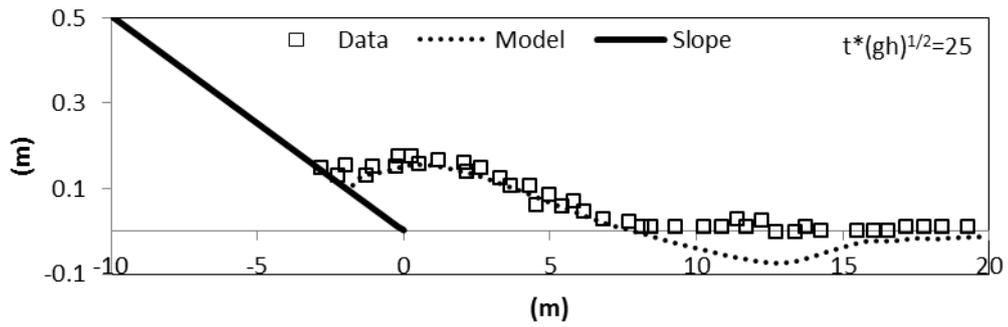
Gambar 3. Penampang vertikal pada waktu 3.19 detik



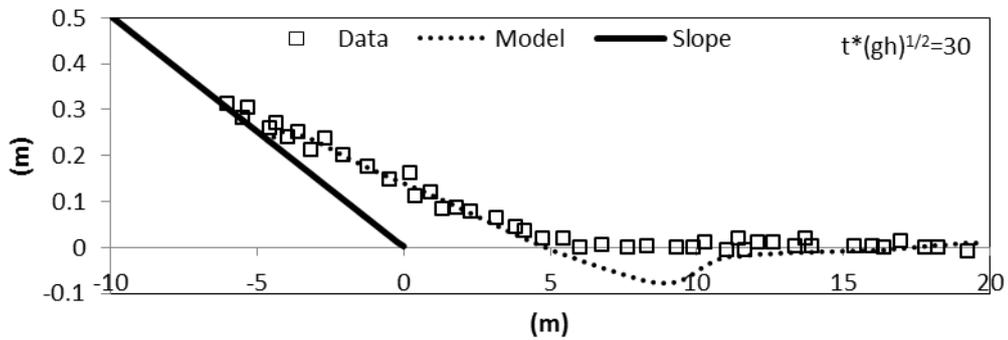
Gambar 4. Penampang vertikal pada waktu 4.79 detik



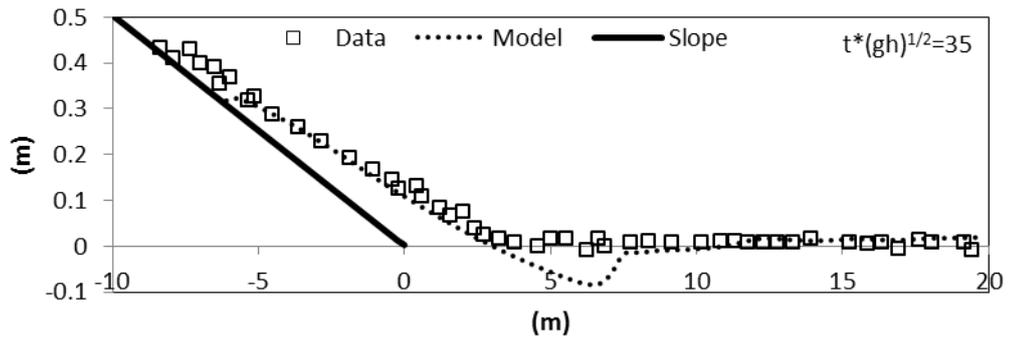
Gambar 5. Penampang vertikal pada waktu 6.39 detik



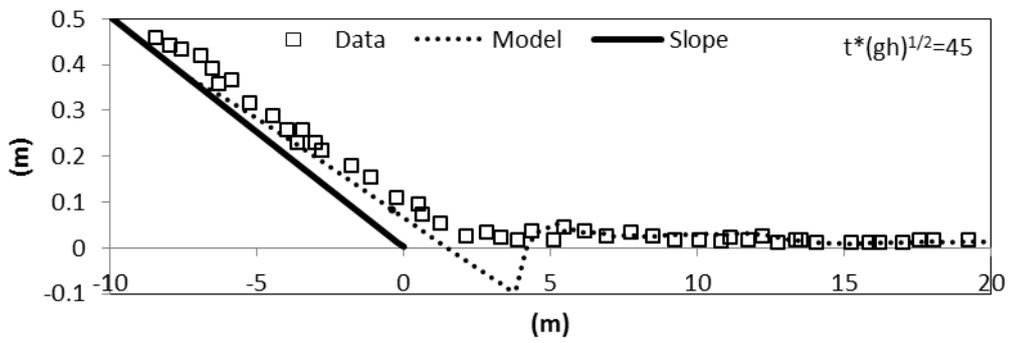
Gambar 6. Penampang vertikal pada waktu 7.98 detik



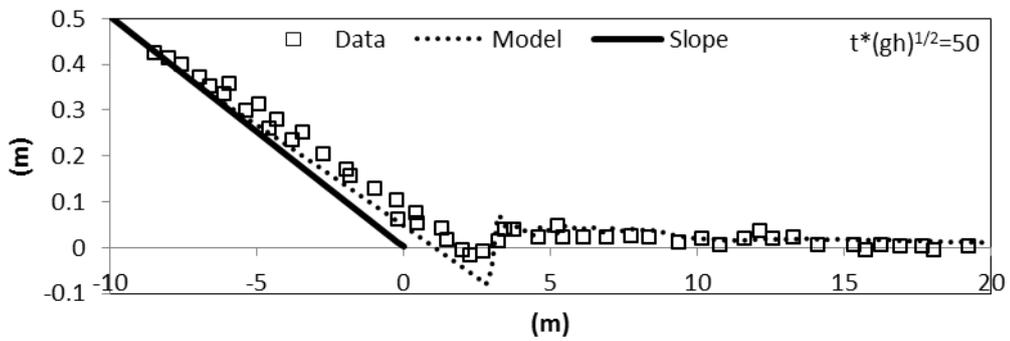
Gambar 7. Penampang vertikal pada waktu 9.58 detik



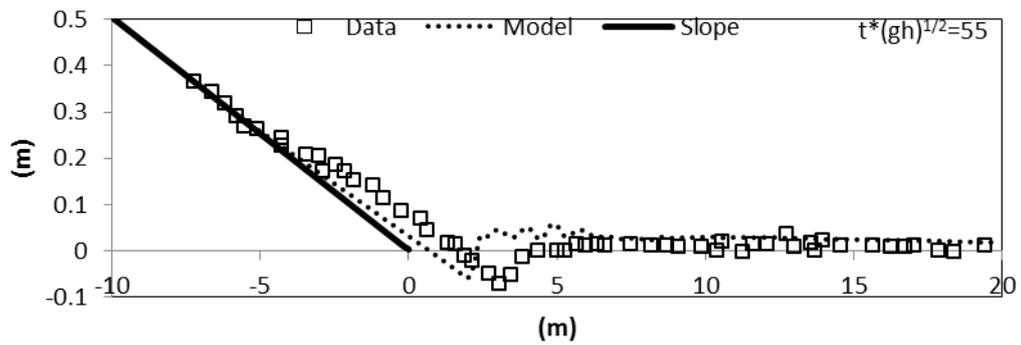
Gambar 8. Penampang vertikal pada waktu 11.17 detik



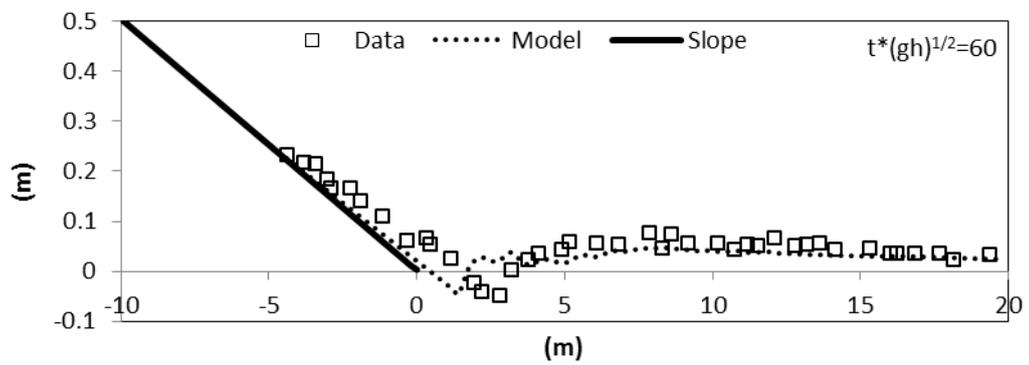
Gambar 9. Penampang vertikal pada waktu 14.36 detik



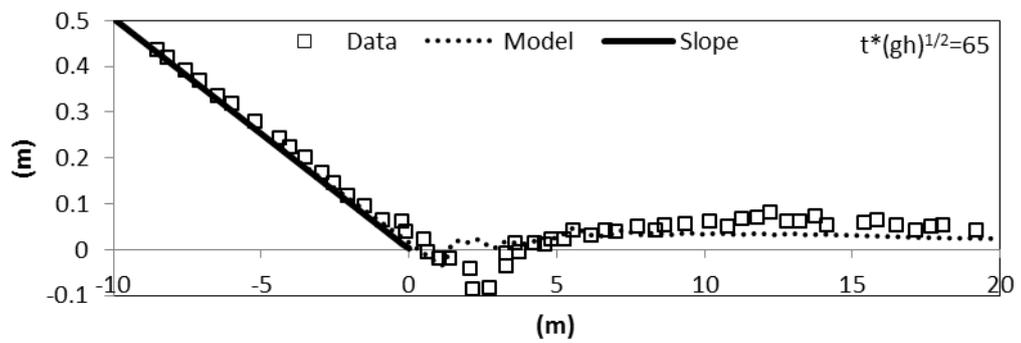
Gambar 10 Penampang vertikal pada waktu 15.96 detik



Gambar 11. Penampang vertikal pada waktu 17.56 detik



Gambar 12. Penampang vertikal pada waktu 19.15 detik



Gambar 13. Penampang vertikal pada waktu 20.75 detik

IV. Simulasi *Canonical Island*

Percobaan ini bertujuan untuk mengukur kemampuan model dalam mensimulasikan rayapan gelombang panjang pada pulau buatan yang membentuk kerucut terpotong dimana percobaan ini diinspirasi oleh kejadian tsunami salah satunya adalah tsunami Pulau Babi di Flores. Data tinggi dan rayapan gelombang

yang digunakan berasal dari percobaan laboratorium yang dilakukan oleh Briggs et al (1995). Spesifikasi percobaan laboratorium tersebut berupa:

- Pulau *canonical* memiliki diameter bawah 7,2 m diameter puncak 2.2 m, slope ¼ dimana perbandingannya adalah 1 satuan panjang vertical dan 4 satuan panjang horizontal.
- Tinggi pulau sebesar 62.5 cm atau 0.625 m.
- Domain model seluas 30 x 25 m memiliki kedalaman konstan terhadap ruang dan waktu.
- Gelombang soliter dengan rasio tinggi per kedalaman berkisar antara 0.05 sampai 0.2 dan penggerak gelombang berkisar antara 0.3 sampai 7.14 diameter canonical island
- Kedalaman yang dicoba adalah 32 cm
- *Rear wall* dan *wave absorber* yang bertujuan untuk mengurangi efek refleksi dalam mempengaruhi gelombang di daerah model sehingga boundary dapat dianggap dalam kondisi *free transmission* pada model fvcom.
- Titik tengah pulau berada di $x=12.96$ m dan $y=13.80$ m

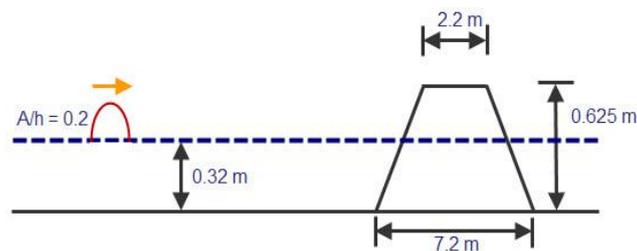
Sebanyak 27 pengukur gelombang digunakan untuk mengukur elevasi muka air (Gambar 15). Empat pengukur pertama diletakkan secara parallel terhadap pembangkit gelombang untuk mengukur gelombang datang. Pengukur gelombang juga dipasang di sekeliling pulau untuk mengukur rayapan di sekeliling pulau.

Gelombang datang menggunakan persamaan berikut.

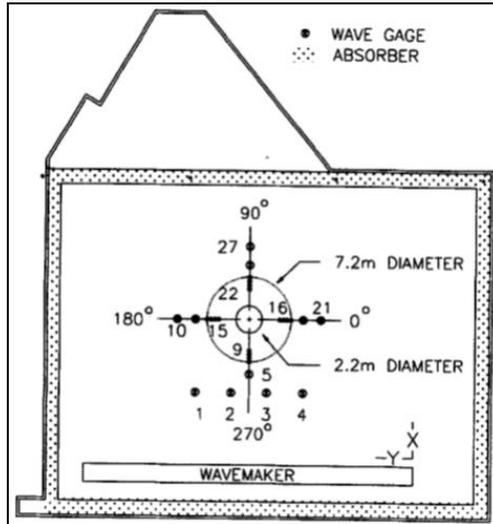
$$\zeta(x) = A \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3A}{4h^3}} (x - x_s) \right] \quad (12)$$

$$u(x) = \zeta(x) \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (13)$$

Dimana X_s adalah titik pusat solitary wave dengan koefisien Manning = 0.016



Gambar 14. Ilustrasi model yang dilakukan Briggs et al (1995) (tampak samping)



Gambar 15. Ilustrasi model yang dilakukan Briggs et al (1995) (tampak atas)

Survey lapangan atas kejadian tsunami di Pulau Babi dan pulau Okushiri menunjukkan tinggi rendaman yang sangat besar terutama di sisi belakang relatif dari arah gelombang datang dari pulau atau yang biasa disebut lee side. Pada kejadian Flores, dua desa yang terletak di sebelah selatan dari pulau yang berbentuk circular dengan diameter 2 km tersapu oleh tsunami yang datang dari arah utara. Fenomena yang hampir serupa juga terjadi di pulau Okushiri dengan bentuk seperti pear dengan panjang sekitar 20 km dan lebar 10 km. (Liu et al 1995). Maka pada uraian di bagian ini akan dibahas tentang simulasi model fvcom dua dimensi pada kasus uji benchmark circular island dari Briggs et al. (1995).

Pada kasus ini digunakan mesh yang terdiri dari 50412 elemen dan 25487 titik. Batas dari model diupayakan seluas mungkin untuk menghindari masuknya atau terhitungnya gelombang dari efek refleksi dari open boundary. Ukuran segitiga terkecil yang digunakan dalam simulasi ini adalah 0.05 m dengan segitiga terbesar sekitar 0.5 m di open boundary.

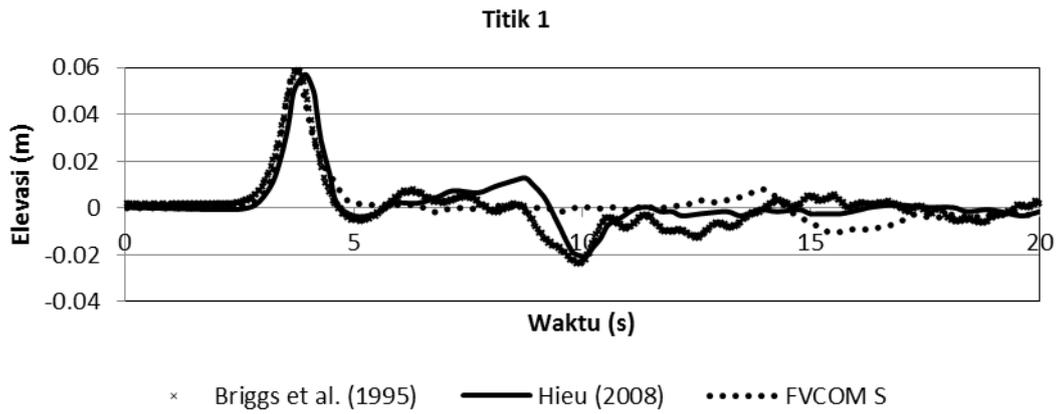
Hasil perhitungan model fvcom dibandingkan dengan data hasil uji coba laboratorium dengan lokasi titik tersebut relative terhadap pusat dari pulau *canonical* diberikan pada Tabel berikut dimana xc dan yc adalah koordinat titik pusat pulau *canonical*. Pada pembahasan ini, model fvcom juga akan dibandingkan dengan model Hieu (2008). Koefisien difusi horizontal diberikan konstan sebesar 2×10^{-5} .

Tabel 1. Lokasi titik verifikasi menurut koordinat lab

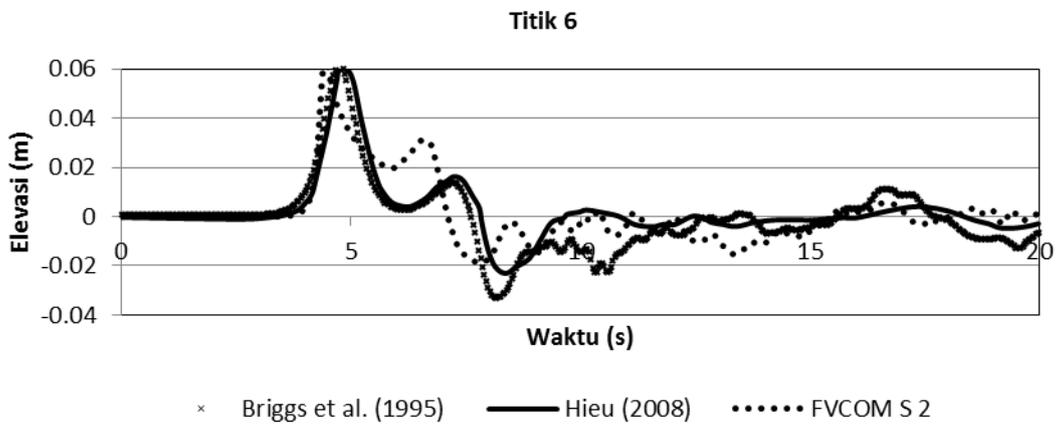
No Titik	x - xc (m)	y - yc (m)
1	9	2.25
6	3.6	0
9	2.6	0
16	0	2.58

22	-2.60	0
----	-------	---

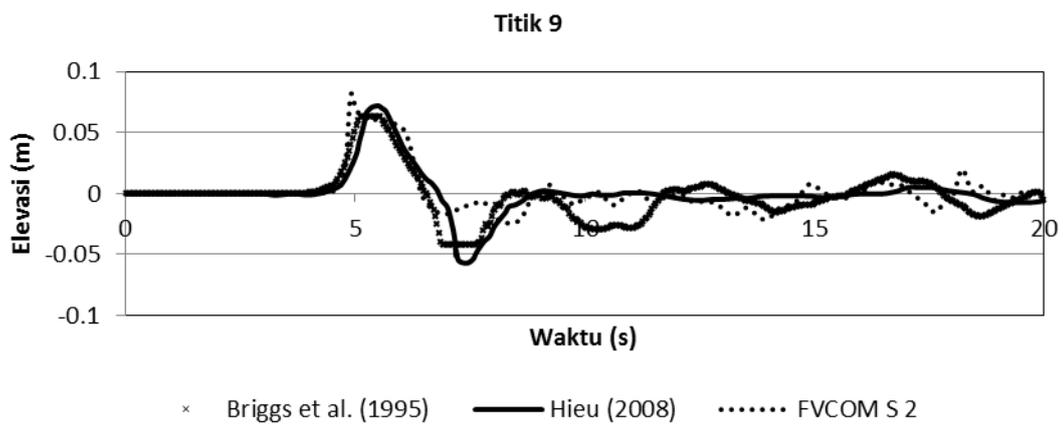
Hasil *time series* di setiap titik verifikasi diperlihatkan oleh Gambar 16 sampai Gambar 20, garis berwarna hitam menunjukkan model Hieu (2008) sedangkan garis titik-titik menunjukkan model fvcom. Data laboratorium diperlihatkan oleh deretan symbol silang. Pada Titik nomer 1 profil dari gelombang initial soliter pertama kali terekam sebelum mengalami efek dari pendangkalan atau shoaling oleh pulau. Profil muka air memiliki bentuk yang hampir serupa namun model fvcom skenario 1 memberikan ekor yang sedikit berbeda dari data dan model Hieu (2008). Puncak gelombang yang dihasilkan tidak jauh berbeda dengan data yaitu 0.0562 m sedangkan data memberikan nilai 0.0585 m dan Hieu (2008) memberikan nilai 0.0568 m. Bentuk gelombang terlihat sedikit lebih kurus daripada data dan model Hieu (2008), hal ini menjadi indikasi bahwa fvcom memberikan laju disipasi yang lebih besar daripada data dan model Hieu (2008). Perbedaan profil ini dapat dijelaskan oleh percobaan sebelumnya dimana hal itu merupakan efek non linier yang tidak diimbangi oleh efek dispersi gelombang orde tinggi. Titik nomer 6 adalah dimana gelombang datang mengalami efek pendangkalan atau shoaling. Pada Gambar ini terlihat bahwa ekor dari gelombang soliter juga mengalami efek pendangkalan. Model fvcom memberikan ekor yang lebih tinggi daripada Hieu (2008) dan data diakibatkan oleh gelombang yang datang memiliki ekor yang lebih tinggi dari pada data yang lainnya, hal ini terlihat dari Titik 1 dimana sebelum mengalami pendangkalan pun model fvcom memiliki ekor yang lebih tinggi dari pada data yang lainnya. Puncak gelombang model fvcom pada Titik 6 ini adalah sebesar 0.059 sedangkan data adalah 0.06 m sama dengan Hieu (2008) yang memberikan nilai 0.06 m. Titik nomer 9 adalah titik di depan pulau circular. Pada titik ini model fvcom memberikan nilai yang tertinggi yaitu 0.074 m sedangkan data adalah sebesar 0.063 m dan Hieu (2008) adalah sebesar 0.072 m. Titik nomer 16 adalah titik di samping pulau circular atau titik yang dilewati rayapan gelombang ketika mengelilingi pulau. Pada Titik 16 ini model fvcom memberikan nilai puncak gelombang terdekat dengan data yaitu sebesar 0.063 m dimana data adalah 0.062 m sedangkan Hieu (2008) sebesar 0.057 m. Titik 22 atau titik dimana rayapan dari kedua sisi pulau bertemu dan membentuk elevasi yang relatif lebih tinggi dari titik – titik di samping pulau. Model fvcom memberikan nilai elevasi yang cukup mendekati data yaitu sebesar 0.094 m dimana data adalah sebesar 0.092 m sedangkan Hieu (2008) hanya memberikan nilai sebesar 0.073 m. Sedikit perbedaan pada profil merupakan akibat dari efek nonlinier persamaan perairan dangkal yang tidak diimbangi oleh suku dispersif orde tinggi dimana hal ini juga dilaporkan oleh Wei et al. (2006), Liu et al (1995) dan Titov Synolakis (1998).



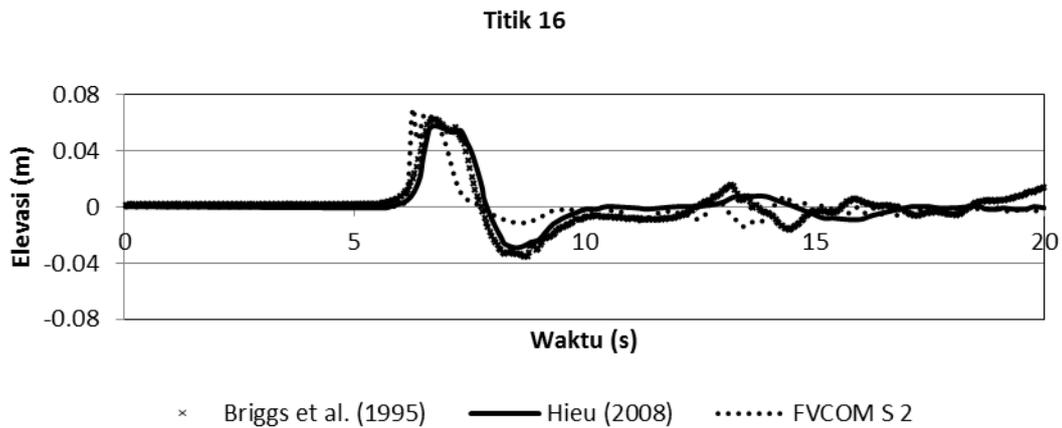
Gambar 16. Time series pada titik 1



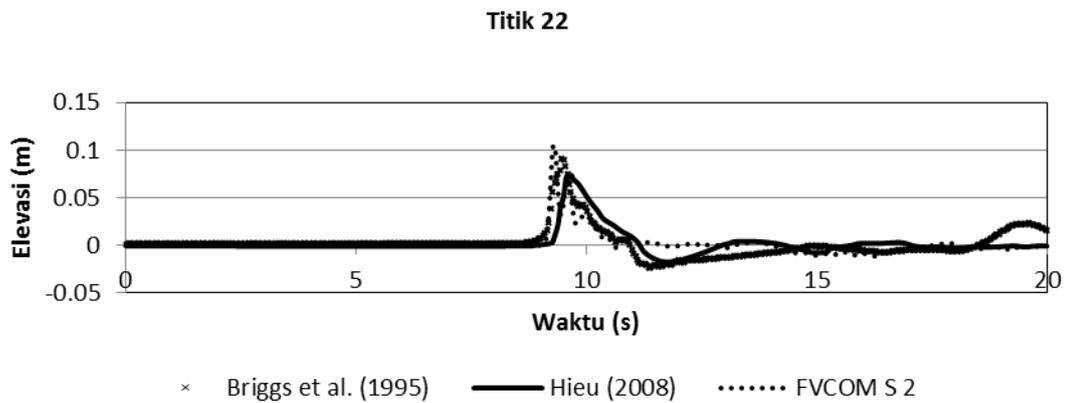
Gambar 17. Time series pada titik 6



Gambar 18. Time series pada titik 9



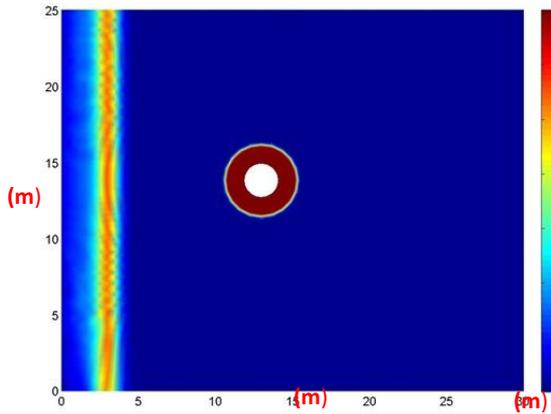
Gambar 19. Time series pada titik 16



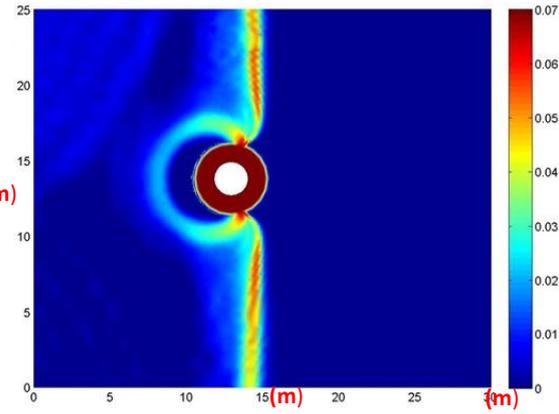
Gambar 20. Time series pada titik 22

Penjalaran gelombang melewati pulau *canonical* dapat dilihat pada Gambar 21 sampai Gambar 23 dengan sudut pandang tampak atas. Sumbu x dan sumbu y adalah koordinat laboratorium dalam meter sedangkan elevasi digambarkan dari warna merah sampai biru dimana maksimal adalah 0.07 m. Secara spasial terlihat bahwa model fvcom dapat menjalaran gelombang pada pulau *canonical* dengan profil seperti yang diharapkan sehingga perbandingan yang dinilai cukup komparabel dapat dilakukan. Hasil plot titik – titik di sekeliling pulau diperlihatkan oleh Gambar 24. Nilai elevasi dikelompokkan berdasarkan sudut di sekeliling pulau. Nilai 0^0 adalah titik di belakang pulau relatif terhadap gelombang datang atau lazim disebut *lee side* sedangkan sudut 180^0 adalah sisi depan pulau dan 90^0 dan 270^0 adalah sisi samping pulau. Hasil perbandingan rayapan gelombang ini menunjukkan model fvcom memiliki pola rayapan yang serupa dengan data dimana rayapan tertinggi ada di depan pulau lalu berkurang di samping pulau dan kembali meninggi di belakang pulau. Pola gelombang yang menjalar pada Gambar 21, Gambar 22 dan Gambar 23 memperlihatkan fenomena proses gelombang seperti difraksi, refleksi, refraksi dan shoaling. Difraksi terlihat dari adanya pengurangan tinggi gelombang yang menjalar di sekitar pulau,

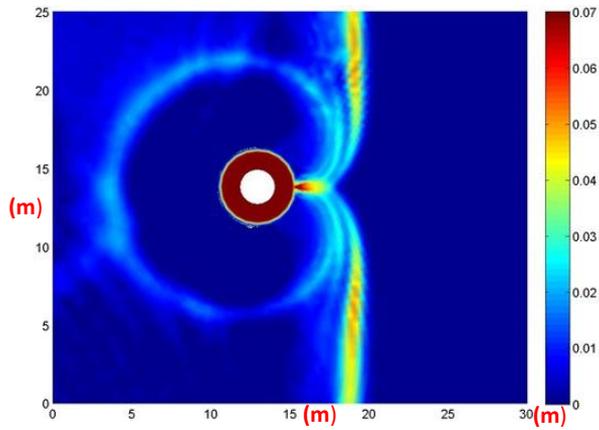
refraksi terlihat dari rayapan di sekeliling pulau yang memperlihatkan pergerakan gelombang mengikuti topografi pulau dan refleksi dari adanya gelombang balikan dari pulau yang menjalar menjauhi pulau. Hasil perbandingan data dan model fvcom tersebut menunjukkan bahwa model fvcom dapat mensimulasikan proses – proses fenomena gelombang di sekitar pulau seperti gelombang pecah, refraksi dan diffraksi.



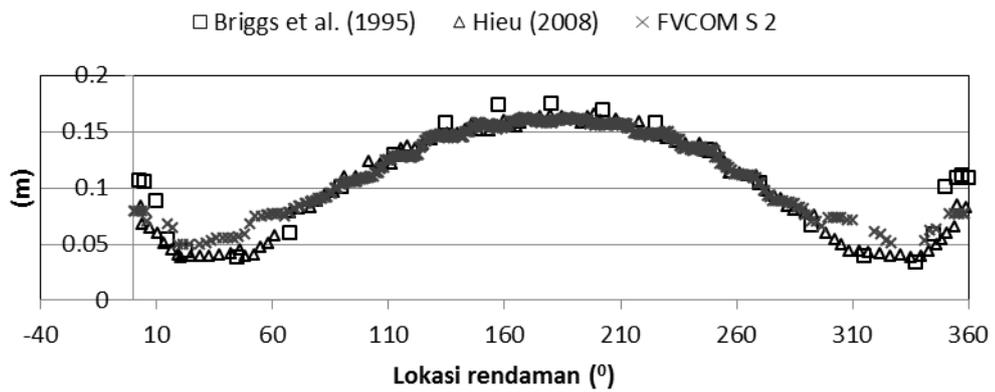
Gambar 21. Pola penjarangan gelombang sebelum memasuki pulau



Gambar 22 Pola penjarangan gelombang ketika melewati pulau



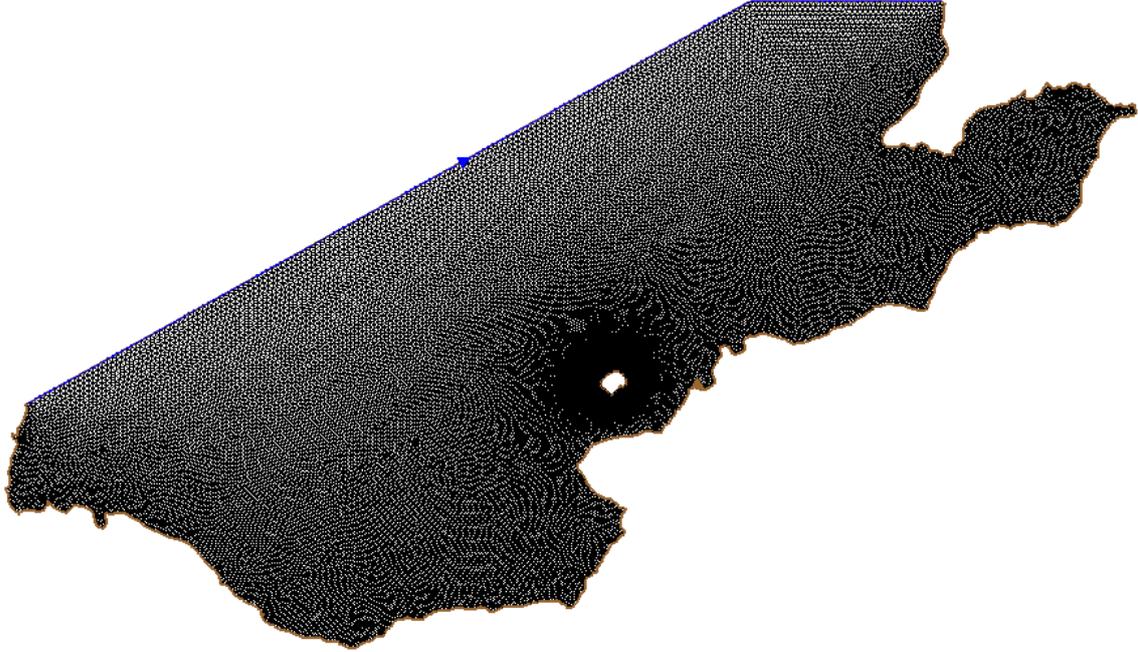
Gambar 23 Pola penjarangan gelombang ketika telah melewati pulau



Gambar 24. Pola rendaman di sekeliling pulau

V. Simulasi Pulau Babi

Batimetri model yang digunakan untuk simulasi menggunakan data gabungan dari GEBCO merupakan data batimetri global dari British Oceanographic Data Centre, 1997 DISHIDROS TNI-AL sedangkan data topografi berasal dari Intermap dan SRTM 90. Data batimetri dan topografi juga titik verifikasi model diperlihatkan oleh Gambar IV.11 berikut.



V.I. Sumber Tsunami

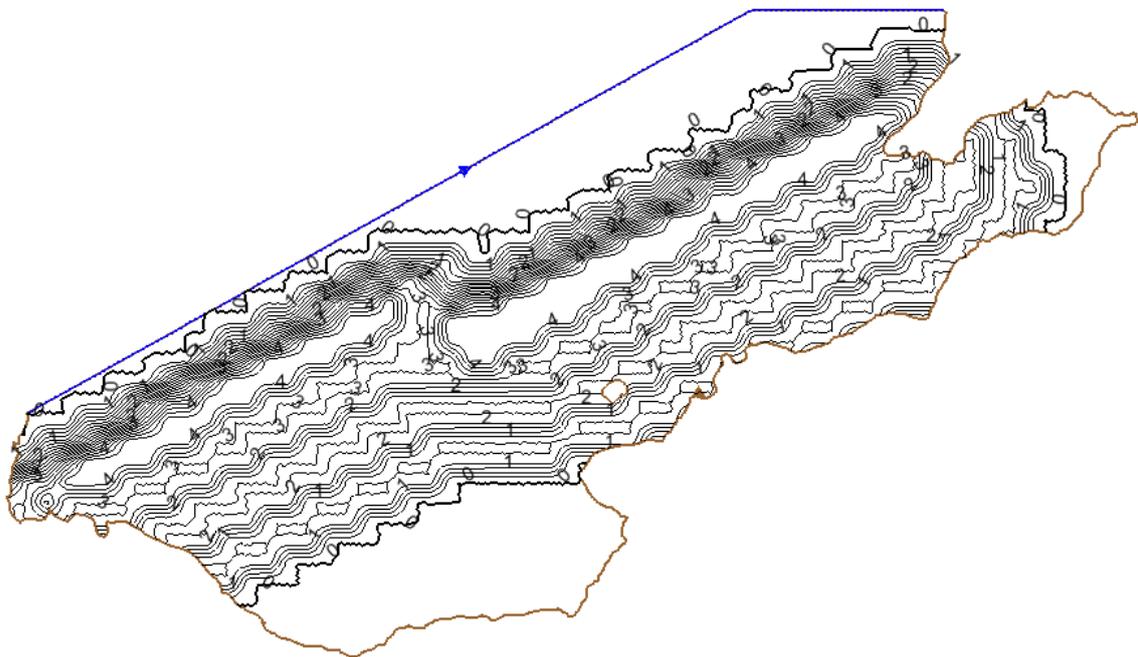
Parameter sumber tsunami yang digunakan adalah Imamura dan Kikuchi (1992) seperti yang perlihatkan pada Tabel.

Tabel 2 Parameter yang digunakan dalam pembangkitan sumber tsunami Flores 1992

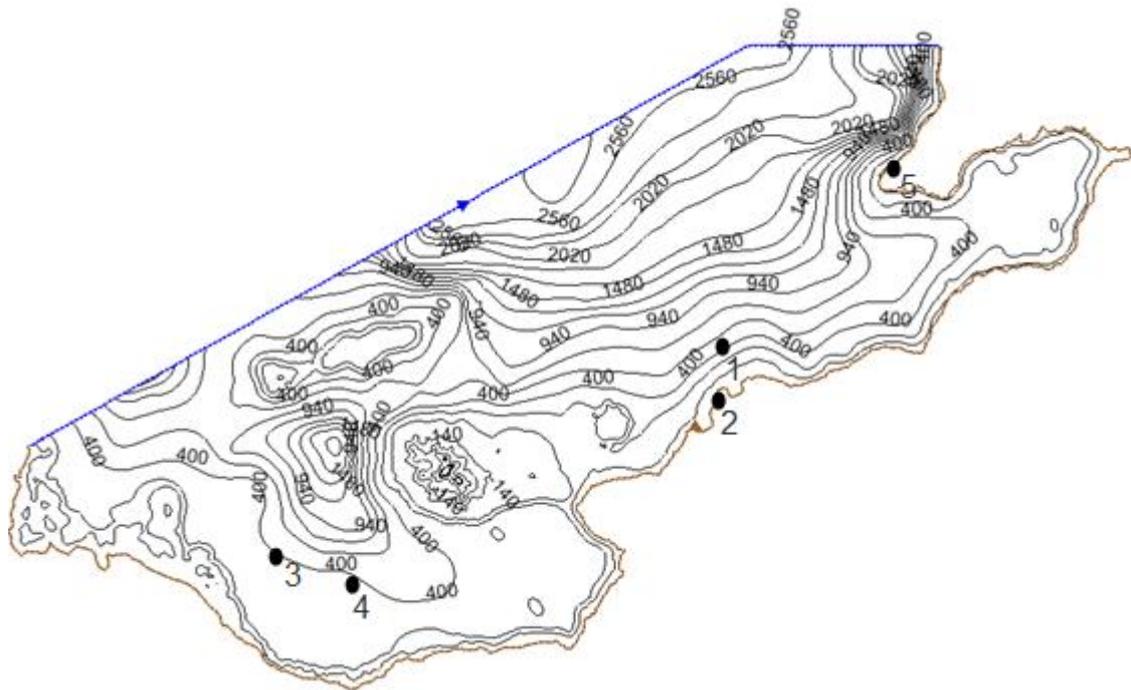
Parameter	Fault	Fault
	1	2
Kedalaman (km)	30	30
Strike ($^{\circ}$)	61	61
Dip ($^{\circ}$)	32	32
Slip ($^{\circ}$)	64	64
Panjang (km)	50	50
Lebar (km)	25	25

Dislokasi (m)	9.6	3.2
Latitude ($^{\circ}$)	-8,34	-8,34
Longitude ($^{\circ}$)	122. 49	122. 49

Sumber tsunami tersebut diinterpolasi terhadap node mesh sehingga secara spasial sumber tsunami berada dalam *unstructured mesh* yang digunakan untuk simulasi model fvcom seperti diperlihatkan oleh Gambar 26. Elevasi maksimum dari gangguan muka air sesaat tersebut adalah 4 meter dan memiliki nilai minimal sebesar 0 meter. Selanjutnya elevasi muka air sesaat tersebut dijalarkan menggunakan model fvcom sampai ke pantai.

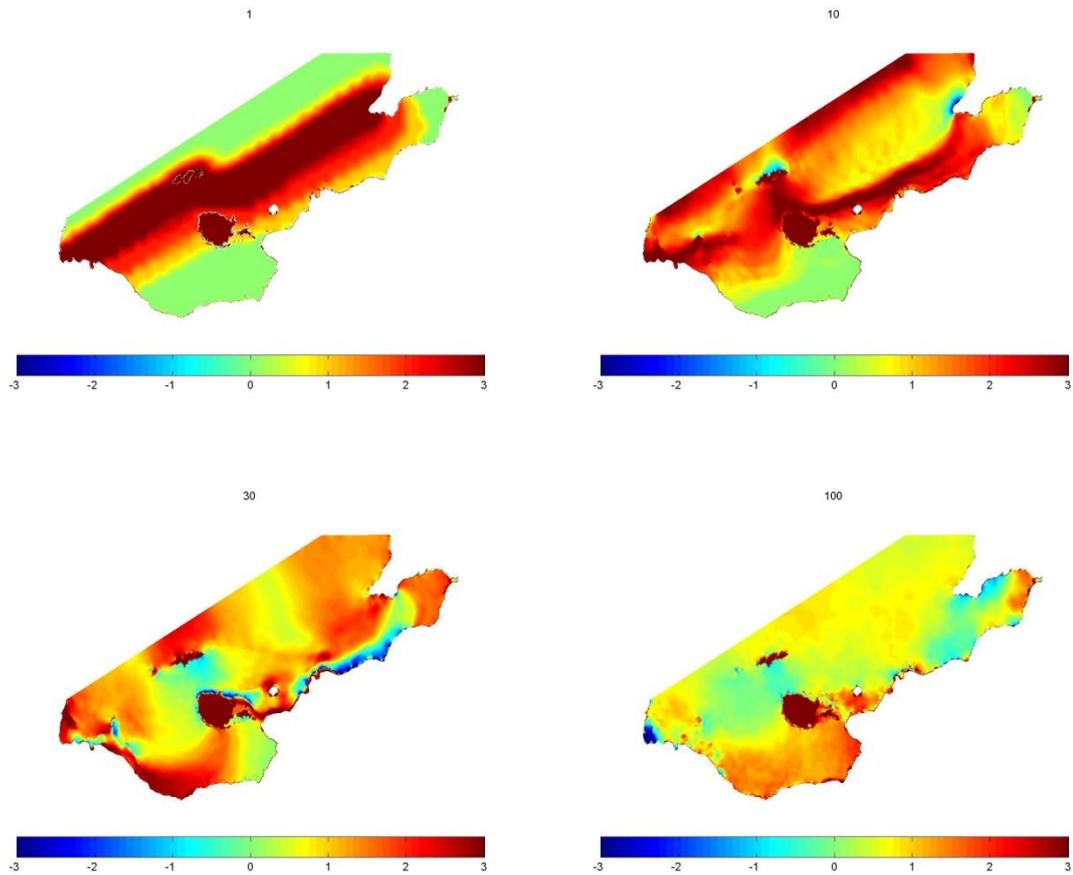


Gambar 25. Sumber tsunami Flores yang diinterpolasi terhadap node fvcom



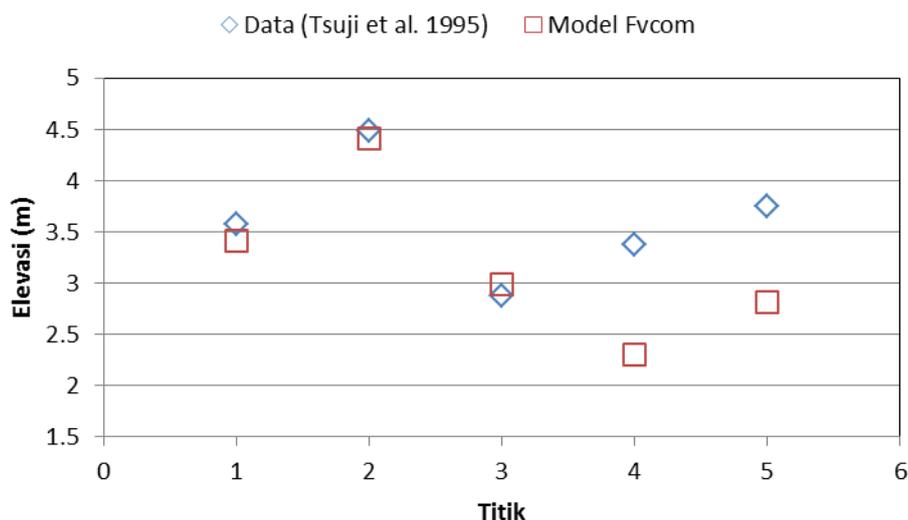
Gambar 26. Batimetri dan topografi yang diinterpolasi terhadap node fvcom dan kelima titik verifikasi

V.2. Hasil Simulasi Tsunami Flores 1992



Gambar 27. Hasil simulasi waktu ke 1 ,10, 30, 100 detik dari kiri ke kanan

Cuplikan hasil simulasi diperlihatkan oleh Gambar 28. Warna gelap menunjukkan nilai elevasi terendah yaitu -3 m dan juga menunjukkan nilai elevasi tertinggi yaitu 3 m. Kasus tsunami Flores 1992 adalah contoh kasus dengan sumber tsunami yang dekat dengan pantai. Batas terbuka menunjukkan refleksi yang diakibatkan oleh gelombang dapat teredam cukup baik. Sedangkan batas darat memperlihatkan efek refleksi. Hal ini konsisten dengan uji kasus laboratorium pada subbab sebelumnya. Hasil perbandingan dengan data lapangan diperlihatkan oleh Gambar 29 dimana untuk ketiga titik pertama data dan model memiliki nilai yang hampir mendekati satu sama lain sedangkan titik 4 dan 5 cenderung memiliki tren yang sama dimana titik 5 lebih tinggi daripada titik 4. Hasil simulasi ini menunjukkan juga bahwa model sumber tsunami dari Imamura dan Kikuchi (1994) cukup memberikan tinggi tsunami yang dapat mendekati data lapangan di titik – titik tersebut.



Gambar 28. Perbandingan data dan model fvcom untuk kasus tsunami Flores 1992

VI. Kesimpulan

Pada penelitian tentang penggunaan model fvcom untuk kasus tsunami ini dapat diambil beberapa kesimpulan. Hasil pengamatan dari percobaan simulasi untuk kasus *plane beach* dan kasus *canonical island*, model fvcom dua dimensi dapat mensimulasikan fenomena gelombang di perairan dangkal meliputi proses gelombang pecah, pendangkalan atau shoaling, refraksi dan difraksi juga rendaman di sekitar pantai. Dalam hal mendeskripsikan profil gelombang, model fvcom memiliki sedikit kekurangan akibat faktor nonlinier dari persamaan terintegrasi terhadap kedalaman yang tidak diimbangi oleh suku dispersi orde tinggi atau biasa disebut suku Boussinesq. Simulasi gelombang perairan dangkal dengan model fvcom disertai pengabaian faktor difusi horizontal dapat dilakukan, hal ini konsisten dengan Imamura (2006). Batas terbuka model harus diusahakan sejauh mungkin untuk mengantisipasi gangguan dari batas tersebut tetapi juga efektifitas dari waktu komputasi harus dipertimbangkan dengan meninjau jumlah mesh yang terlibat. Hasil percobaan untuk kasus uji fenomena tsunami Flores 1992 memperlihatkan bahwa model fvcom menghasilkan output yang menjanjikan untuk kepentingan pemodelan tsunami praktis akan tetapi model fvcom membutuhkan kemampuan computer yang handal agar dapat diaplikasikan ke dalam keperluan praktis seperti perkiraan tinggi tsunami untuk kesiap – siagaan dan mitigasi.

Pengakuan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Prof. Jun Sasaki dari Yokohama University atas diskusi dan masukannya mengenai program fvcom juga kepada Dr. Eng Hamzah Latief selaku kepala Tsunami

Research Group PPKPL – ITB yang telah menyediakan data dan fasilitas workstation untuk simulasi pada penelitian ini.

Referensi

British Oceanographic Data Centre, 1997, *The Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas* : Liverpool, U. K.

Chen, C., H. Liu, H., & Beardsley, R.C., 2003, *An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries*, J. Atmos. Oceanic Tech. 20, 159–186.

Cummins, P., Kong, L., & Satake, K., 2008, *Introduction to ‘‘Tsunami Science Four Years After the 2004 Indian Ocean Tsunami, Part I: Modelling and Hazard Assessment’’*, Pure appl. geophys. 165 (2008) 1983–1989.

Hieu, P., D., 2008, *Finite volume method for long wave runup: 1D model*, VNU Journal of Science, Earth Sciences 24 (2008) 10-15.

Hieu, P., D., 2008, *Numerical study of long wave runup on a conical island*, VNU Journal of Science, Earth Sciences 24 (2008) 79-86.

Imamura, F., Gica, E., Takahashi, T., Shuto, N., 1995, *Numerical Simulation of the 1992 Flores Tsunami: Interpretation of Tsunami Phenomena in Northeastern Flores Island and Damage at Babi Island*, PAGEOPH, Vol. 144, Nos. 3/4. Birkhauser Verlag, Basel.

Imamura, F., Yalciner, A. C., Ozyurt, 2006, *Tsunami Modelling Manual*, Unesco-IOC.

Lai, Zhigang., Chen, C., Cowles G., W., Beardsley, R., C., 2010, *A nonhydrostatic version of FVCOM: 1. Validation experiments*, Journal of Geophysical Research, Vol. 115, C11010, 23 PP, 2010.

Latief, H., 2000, *Tsunami Modelling, Risk Assessment, and Mitigation*, Pusat Penelitian Kelautan, Institut Teknologi Bandung.

Latief, H., S. Hadi, A. R. Gusman, H. Suhendar dan D. Zulkarnaen, 2006, *Preliminary Result of the 2006 West Java Tsunami Simulation*, Pusat Penelitian Kelautan, Institut Teknologi Bandung.

Lynett, P., Wu, T.-R., And Liu, P.L.-F., 2002, *Modeling wave runup with depth-integrated equations*, Coastal Engin. 46(2), 89–107.

Masinha, L., Smylie, D., E., 1953, *The Displacement Fields of Inclined Faults*, Seismological Society of America. Vol 61, No.5, pp. 1433-1440.

Myers, E.P. & Baptista, A.M., 1995, *Finite element modeling of the July 12, 1993 Hokkaido Nansei-Okhotsk tsunami*, Pure Appl. Geophys. 144(3/4), 769–801.

- Nielsen O, Roberts S, Gray D, Mcpherson A & Hitchman A., 2005, *Hydrodynamic modeling of coastal inundation*. MODSIM 2005 Internasional Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australian and New Zealand, 518-523.
- Pribadi, S., Fachrizal, I. Gunawan, , I. Hermawan, Y. Tsuji, S. Han, 2006, *Laporan Gempa Bumi dan Tsunami Selatan Jawa Barat 17 Juli 2006I*, Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Sasaki, J., Komatsu, Y., Matsumaru, R., Wiyono, R.U.A., 2011, *Unstructured Model Investigation of 2004 Indian Ocean Tsunami Inundation in Banda Aceh, Indonesia*. Journal of Coastal Research, SI-64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 941 – 945. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208
- Satake, K., Y. Fujii, 2006, *Source of the July 2006 West Java Tsunami Estimated from Tide Titik Records*, Geophysical Research Letters 33.
- Sudjatmiko, A., K, 2008, *Pemodelan Tsunami Pangandaran 2006*, Tugas Akhir Program Studi Oseanografi, Institut Teknologi Bandung.
- Sutowijoyo, A. P., 2005, *Tsunami, Karakteristik dan Pencegahannya*, Inovasi vol.3.
- Synolakis, C.E., 1987, *The runup of solitary waves*, J. Fluid Mech. 185, 523-545.
- Titov, V.V. & Synolakis, C.E., 1995, *Modeling of breaking and non-breaking long-wave evolution and runup using VTCS-2*, J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engin. 121(6), 308–316.
- Tsuji, Y., 1995, *Damage to Coastal Village due to the 1992 Flores Island Earthquake Tsunami*, PAGEOPH, Vol. 144, Nos. ¾. Birkhauser Verlag, Basel.
- Tsuji, Y., 2006, *Field Survey of The Tsunami Inundated Heights due to The Java Tsunami Along The Coast on The Indian Ocean in Java Island*, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.
- Unesco, 2008, *Tsunami Teacher*, www.unesco.org.
- Venturato, A.J., Arcas, D., & Kanoglu, U., 2007, *Modeling tsunami inundation from a Cascadia Subduction Zone earthquake for Long Beach and Ocean Shores*, Washington, NOAA Technical Memorandum, OAR PMEL-137.
- Wei Y, Mao XZ, Cheung KF., 2006, *Well-balanced finite-volume model for long-wave run up*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering ; **132**(2):114–124.
- Yalciner, A.C., Alpar, B., Altinok, Y., Ozbay, I., & Imamura, F., 2002, *Tsunami in the Sea of Marmara: historical documents for the past, models for future*, Marine Geology 190(1–2), 445–463.
- Zhang, Y.J. & Batista, A. M., 2008, *An efficient and robust tsunami model on unstructured grids. Part I: Inundation benchmarks*, Pure Appl. Geophys. 165, 2229–2247.