

PENERAPAN SKEMA *WETTING AND DRYING* PADA PERSAMAAN HIDRODINAMIKA UNTUK SIMULASI RAYAPAN GELOMBANG

Fitri Riandini

Peneliti, Puslitbang Sumber Daya Air
Jl. Ir.H. Juanda No. 193, Bandung
E-mail : fitandra@yahoo.com

Diterima : 12 Maret 2009; Disetujui : 23 Juni 2009

Abstract

Wetting and drying (WAD) are common and important phenomena of the coastal ocean. They occur in low-lying coastal zones and also in embayment and inlets. Strong winds and/or tides can cause flooding and subsequent drying. In shallow water models, wetting and drying are determined by the total depth $D = 0$ for 'dry' and $D > 0$ for 'wet'. The scheme defines 'dry' cells as region with a thin film fluid. The primitive equations are solved in the thin film as well as in other regular wet cells. The scheme was applied to hydrodynamics model to simulate tsunami's run up at Banda Aceh (Nanggroe Aceh Darussalam) and Pangandaran (West Java). Simulation results show that run up height at Banda Aceh reach more than 5 m, while at Pangandaran more than 3 m.

Keywords: *wetting & drying, tsunami's run up.*

PENDAHULUAN

1 Latar Belakang

Wetting And Drying (WAD) adalah suatu fenomena dimana bagian daratan yang semula kering dapat berubah menjadi basah (tergenang) akibat perubahan muka air. Fenomena tersebut terjadi di zone pantai yang landai dan *inlet*. Angin yang kuat dan pasang surut dapat menyebabkan genangan pada saat pasang tinggi kemudian mengering ketika surut.

Skema *WAD* diterapkan pada model hidrodinamika untuk mensimulasikan limpasan gelombang ke darat, dalam hal ini gelombang tsunami. Skema tersebut mendefinisikan sel kering (*dry cell*) sebagai suatu daerah dengan lapisan fluida yang sangat tipis. Dengan demikian persamaan yang digunakan dapat diselesaikan sebagaimana biasa, yaitu penyelesaian untuk sel basah (*wet cells*) pada umumnya.

Model hidrodinamika perairan pantai yang telah dimodifikasi dengan skema *WAD* ini digunakan untuk mensimulasikan *run-up*

(rayapan) akibat tsunami di Banda Aceh dan Pangandaran. Walaupun tidak ada data pengukuran yang dapat dibandingkan dengan hasil simulasi, namun berdasarkan pengamatan tanda-tanda tsunami pada bangunan dan hasil investigasi pasca tsunami menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil simulasi.

2 Tujuan dan Sasaran

Tujuan penelitian ini adalah menerapkan skema *WAD* pada model hidrodinamika untuk simulasi limpasan tsunami ke darat.

Sasarannya adalah tinggi dan luas limpasan di darat yang terjadi akibat tsunami.

Lokasi penelitian adalah daerah yang pernah mengalami tsunami, yaitu Aceh dan Pangandaran. Gambar 1 dan Gambar 2 masing-masing memperlihatkan lokasi Aceh dan Pangandaran.

KAJIAN PUSTAKA

Beberapa peneliti telah menerapkan skema *WAD* pada model perairan pantai. Dalam literatur

oseanografi dapat dibaca hasil penelitian Flather dan Hubbert (1990), Casulli dan Cheng (1992) dan Ji (2001). Pada *POM (Princeton Ocean Model) – WAD* didefinisikan area darat (*absolute land*) yang tidak dapat digenangi air. Sel grid lain dapat menjadi basah atau kering. Dengan menetapkan suatu lapisan tipis fluida pada suatu sel grid kering, maka penyelesaian persamaan dapat dilakukan bersamaan dengan penyelesaian pada sel basah.

dan melakukan simulasi pasang surut pada kanal 1 dimensi dan masalah *dam-break* di laboratorium. Oey (2006) melakukan simulasi pada model sirkulasi laut (*Ocean General Circulation Model*) dan menerapkan *WAD* sehingga asumsi yang menyatakan bahwa garis pantai adalah tembok vertikal dapat dihilangkan. Model ini memungkinkan dilakukannya simulasi pola arus di perairan terbuka dan rayapan air ke daratan.

Oey (2005) menerapkan skema *WAD* pada *POM*



Gambar 1 Lokasi Banda Aceh



Gambar 2 Lokasi Pangandaran

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan numerik.

1 *Outline Model*

Model yang digunakan dalam pemodelan ini berdasarkan pada *Princeton Ocean Model (POM;*

Blumberg & Mellor, 1987). *POM* merupakan model hidrodinamika perairan pantai yang menggunakan system koordinat-sigma dalam arah vertikal dan system koordinat kurvi linier dalam arah horizontal. Model ini mengasumsikan bahwa pantai merupakan dinding vertikal yang tidak dapat dilalui oleh air. Dengan demikian simulasi

hanya dapat dilakukan di area yang merupakan lautan sedangkan pada area yang merupakan daratan, tidak dilakukan perhitungan. Untuk memodelkan rayapan tsunami ke darat, *POM* dimodifikasi dengan menerapkan skema *wetting and drying (WAD)*; Oey, 2005), dimana garis pantai yang merupakan batas antara darat dan laut bukan lagi berupa dinding vertikal tapi garis yang dapat berubah secara dinamis. Dalam hal ini area daratan dapat berubah lautan (*wet*), sebaliknya area lautan dapat berubah menjadi daratan (*dry*).

Para peneliti bidang pantai dan muara seharusnya mempertimbangkan proses yang berhubungan dengan *wetting & drying* ini karena pada kawasan pantai, suatu wilayah dapat mengalami perubahan dari kondisi kering (*dry*) menjadi basah (*wet*) akibat variasi muka air.

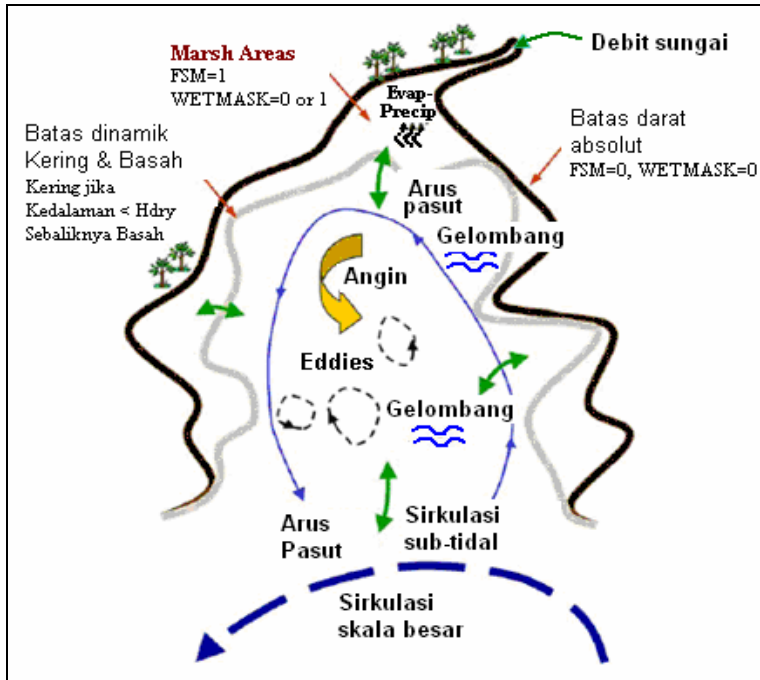
2 Skema *wetting and drying (WAD)*

Oey (2005) telah menerapkan skema *WAD* ini pada model hidrodinamika perairan laut dan pantai, *POM* (*Princeton Ocean Model*; Mellor 2002). Skema *WAD* diterapkan pada *POM* dengan mendefinisikan sel kering (*dry*) sebagai daerah dengan lapisan fluida tipis ($H_{dry} = 5 \text{ cm}$), dimana

penyelesaian persamaan hidrodinamika dilakukan dengan cara yang sama dengan sel basah (*wet*). Pada *POM* (tanpa *WAD*), digunakan suatu bidang 2-dimensi yang dinamakan *FSM*, dimana $FSM = 1$ untuk sel basah (grid air) dan $FSM = 0$ untuk sel kering (grid darat).

Untuk menerapkan skema *WAD* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3, kita definisikan suatu batas darat absolut (*absolute land boundary, ALB*) yang tidak dapat dilalui oleh air. Dengan demikian, $FSM = 0$ terletak dibagian darat dari *ALB* (ditandai dengan garis tebal pada Gambar 3). Pada daerah yang terletak dibagian laut dari *ALB*, $FSM = 1$, namun sel di area ini dapat berubah menjadi kering (pada saat surut) atau basah (pada saat pasang) bergantung pada variasi muka air.

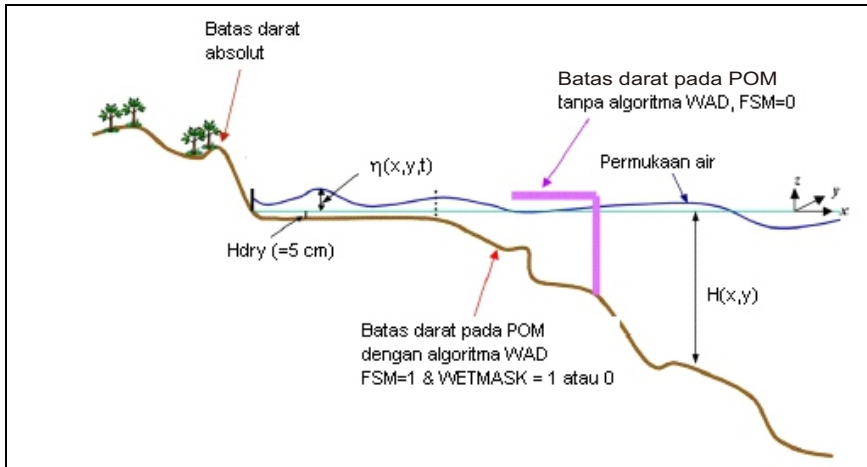
Untuk mempermudah pengertian, kita definisikan suatu bidang lain yang disebut *WETMASK*. Untuk $FSM = 0$ maka $WETMASK = 0$, dan untuk $FSM = 1$ $WETMASK = 0$ pada sel kering atau $= 1$ pada sel basah. Daerah yang didefinisikan sebagai *WETMASK* ini diperlihatkan sebagai *marsh area* pada Gambar 3 yang terletak antara *ALB* dan batas antara daerah basah dan kering (*wet & dry interface*).



Gambar 3 Skematisasi proses *wetting & drying* di kawasan pantai (Oey, L.Y., 2005)

Gambar 4 mengilustrasikan algoritma WAD pada suatu penampang vertikal pantai. Dengan menerapkan skema WAD ini, maka garis pantai

yang merupakan batas antara darat dan laut dapat berubah secara dinamis (*moving boundary*) sesuai dengan variasi muka air.



Gambar 4 Ilustrasi *wet & dry* pada suatu penampang vertikal pantai (Oey, L.Y., 2005)

Persamaan yang digunakan dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2}{\partial y} = -(W_{river} + W_{marsh})$$

$$\frac{\partial \bar{U} D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x^0 - r \bar{U}$$

$$\frac{\partial \bar{V} D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y^0 - r \bar{V}$$

dengan :

$$D = H + \eta$$

keterangan :

D = kedalaman total

H = kedalaman perairan

η = elevasi muka air

U = kecepatan arus dalam arah X

V = kecepatan arus dalam arah Y

(τ_x^0, τ_y^0) = vektor stress angin

$W_{river} < 0$ untuk input dari sungai

$W_{marsh} > 0$ untuk proses evaporasi

$r = C_z (u_b^2 + v_b^2)$ = gesekan dasar

keterangan :

$$C_z = \text{Max} \left\{ \kappa^2 / \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^2, 0,0025 \right\}$$

Dengan demikian, WETMASK = 0 jika $D \leq H_{dry}$ dan WETMASK = 1 pada kondisi lainnya. Untuk WET MASK = 0, U dan V = 0.

3 Model tsunami

Tsunami merupakan gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya gempa bumi atau bencana lain (misalnya landslide) di laut. Pada umumnya tsunami adalah gelombang panjang, $kH \ll 1$, (k adalah bilangan gelombang) yang merambat dengan kecepatan grup $c_g = (gH)^{1/2}$. Model yang digunakan tidak dapat menjelaskan

penyebaran tsunami, tetapi dapat memperlihatkan penjalaran gelombang ke pantai. Simulasi rayapan tsunami dilakukan dengan menggunakan asumsi barotropik dengan skema *WAD* sebagai bagian integral dari pemodelan.

HASIL PENELITIAN

1 Daerah model

Simulasi rayapan tsunami diterapkan pada 2 lokasi yang pernah mengalami kejadian tsunami, yaitu Banda Aceh dan Pangandaran. Daerah yang dimodelkan diperlihatkan pada wilayah yang diberi kotak pada Gambar 1 dan 2.

2 Input model

Untuk mensimulasikan rayapan tsunami ini, input yang digunakan adalah :

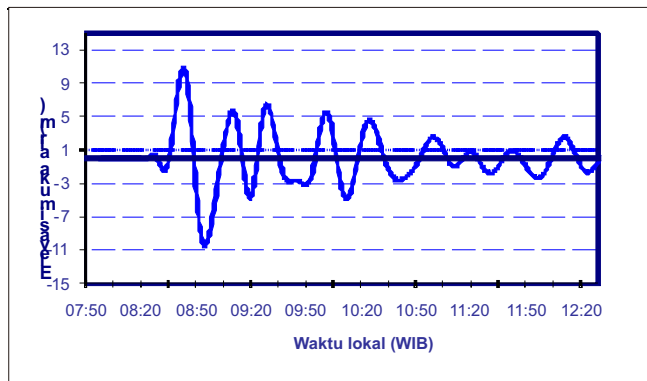
- Batimetri dan topografi daerah model.

- Elevasi muka air yang digunakan sebagai syarat batas.

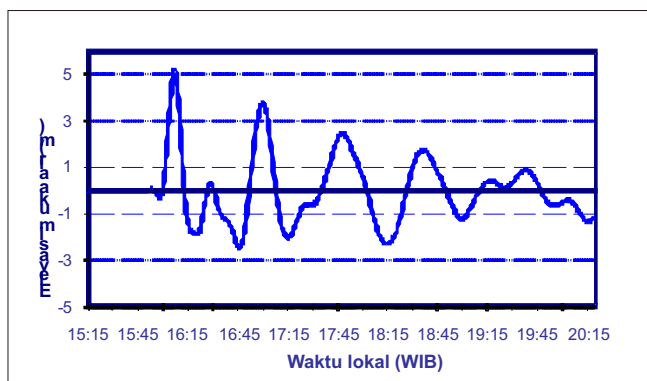
3 Syarat Batas

Syarat batas yang digunakan berupa muka air ketika terjadi tsunami di kedua lokasi. Data elevasi muka air diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6, masing-masing untuk lokasi Banda Aceh dan Pangandaran.

Data muka air ini diperoleh dari hasil prediksi sesuai dengan magnitudo gempa yang terjadi. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk lokasi Banda Aceh, gempa terjadi pada pukul 07.50 WIB namun belum mengakibatkan perubahan muka air. Muka air mulai naik pada pukul 08.25 WIB dan mencapai maksimum pada pukul 08.43 WIB. Di Pangandaran, gempa terjadi pada pukul 15.15 WIB. Muka air mulai naik pada pukul 16.00 WIB dan mencapai maksimum pada pukul 16.10 WIB.



Gambar 5 Elevasi muka air Banda Aceh



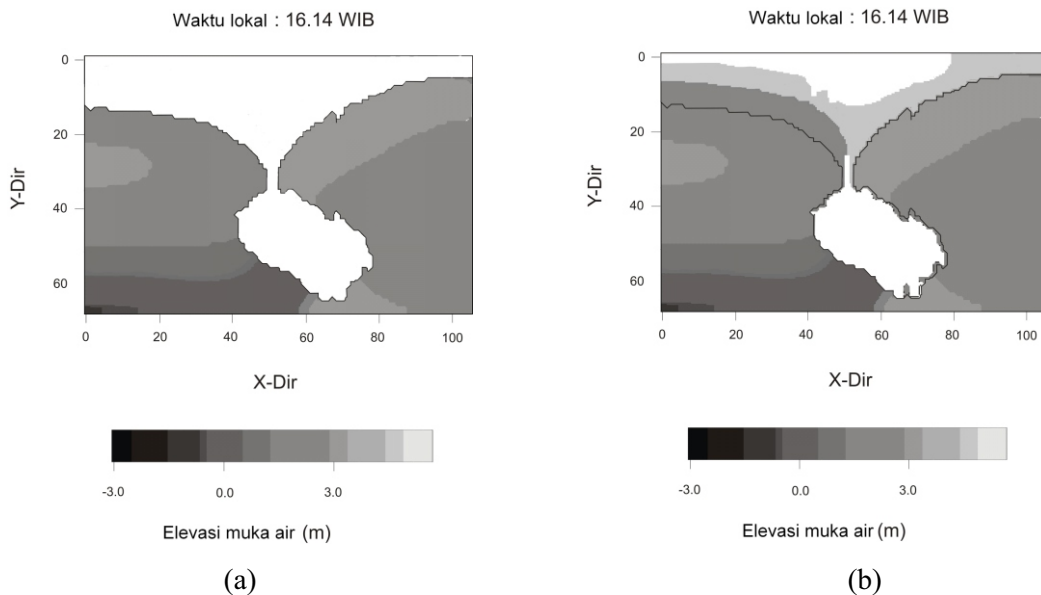
Gambar 6 Elevasi muka air Pangandaran

PEMBAHASAN

Untuk mengetahui perbedaan hasil simulasi antara model tanpa skema *WAD* dan model dengan skema *WAD*, dilakukan 2 macam simulasi dengan hasil diperlihatkan pada Gambar 7. Gambar tersebut memperlihatkan kondisi air pada saat pasang sehingga air dari laut akan bergerak menuju ke darat.

Pada simulasi tanpa skema *WAD*, garis pantai diasumsikan sebagai tembok vertikal yang tinggi, sehingga air tidak dapat melewatinya (lihat Gambar 7a). Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa berapapun tinggi muka air, tidak ada air

melewati garis pantai dan menggenangi daratan. Dalam hal ini daratan (ditandai dengan bagian berwarna putih) akan tetap berupa sel kering (grid darat). Dengan demikian perhitungan tinggi muka air hanya dapat dilakukan di laut saja. Gambar 7b memperlihatkan hasil simulasi muka air dengan penerapan skema *WAD*. Dalam hal ini garis pantai tidak lagi berupa tembok vertikal, tetapi dapat dilewati muka air dan dapat bergerak maju atau mundur sesuai dengan variasi muka air. Dengan demikian sel kering (grid darat, ditandai dengan bagian berwarna putih) dapat berubah menjadi sel basah (grid air) sesuai dengan muka air yang menggenangnya.



Gambar 7 Perbandingan hasil simulasi tanpa *WAD* (a) dan dengan *WAD* (b)

1 Banda Aceh

Hasil simulasi penjalaran tsunami di Aceh diperlihatkan pada Gambar 8a sampai 8d. Gambar 8a memperlihatkan kondisi awal muka air, yaitu muka air rata-rata = 0. Kondisi ini terjadi 8 menit setelah gempa terjadi, yaitu pada pukul 07.58 WIB. Pada saat tersebut gempa belum mengakibatkan perubahan muka air. Beberapa menit kemudian muka air mulai bertambah dan mencapai puncaknya pada pukul 08.43 WIB (Gambar 8b), dengan ketinggian mencapai 10 meter. Pada saat inilah tsunami mulai terjadi,

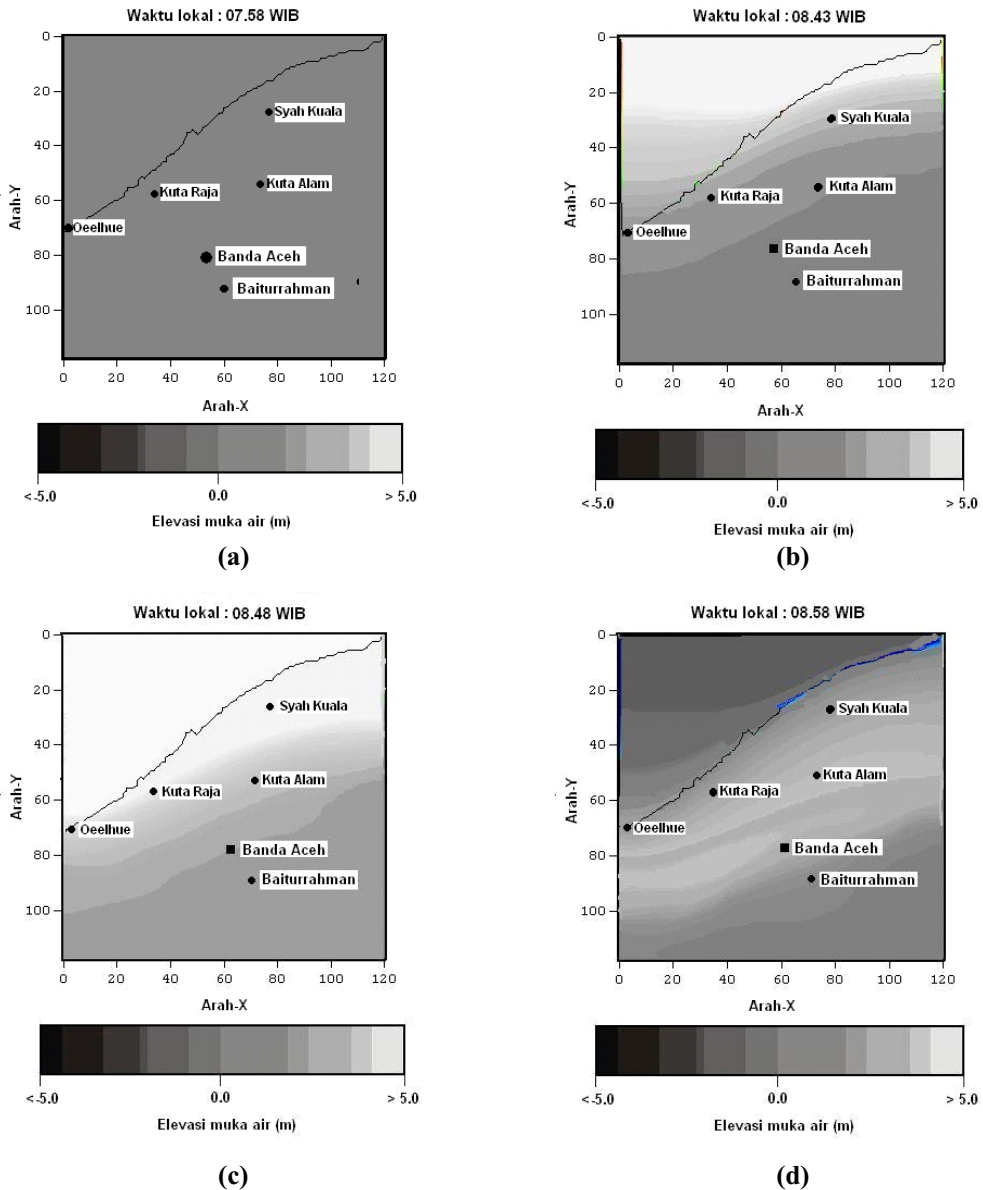
menjalar menuju pantai dan merayap ke darat. Beberapa saat kemudian tsunami masih terjadi namun amplitudonya mulai berkurang menjadi 7 m pada waktu lokal 08.48 WIB (Gambar 8c). Gambar 8d memperlihatkan fase surut pada waktu lokal 08.58 WIB, dengan amplitude hanya 3,4 m.

Gambar 9 adalah grafik yang menunjukkan penjalaran tsunami pada arah-Y, mulai dari pusat gempa di perairan dalam sampai ke pantai. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada pukul 07.58 WIB belum terlihat perubahan muka air dari kondisi awal. Pada pukul 08.43 WIB, muka air di

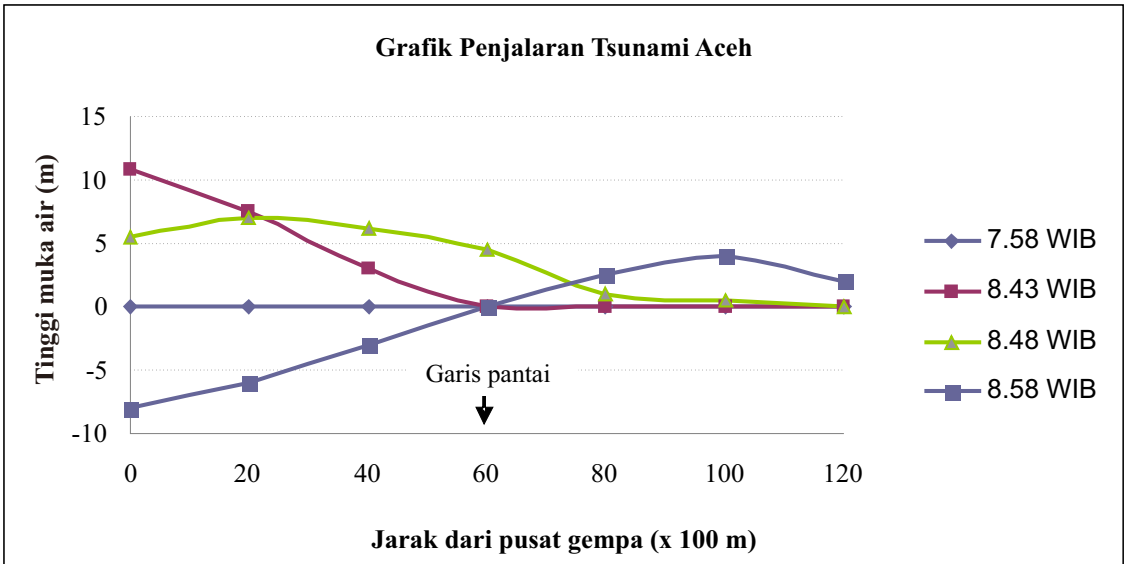
perairan dalam mencapai lebih dari 10 meter yang merupakan tinggi muka air tertinggi pada tsunami Aceh. Namun demikian, penjalaran tsunami ini tidak mencapai ke darat. Pada pukul 08.48 WIB, tinggi muka air di perairan dalam sudah mulai berkurang, namun rayapan ke darat, mencapai 2 km dari garis pantai. Rayapan tsunami lebih jauh ke darat terjadi pada pukul 08.58 WIB, mencapai 6

km dengan tinggi muka air maksimum mencapai 4 meter.

Pada kejadian tsunami ini, tidak ada data pengamatan yang dapat dibandingkan dengan hasil simulasi, namun demikian hasil simulasi ini sesuai dengan kondisi di lapangan sesaat setelah tsunami, yaitu tinggi muka air yang tercatat di masjid Baiturrahman mencapai lebih dari 3 meter.



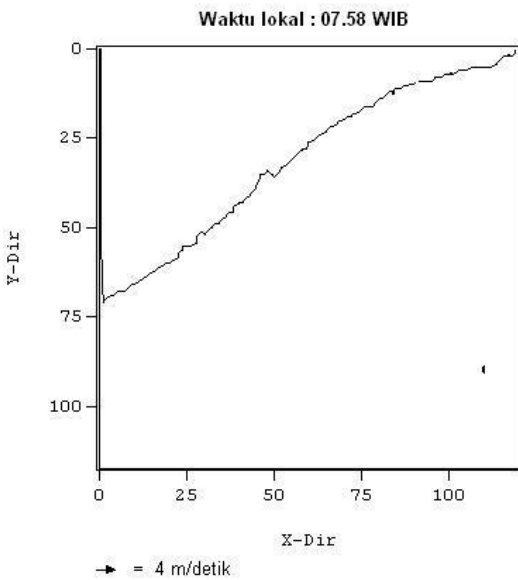
Gambar 8 Hasil simulasi penjalaran tsunami Aceh



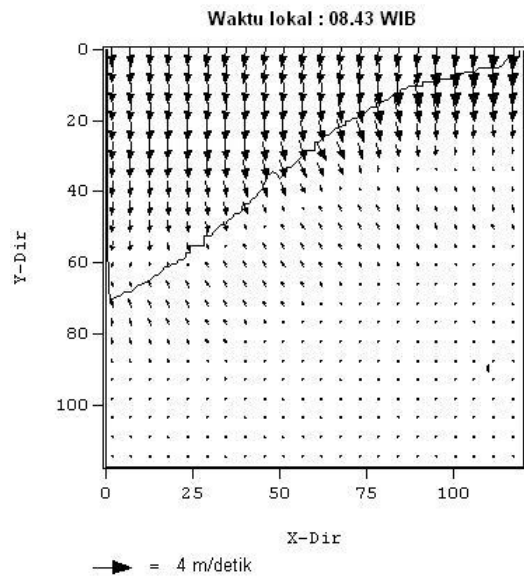
Gambar 9 Grafik penjalaran tsunami Aceh

Gambar 10a sampai dengan Gambar 10d memperlihatkan pola arus yang bersesuaian dengan elevasi muka air. Pada kondisi awal, perairan masih tenang sehingga belum terlihat arah arus. Pada saat menuju pasang, muka air mencapai puncak tertinggi di batas terbuka, air mengalir ke arah pantai dengan kecepatan 3,25 m/detik

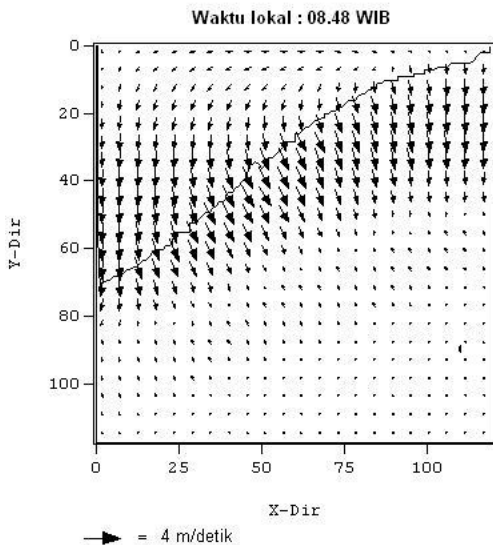
(Gambar 10b). Pada saat pasang maksimum, muka air tinggi masih terjadi di sekitar garis pantai (gambar 10c), kecepatan arus berkurang yaitu 3,08 m/detik. Pada saat fase surut arus berbalik dan mengalir ke arah laut. Kecepatan arus pada kondisi ini bertambah kuat, mencapai 4,78 m/detik (Gambar 10d).



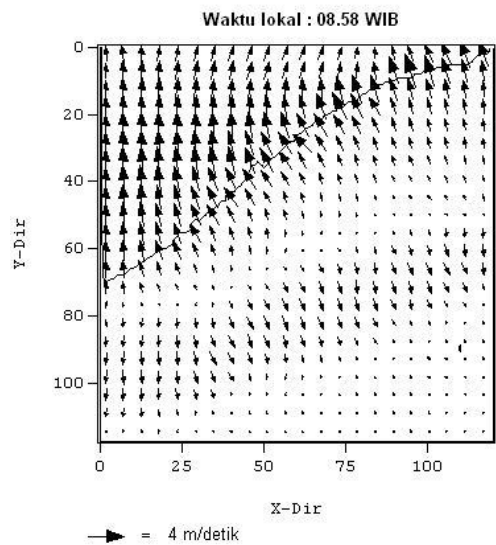
(a)



(b)



(c)



(d)

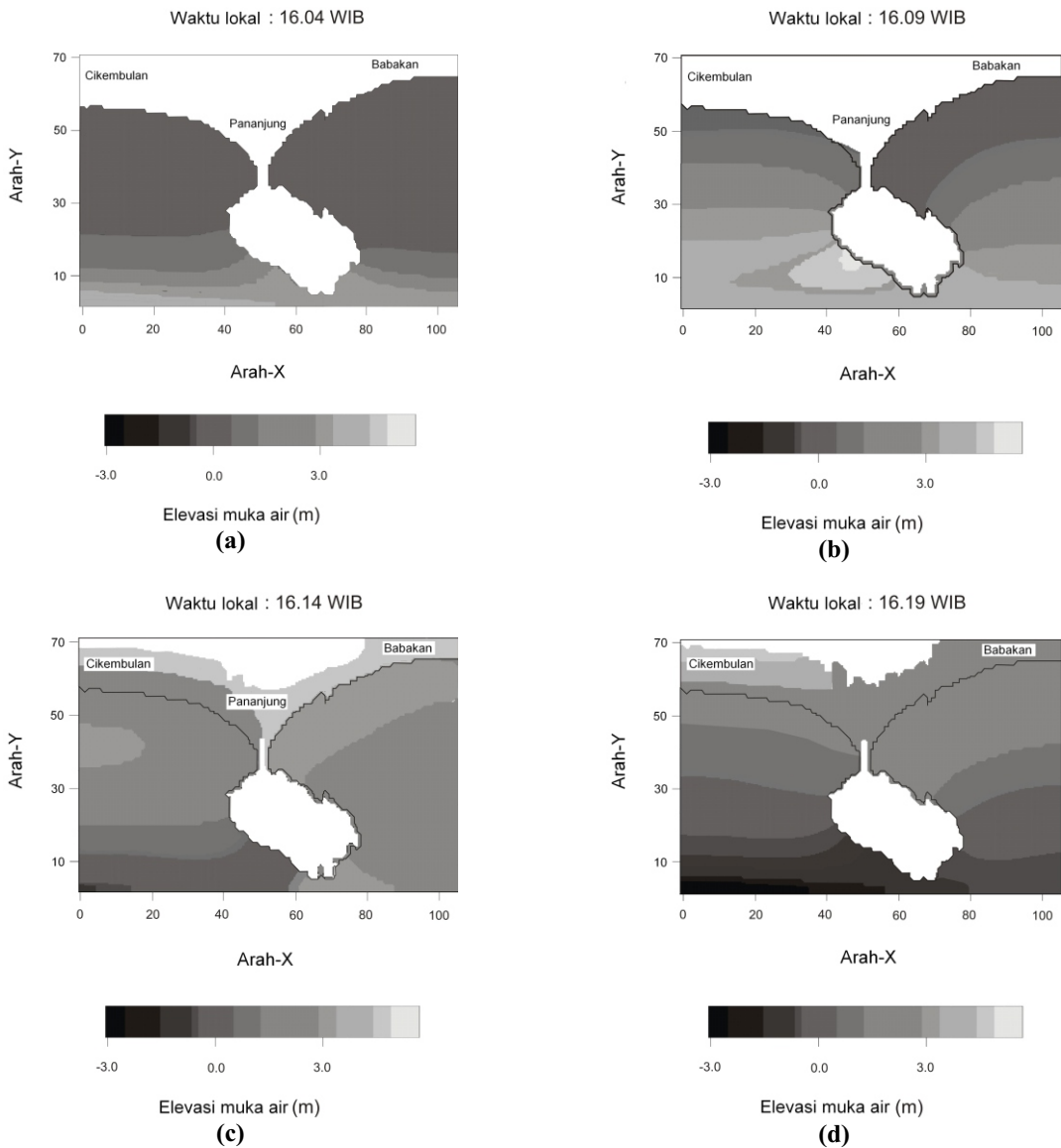
Gambar 10 Pola arus Banda Aceh pada penjalaran tsunami ke darat

2 Pangandaran

Gambar 11a memperlihatkan model domain dan kondisi muka air beberapa saat setelah terjadi gempa. Tinggi muka air atau tsunami di perairan dalam mencapai 3 meter, menjalar menuju pantai dan mengalami pengurangan tinggi muka air. Sampai di dekat pantai, tinggi muka air sudah sama dengan muka air laut rata-rata = 0, sehingga tidak ada air yang merayap ke darat. Pada waktu lokal pukul 16.09 WIB (Gambar 11b), muka air di perairan dalam mencapai lebih dari 4 meter, yaitu tinggi muka air maksimum yang terjadi. Meskipun di perairan dalam tinggi muka air mencapai maksimum, namun tinggi muka air di dekat pantai belum menunjukkan kenaikan muka air dan masih sama dengan muka air rata-rata sehingga air masih belum merayap ke darat. Pada waktu lokal pukul 16.14 WIB (Gambar 11c), tinggi muka air di perairan dalam menunjukkan kondisi surut, di pantai mengalami pasang dengan elevasi lebih dari 3 m. Pada fase berikutnya, muka air berada pada kondisi surut diperlihatkan dengan berkurangnya tinggi muka air mencapai 2,5 meter dibawah muka air rata-rata (Gambar 11d). Namun demikian kondisi surut di perairan dalam ini menimbulkan kondisi pasang yang lebih tinggi di darat, mencapai 4 meter. Dari pembahasan mengenai

kondisi muka air menunjukkan bahwa kondisi maksimum tsunami (pasang) di perairan dalam tidak mengakibatkan hal yang sama di darat. Sebaliknya kondisi surut di perairan dalamlah yang mengakibatkan tsunami di darat. Hal ini sesuai dengan perilaku tsunami sebagai gelombang panjang, yang terdiri dari puncak dan lembah gelombang. Bila pada satu lokasi mengalami kondisi lembah (surut), maka pada lokasi lain akan mengalami puncak (pasang).

Gambar 12 memperlihatkan grafik yang menunjukkan penjalaran tsunami pada arah-Y, mulai dari pusat gempa di perairan dalam sampai ke pantai. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada pukul 16.04 WIB tsunami telah terjadi di perairan dalam dengan tinggi muka air mencapai 4 meter. Pada pukul 16.09 WIB, muka air di perairan dalam mencapai lebih dari 5 meter yang merupakan tinggi muka air tertinggi pada tsunami Pangandaran. Namun demikian, penjalaran tsunami ini tidak mencapai ke darat. Pada pukul 16.14 WIB, tinggi muka air di perairan dalam sudah mulai berkurang, namun rayapan ke darat, mencapai 0,5 km dari garis pantai. Rayapan tsunami lebih jauh ke darat terjadi pada pukul 16.19 WIB, mencapai lebih dari 1 km dengan tinggi muka air maksimum mencapai 3 meter.



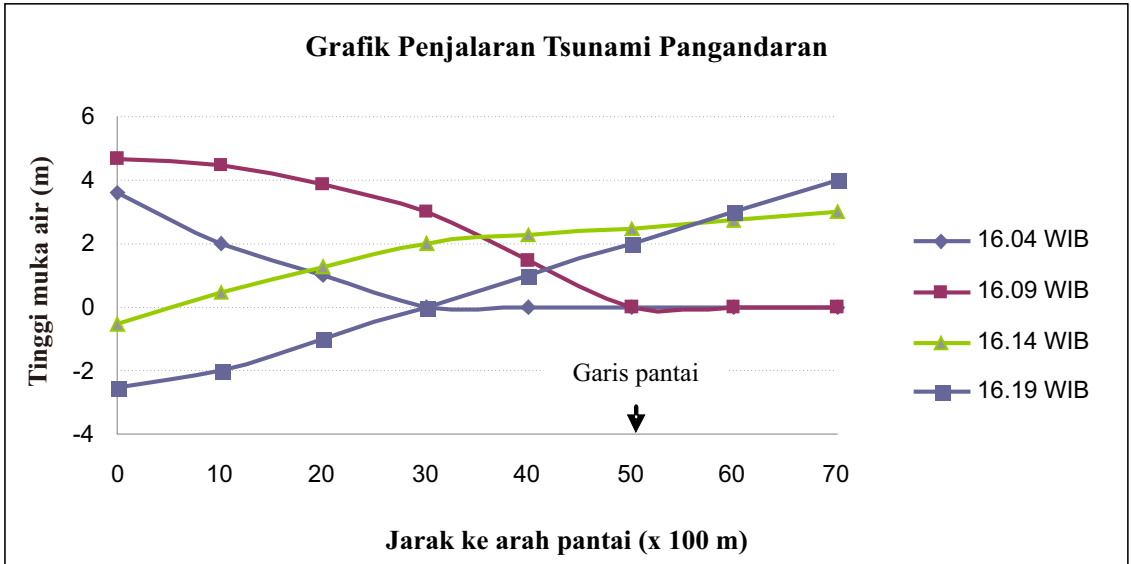
Gambar 11 Hasil simulasi penjalaran tsunami menuju pantai Pangandaran

Seperti juga tsunami Aceh, pada tsunami yang terjadi di Pangandaran ini tidak ada data pengamatan yang dapat dibandingkan dengan hasil simulasi. Namun demikian, tinggi muka air hasil simulasi sesuai dengan hasil investigasi yang dilakukan pasca tsunami yang menyatakan bahwa kenaikan muka air di daerah Babakan mencapai ± 3 meter, melimpas ke darat sampai sejauh ± 500 meter.

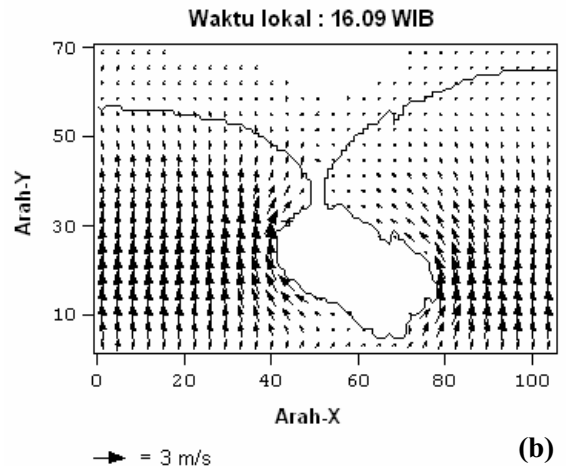
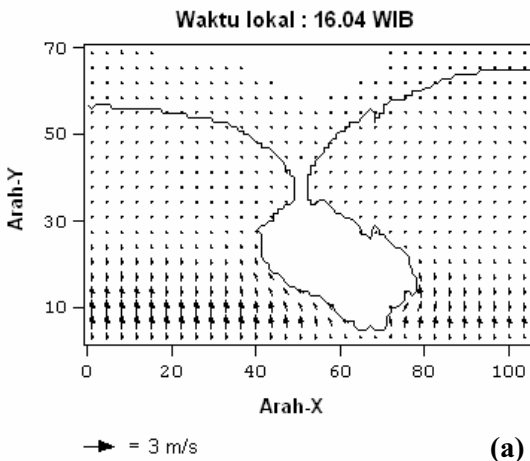
Gambar 13a sampai dengan Gambar 13d memperlihatkan pola arus yang bersesuaian dengan elevasi muka air. Pada waktu lokal pukul 16.04 WIB, kondisi muka air mulai berubah dari keadaan awal yang menunjukkan bahwa pengaruh gempa terhadap muka air mulai terasa. Pada kondisi tersebut, arus mulai terlihat bergerak ke arah pantai dengan kecepatan sekitar 1 m/detik. Beberapa menit kemudian yaitu saat air pada

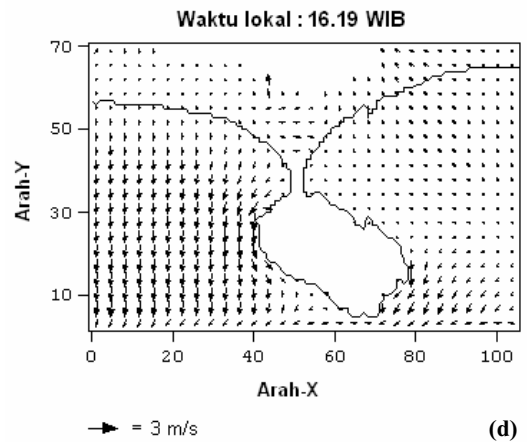
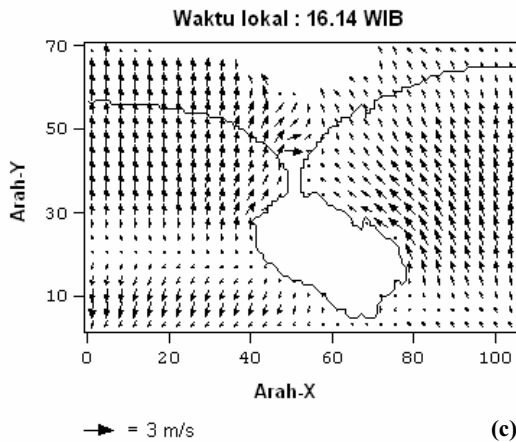
kondisi menuju pasang, arus dengan kecepatan mencapai 3,1 m/detik mulai terlihat bergerak menuju pantai (Gambar 13b). Kecepatan arus berkurang pada saat muka air berada pada kondisi menuju surut, yaitu 2,8 m/detik (Gambar 13c). Dari Gambar 13c terlihat bahwa pada saat tersebut

fase surut telah dimulai dengan berubahnya sebagian arah arus meninggalkan darat menuju laut. Pada saat surut, arus terlihat bergerak kembali ke laut dengan kecepatan mencapai 2,0 m/detik (Gambar 13d).



Gambar 12 Grafik penjalaran tsunami Pangandaran





Gambar 13 Pola arus Pangandaran Barat pada penjalaran tsunami ke darat

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- 1 Penerapan skema *wetting & drying* sangat penting dalam pemodelan hidrodinamika pantai dan muara, terutama pada lokasi dengan variasi muka air yang tinggi.
- 2 Salah satu contoh penerapan skema *wetting & drying* ini adalah pemodelan rayapan (*run up*) tsunami ke darat sehingga dapat diketahui daerah-daerah yang rawan terhadap genangan akibat tsunami.
- 3 Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketinggian muka air di lokasi sekitar masjid Baiturrahman (Aceh) mencapai lebih dari 3 m. Hal ini sesuai dengan pengamatan di lokasi kejadian pasca tsunami yang menunjukkan ketinggian muka air yang terlihat di tembok masjid.
- 4 Hasil simulasi di Pangandaran menyatakan bahwa kenaikan muka air mencapai ± 3 meter, melimpas ke darat sampai sejauh ± 500 meter., sesuai dengan investigasi lapangan yang dilakukan oleh tim Balai Pantai Puslitbang Sumber Daya Air.
- 5 Selain untuk simulasi rayapan gelombang akibat tsunami, skema WAD ini dapat juga diterapkan untuk kasus lain, misalnya limpasan akibat banjir rob di pantai atau limpasan karena kenaikan muka air laut akibat badai.

Dengan demikian, perlu data pengukuran yang lebih akurat sebagai pembandingan dengan hasil simulasi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Andojo Wurjanto, Ph.D dari Jurusan Teknik Kelautan ITB atas informasi data yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Anonim, (2006), *Identifikasi Kerusakan Bangunan Muara-Pantai Paska Tsunami Laut Selatan 17 Juli 2006*, Laporan Kegiatan Balai Pantai Puslitbang SDA, Hal 3.
- 2 Blumberg, A.F. and G.L. Mellor (1987): *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model*, Three - dimensional ocean model, Norman S. Heaps (ed), American Geophysical Union, Washington DC, Hal 1-16.
- 3 HydroQual (2002), *A Primer for ECOMSED Version 1.3; User Manual*, HydroQual Inc., New Jersey, Hal 7-11.
- 4 Oey, L.Y., (2005), *A wetting and drying scheme for POM*, Ocean Modelling 9 pp 133-150, ELSEVIER, Hal 2-4.
- 5 Oey, L.Y., (2006), *An OGCM with movable land-sea boundaries*, Ocean Modelling 16 pp 176-195, ELSEVIER, Hal 2-3.
- 6 Mellor, G.L., (2002), *User's Guide for a Three Dimensional Primitive Equation*, Numerical Ocean Model, Program in Atmospheric & Oceanic Sciences, Princeton University, 42 pp.