

APLIKASI MODEL NUMERIK KARAKTERISTIK GELOMBANG UNTUK KAJIAN KESESUAIAN LAHAN PENGEMBANGAN BUDIDAYA LAUT DI SITUBONDO, JAWA TIMUR

THE APPLICATION OF WAVE CHARACTERISTIC NUMERICAL MODEL FOR SITE SELECTION OF MARINE AQUACULTURE DEVELOPMENT IN SITUBONDO, EAST JAVA

Johan Risandi¹, Sophia L. Sagala², dan Widodo S. Pranowo²

¹Pusat Pengkajian dan Perencanaan Teknologi Kelautan dan Perikanan.

Jl. Pasir Putih I, Ancol, Jakarta Gedung II Balitbang KP Lantai 5

²Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Laut dan Pesisir.

Jl. Pasir Putih I, Ancol, Jakarta Gedung II Balitbang KP Lantai 4

E-mail: johanrisandi@gmail.com

Diterima tanggal: 8 Juli 2014, diterima setelah perbaikan: 11 Maret 2015, disetujui tanggal: 27 Maret 2015

ABSTRAK

Model numerik *XBeach* telah digunakan untuk mensimulasikan penjalaran gelombang laut di perairan Klatakan, Situbondo, Jawa Timur dan hasilnya dipakai untuk analisis kesesuaian lahan budidaya dengan Keramba Jaring Apung (KJA). Data yang digunakan untuk pemodelan ini adalah data batimetri yang diperoleh dari pengukuran langsung, serta gelombang dan angin dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, dan *National Centers for Environmental Prediction-National Oceanic and Atmospheric Administration* (NCEP-NOAA) Amerika Serikat. Hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi gelombang signifikan perairan Situbondo adalah 0,3 m dengan periode gelombang 4,1 detik dominan dari arah timur sedangkan angin dominan datang dari arah barat laut. Pembudidaya perlu mewaspadaai kemungkinan gelombang dengan tinggi mencapai 1,5 m dan angin kuat dengan kecepatan lebih dari 16 m/detik yang terjadi pada awal dan pertengahan tahun. Validasi model dengan perhitungan analitik mengindikasikan *XBeach* telah melakukan over-estimasi perhitungan tinggi gelombang pada daerah studi dengan kesalahan relatif rata-rata sebesar 16,22% yang diduga disebabkan oleh perbedaan pendekatan pada kedalaman dimana proses *shoaling* terjadi. Klasifikasi kesesuaian lahan menunjukkan adanya sebaran daerah sangat sesuai hingga tidak sesuai untuk budidaya dengan KJA pada perairan tersebut. Hasil tersebut diverifikasi dengan citra Ikonos melalui *Google Earth*, dimana terlihat bahwa KJA para pembudidaya terletak di perairan yang dikategorikan sangat sesuai untuk lahan budidaya dengan tinggi gelombang di area tersebut kurang dari 0.6 meter.

Kata kunci: karakteristik gelombang, *XBeach*, budidaya laut, keramba jaring apung, kesesuaian lahan, Situbondo

ABSTRACT

*Xbeach numerical model has been used to simulate wave propagation in Klatakan – Situbondo, East Java and the results were used to analyze the site suitability for mariculture using Floating Net Cage (FNC). Parameters used in the model were bathymetric which was obtained from direct measurement, as well as wave and wind data which were obtained from, Indonesian Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics, and National Centers for Environmental Prediction-National Oceanic and Atmospheric Administration, respectively. The results showed that a significant wave height recorded in the study area was 0.3 m with wave period of 4.1 s, propagating dominantly from East direction. On the other hand, the wind dominantly moved from north to west direction. The farmers, therefore, need to increase their awareness toward possible high waves of 1.5 m and winds of more than 16 m/s occurred in the beginning and middle of the year. Model validation using analytical approach indicated *XBeach* has overestimated wave height calculation on the study area with mean relative error of 16,22% due to different approach in depth at which shoaling process occurred. The site classification analysis showed the area distribution for FNC installation varied from unsuitable to very suitable. The result is verified using Ikonos satellite imagery through Google Earth. It shows that those FNC are located inside the area which is categorized as very feasible for mariculture with the wave height is less than 0.6 m.*

Keywords: wave characteristics, *XBeach* model, mariculture, floating net cage, site suitability, Situbondo

PENDAHULUAN

Budidaya laut dewasa ini semakin menarik untuk dikembangkan seiring dengan meningkatnya permintaan dunia akan produk laut seperti ikan laut, kerang-kerangan dan rumput laut. Peningkatan konsumsi mencapai rata-rata 3,2% pertahun dari 9.9 kg pada tahun 1960 menjadi 19.2 kg/tahun pada tahun 2012 (FAO, 2014). Berbagai jenis ikan laut seperti kerapu, kakap maupun biota lain seperti abalon dan rumput laut dibudidayakan menggunakan wadah budidaya seperti kurung tancap, rakit, *longline* maupun Karamba Jaring Apung (KJA). Pemilihan lokasi yang tepat merupakan salah satu faktor penentu keberhasilan budidaya laut, karena laut memiliki kondisi yang kompleks baik kondisi teknis seperti kondisi gelombang, arus, pH atau ammonia perairan maupun kondisi non-teknis seperti penggunaan lahan oleh sektor lain atau kondisi sosial ekonomi masyarakat.

Salah satu kondisi teknis yang sangat berpengaruh pada kelayakan suatu perairan dijadikan lokasi budidaya laut dengan KJA adalah gelombang perairan. Gelombang yang tinggi dapat merusak konstruksi wadah budidaya yang umumnya terbuat dari bahan sederhana seperti kayu dan plastik. Selain itu, gelombang tinggi juga dapat mengganggu kegiatan operasional KJA dan berpotensi memberikan dampak negatif pada biota dalam KJA (BBL, 2010).

Untuk itu diperlukan informasi karakteristik gelombang pada perairan tersebut, sehingga KJA dapat ditempatkan pada lokasi yang terlindung dari gelombang tinggi. Karakteristik gelombang suatu perairan dapat diketahui dengan menggunakan model numerik penjalaran gelombang atau menggunakan metode pengukuran dengan teknik *in situ* seperti *wave recorder* (baik manual maupun sensor) maupun penginderaan jauh dengan citra dan altimetri (Holthuijsen, 2007). Saat ini, terdapat banyak penelitian tentang penggunaan model numerik penjalaran gelombang untuk kesesuaian lahan budidaya laut seperti Windupranata, 2007; Ferreira *et al.*, 2014; serta Kristiansen dan Faltinsen, 2014.

Salah satu model numerik penjalaran gelombang adalah *XBeach*, yang dikembangkan oleh Roelvink *et al.* (2009). Model ini biasa digunakan untuk

memodelkan respon pesisir terhadap kondisi ekstrim perairan (McCall, 2008; McCall *et al.*, 2010) dan secara khusus diaplikasikan untuk mengevaluasi desain gumuk pasir ketika terjadi badai (Abanades, Greaves dan Iglesias, 2014; Armaroli, Grottoli, Harley dan Ciavola, 2013; Dissanayake, Brown dan Karunaratna, 2014). Modifikasi *XBeach* lebih lanjut digunakan pada pantai dengan sedimen ukuran besar atau *gravel beach* (Williams, de Alegria-Arzaburu, McCall dan Van Dongeren, 2012; Jamal, Simmonds dan Magar, 2014) dan pantai berkarang (Van Dongeren *et al.*, 2013).

Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan *XBeach* untuk memodelkan penjalaran gelombang yang terjadi pada perairan pantai Situbondo. Hasil analisis pemodelan digunakan untuk memperoleh informasi daerah yang sesuai untuk penempatan KJA.

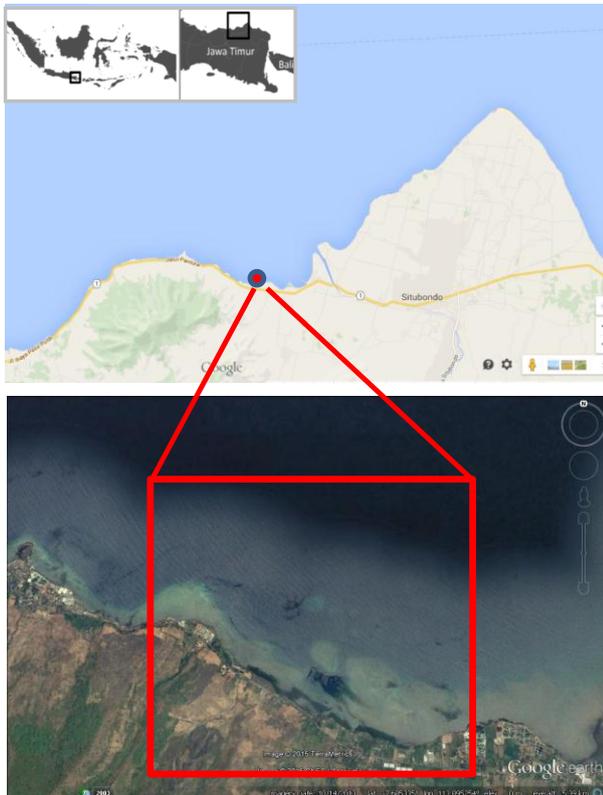
Beberapa persamaan yang digunakan pada *XBeach* seperti penjalaran gelombang pendek, gelombang perairan dangkal non-stasioner merupakan persamaan yang umum digunakan pada model numerik penjalaran gelombang, sehingga *XBeach* memungkinkan untuk diaplikasikan pada bidang lain, yaitu pemilihan lahan budidaya laut, dengan melakukan pengaturan pada model dan input data.

Beberapa asumsi digunakan dalam studi ini antara lain: (a) Gelombang yang terjadi pada lokasi adalah gelombang angin (*wind wave*) dimana kondisi gelombang berbanding lurus dengan kondisi angin dan (b) data gelombang yang digunakan dalam studi merupakan representasi data iklim gelombang (pengukuran dalam rentang waktu lama). (c) Data angin yang digunakan sudah mencakup kondisi monsun barat, monsun timur dan monsun peralihan. (d) Tidak terjadi perubahan pada kondisi dasar perairan (batimetri) yang bisa mempengaruhi deformasi gelombang. (e) Gelombang dan angin yang dipakai sebagai input model adalah nilai ekstrim dari hasil analisis data sehingga hasil simulasi model dianggap dapat mewakili kondisi perairan untuk digunakan pada analisis kesesuaian lahan.

BAHAN DAN METODE

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Survei pengukuran telah dilakukan pada bulan Mei 2011 di perairan pesisir Situbondo Jawa Timur. Lokasi tersebut merupakan sentra budidaya laut dengan produk utama ikan kerapu dan ikan kakap. Penelitian dikonsentrasikan di perairan Desa Klatakan yang memiliki garis pantai sepanjang 3,3 km pada koordinat 113,887439 BT dan 7,69835 LS hingga 113,914936 BT dan 7,69835 LS (Gambar 1).

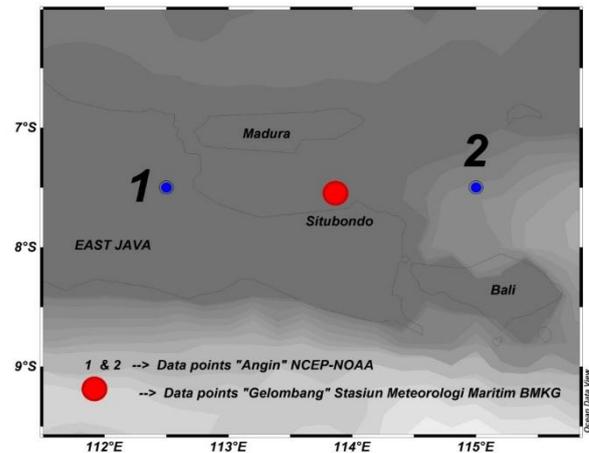


Gambar 1. Denah lokasi penelitian (kotak merah).
 Figure 1. Location of the study (inside the red box).
 Sumber: Citra Ikonos Digital Globe kompilasi dari Google Earth 2013

2.2 Bahan dan Data

Parameter yang diukur pada survei laut di lokasi penelitian adalah kedalaman (batimetri). Pengukuran dilakukan menggunakan Echosunder Garmin 421 yang kemudian dikoreksi terhadap pasang surut dan titik ikat darat. Sementara, data tinggi periode dan arah gelombang dengan resolusi temporal satu (1) jam di sepanjang tahun 2011 diperoleh dari Stasiun Meteorologi Maritim BMKG Tanjung Perak Surabaya. Data tersebut berasal dari hasil analisis data satelit MeteoFrance yang dalam analisisnya mengabaikan parameter kedalaman perairan, sehingga untuk keakuratan,

data gelombang diambil pada lokasi perairan yang relatif dalam, sekitar 6 km dari garis pantai pada 113,8961 BT dan 7,634039 LS. Data angin, untuk resolusi temporal dan periode yang sama, diperoleh dari interpolasi 2 stasiun data *National Centers for Environmental Prediction-National Oceanic and Atmospheric Administration* (NCEP – NOAA Amerika Serikat) *Reanalysis data set* (Kalnay *et al.*, 1996) pada titik 4 dan 5 (Gambar 2).



Gambar 2. Lokasi data angin NCEP-NOAA (titik 1 dan 2) dan data gelombang (titik merah).

Figure 2. NCEP-NOAA points for wind data (point 1 and 2) and wind data (red point))

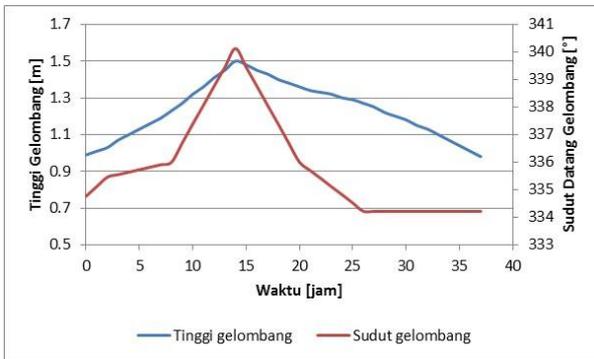
Sumber: Hasil pengolahan data NCEP-NOAA

2.3 Input dan Desain Model

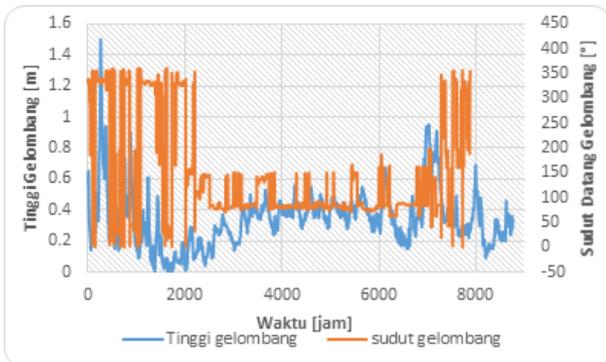
Model numerik penjalaran gelombang dibuat untuk mensimulasikan mekanisme yang terjadi pada proses transformasi gelombang, diantaranya adalah pendangkalan (*shoaling*), refraksi, refleksi, difraksi dan gelombang pecah yang terjadi akibat perubahan kedalaman (Young, 1999).

Penjalaran gelombang di perairan daerah studi dimodelkan dengan menggunakan *XBeach* versi *curvilinear* grid yang dikembangkan Roelvink *et al.* (2012). *Xbeachcurvilinear* grid merupakan penyempurnaan dari versi sebelumnya yang menggunakan grid *rectilinear*. Keuntungan dari versi *curvilinear* adalah jumlah grid lebih efisien sehingga komputasi menjadi lebih cepat (Risandi, 2011). *XBeach* memerlukan input utama berupa data batimetri terpisah dalam format xyz grid. Grid pada penelitian ini dibangun dengan menggunakan *Delft3D open source*, sedangkan data xyz disusun dengan menggunakan aplikasi Matlab.

Data gelombang dan angin, sebelum digunakan sebagai input pemodelan gelombang, terlebih dahulu dianalisis secara statistik untuk mendapatkan nilai yang signifikan terkoreksi (Gambar 3(a)). Untuk kepentingan penempatan KJA, input yang digunakan pada *XBeach* adalah kondisi angin dan gelombang maksimal (dalam hal ini $H_{1/100}$) yang terjadi di area studi sehingga dapat diketahui lokasi yang benar-benar aman dari kemungkinan serangan gelombang. Simulasi dilakukan menggunakan kejadian ekstrim pada tahun 2011. Periode tersebut terjadi pada awal tahun dengan durasi 37 jam yang disajikan pada Gambar 3(b).



(a)



(b)

Gambar 3. Gelombang tinggi ($H_{1/100}$) yang tercatat berdasar analisis data Satelit MétéoFrance pada periode (a) tahun 2011 (1 tahun) dan (b) 11-13 Januari 2011
 Figure 3. Recorded high wave heights ($H_{1/100}$) based on MétéoFrance Satellite analysis during the period of 2011 (1 year) and 11-13 Januari 2011

Sumber: Hasil pengolahan data

2.4 Pemodelan Gelombang *Xbeach*

Gelombang dihasilkan dengan menyelesaikan persamaan kesetimbangan gerak gelombang (Roelvink *et al.*, 2009).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma} \quad (1)$$

Dengan pergerakan gelombang A adalah

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

Keterangan notasi:

- θ adalah sudut gelombang datang terhadap sumbu x
- S_w adalah densitas energi gelombang pada tiap arah (x and y)
- σ adalah frekuensi gelombang intrinsik

Cepat rambat gelombang pada sumbu x dan y diberikan dengan persamaan:

$$C_x(x, y, t, \theta) = C_g \cos(\theta) + u^L \quad (3)$$

$$C_y(x, y, t, \theta) = C_g \sin(\theta) + v^L \quad (4)$$

u^L dan v^L adalah kecepatan arus rata-rata berbasis langrangian, c_g adalah cepat rambat kelompok gelombang yang didapat dengan teori gelombang linier. Sedangkan cepat rambat gelombang c untuk variabel θ diberikan oleh persamaan:

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Disipasi gelombang untuk gelombang stasioner menggunakan persamaan yang dikembangkan Baldock, Holmes, Bunker dan Van Weert (1998).

$$\bar{D} = \frac{1}{4} \alpha Q_b \rho g f_{rep} (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad (6)$$

dengan $\alpha = 0(1)$ dan f_{rep} adalah representasi frekuensi instrinsik. Fraksi gelombang pecah Q_b adalah

$$Q_b = \exp \left[- \left(\frac{H_b^2}{H_{rms}^2} \right) \right] \quad (7)$$

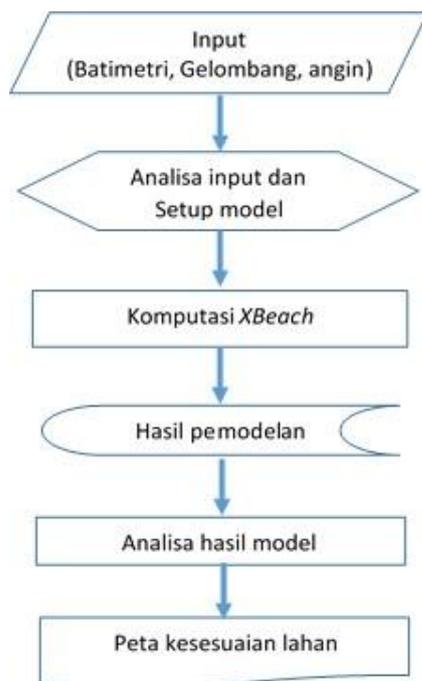
dengan tinggi gelombang pecah

$$H_b = \frac{0.88}{k} \tanh \left[\frac{\gamma kh}{0.88} \right] \quad (8)$$

γ adalah parameter kalibrasi dan k adalah bilangan gelombang. Stress angin diperoleh berdasar pada persamaan kesetimbangan momentum dari Ruessink, Miles, Feddersen, Guza dan Elgar (2001).

Beberapa parameter khusus yang digunakan untuk memodelkan respon pesisir seperti gelombang frekuensi rendah, sudut longsor (*avalanching formula*) dan transport sedimen tidak diaktifkan karena tidak diperlukan dalam studi ini. Penjelasan lengkap tentang *XBeach* bisa didapatkan di Roelvink *et al.* (2010).

Grid model pada studi ini berukuran 132 (nx , sumbu tegak lurus garis pantai dengan nilai 0 dimulai dari kondisi batas terbuka) x 156 (ny , sumbu sejajar garis pantai). Untuk menjamin kestabilan komputasi, time step simulasi dihitung *XBeach* secara otomatis berdasar angka kestabilan numerik CFL (Courant-Freidrichs-Lewy) (Anderson, 1995) yang diberikan pada input, yaitu 0.9. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir penelitian
Figure 4. Flow chart of the research
Sumber: Dokumentasi pribadi

2.5 Analisis kesesuaian lahan

Peta kesesuaian lahan budidaya diperoleh dengan mengklasifikasikan tinggi gelombang hasil pemodelan *XBeach* pada tiap grid kedalam nilai bobot (*score*) yang menyatakan tingkat kesesuaian lahan untuk budidaya laut berdasarkan Windupranata (2007), dengan deskripsi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat kesesuaian lahan budidaya laut berdasarkan tinggi gelombang
Table 1. Classification of mariculture suitability area based on wave height parameter

Nilai Bobot (Score)	Tinggi Gelombang (m)	Tingkat Kesesuaian
3	≤ 0.6	Sangat sesuai
2	0.6-1.0	Sesuai
1	1.0-1.5	Kurang sesuai
0	> 1.5	tidak sesuai

Sumber: Windupranata, 2007

2.6 Verifikasi hasil analisis kesesuaian lahan

Karena tidak terdapat data pengukuran gelombang secara langsung di lapangan, verifikasi yang dilakukan adalah verifikasi pada hasil analisis kesesuaian lahan. Verifikasi hasil dilakukan dengan cara meng"overlay" hasil analisis (dalam bentuk yang dikenali oleh Google Earth, yaitu *.kml) dengan posisi KJA pembudidaya yang teridentifikasi melalui citra satelit Google Earth pada tahun 2003-2013. Pada verifikasi ini digunakan pula asumsi bahwa pembudidaya lokal memiliki pengetahuan terhadap iklim gelombang (kondisi gelombang dalam jangka panjang) daerah Klatakan, Situbondo, sehingga mereka menempatkan KJAny pada daerah yang terlindung dari gelombang tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

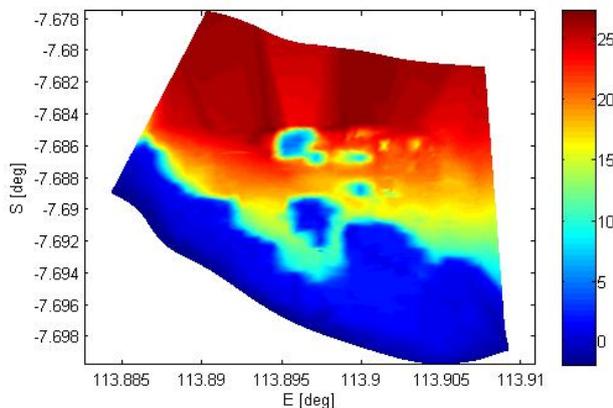
3.1 Kondisi umum pesisir Klatakan, Situbondo, Jawa Timur

Perairan Klatakan, Situbondo, Jawa Timur merupakan daerah strategis untuk pengembangan budidaya laut khususnya menggunakan sistem KJA. Daerah tersebut dekat dengan akses transportasi dan di sekitar daerah tersebut banyak didirikan usaha pembenihan ikan laut sehingga benih yang siap tebar dapat langsung dipindahkan ke dalam KJA. Perairan tersebut mempunyai

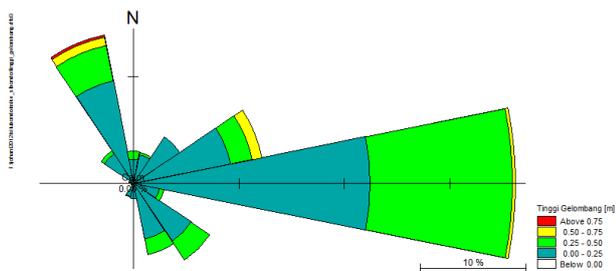
gugusan karang tepi dengan karakteristik pantai berpasir yang landai pada area dekat daratan dan kedalaman perairan (batimetri) seperti disajikan pada Gambar 5.

3.2 Kondisi angin dan gelombang

Perairan Klatakan dapat dikategorikan sebagai perairan yang tenang. Jarak seret gelombang relatif pendek karena berhadapan dengan kepulauan Madura menjadikan tinggi gelombang pada perairan tersebut relatif kecil. Analisis data BMKG tahun 2011 menunjukkan gelombang pada titik observasi dominan datang dari arah timur dengan ketinggian gelombang signifikan sekitar 0,3 m (Gambar 6) dengan periode gelombang signifikan 4,1 detik. Perairan Klatakan terlindung dari serangan gelombang tinggi selama musim timur karena terhalang oleh daratan di sebelah timur lokasi (lihat Gambar 1). Ancaman bagi pembudidaya datang dari gelombang tinggi pada musim barat.



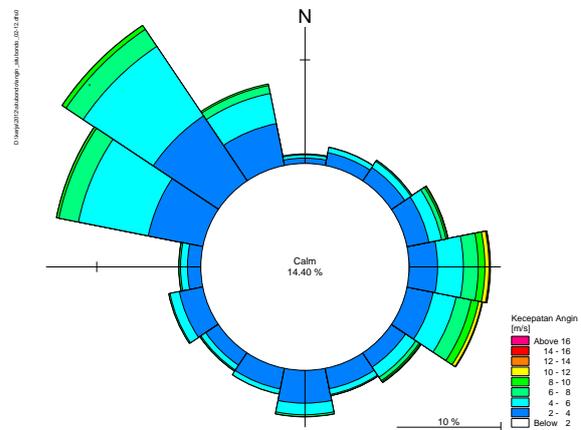
Gambar 5. Peta batimetri (unit kedalaman dalam meter)
 Figure 5. Bathymetry of study area (depth in meter)
 Sumber: Hasil pengolahan data



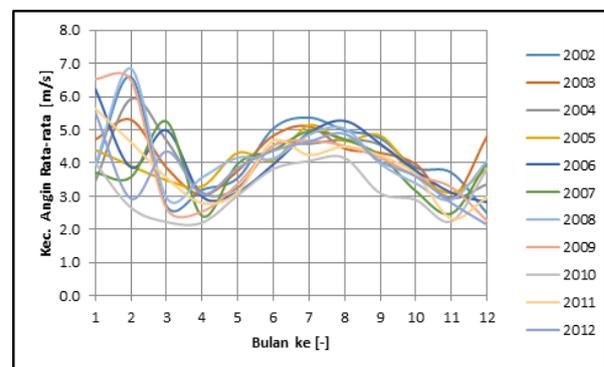
Gambar 6. Mawar gelombang perairan Situbondo tahun 2011
 Figure 6. Wave rose of Situbondo in 2011
 Sumber: Hasil pengolahan data

Secara spesifik, analisis data gelombang $H_{1/100}$ menunjukkan kejadian gelombang tinggi pada awal tahun dengan ketinggian mencapai 1,5 m (lihat Gambar 3) yang kemungkinan membahayakan struktur KJA yang umumnya terbuat dari kayu.

Analisis data angin dari NOAA selama 10 tahun menunjukkan angin bertiup secara dominan dari Barat Laut dengan frekuensi kejadian mencapai 33,81 %. Kecepatan angin dominan adalah 2-4 m/detik dengan frekuensi kejadian mencapai 41,62 % (Gambar 7). Kecepatan angin rata-rata bulanan menunjukkan angin bertiup relatif lebih kuat pada sekitar bulan Januari sampai Maret dan bulan Juni sampai September (Gambar 8). Hal itu perlu diwaspadai karena angin kencang tersebut dapat menyebabkan gelombang tinggi yang dapat mengganggu aktifitas budidaya.



Gambar 7. Mawar angin perairan Situbondo
 Figure 7. Wind rose of Situbondo
 Sumber: Hasil pengolahan data

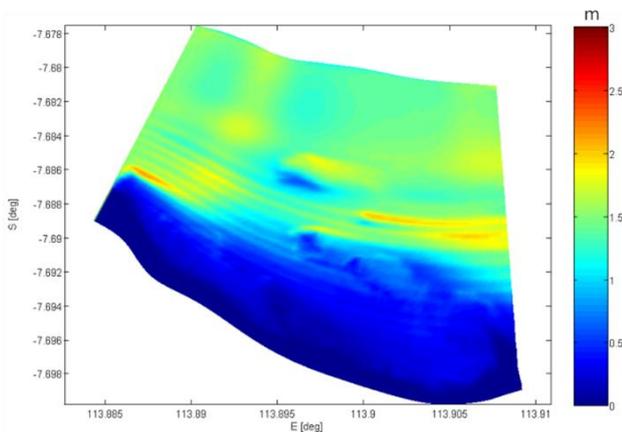


Gambar 8. Kecepatan angin rata-rata tiap bulan selama 10 tahun
 Figure 8. Monthly average of wind speed for 10 years duration
 Sumber: Hasil pengolahan data

3.3 Simulasi penjalaran gelombang

Tinggi gelombang signifikan tahun 2011 pada perairan Klatakan berdasar data BMKG hanya mencapai 0,3 m. Untuk kepentingan penempatan KJA, input data gelombang pada simulasi ini diambil dari kejadian gelombang ekstrim yang tercatat pada perairan tersebut (lihat Gambar 3).

Input gelombang pada simulasi merupakan gelombang ekstrim pada tahun 2011 yang terjadi pada awal tahun selama 37 jam dengan tinggi gelombang pada kisaran 1 sampai 1,5 m. Gelombang menjalar dari arah barat laut membentuk sudut sekitar 340° terhadap sumbu utara. Hasil simulasi penjalaran gelombang di perairan Klatakan ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Tinggi gelombang hasil simulasi
Figure 9. Snapshot of wave height after simulation result

Sumber: Hasil pengolahan data

Berdasarkan hasil model, tinggi dan energi gelombang meningkat dipengaruhi oleh berkurangnya kedalaman. Gelombang kemudian pecah meter yang diikuti dengan berkurangnya tinggi dan energi gelombang. Sementara itu, disipasi energi gelombang meningkat secara drastis setelah terjadi gelombang pecah dan berkurang ketika mencapai pinggir pantai seperti yang disajikan pada Gambar 10.

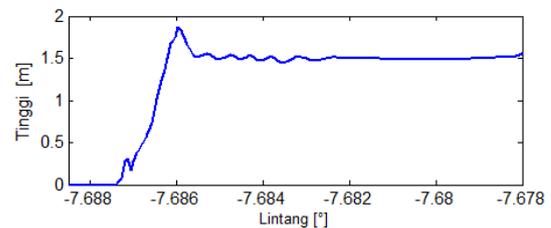
Pada bagian tengah domain model, terdapat gugusan karang yang mempunyai kedalaman kurang dari 4 m (lihat Gambar 5). Kondisi itu menyebabkan gelombang pecah lebih cepat pada lokasi tersebut sebelum mencapai pantai. Gugusan karang tersebut melindungi daerah di belakangnya dari hempasan gelombang.

3.4 Validasi pemodelan gelombang

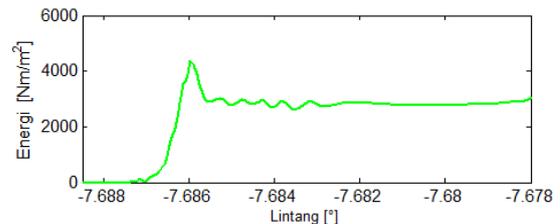
Validasi hasil model dilakukan mengacu pada Rudyani, Armono dan Sujantoko (2012) dengan mengambil titik-titik tegak lurus garis pantai mulai dari kondisi batas terbuka (laut lepas) hingga garis pantai untuk mendapatkan pola penjalaran gelombang dari laut dalam kepantai. Tinggi gelombang hasil model pada tiap kedalaman dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik penjalaran gelombang untuk mengetahui persen kesalahan relatif berdasar persamaan sebagai berikut:

$$Error = \frac{|H' - H|}{H} \times 100\% \quad (9)$$

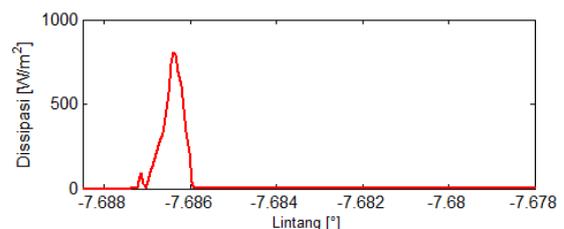
dimana H' adalah tinggi gelombang hasil model dan H adalah tinggi gelombang perhitungan analitik.



(a)



(b)



(c)

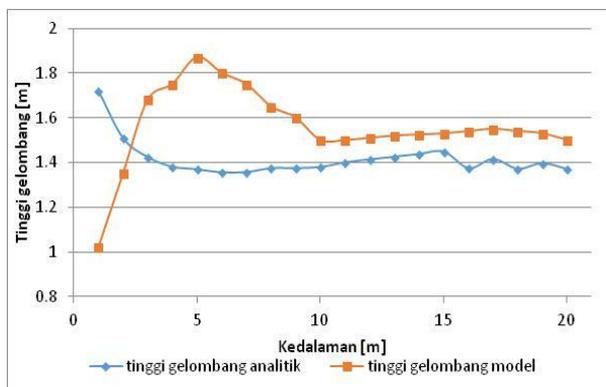
Gambar 10. Potongan melintang untuk tinggi (a), energi (b), dan disipasi (c) gelombang hasil simulasi.

Figure 10. Cross shore profile of wave height (a), energy (b), and dissipation (c) after simulation result

Sumber: Hasil pengolahan data

Hasil analisis persentase kesalahan relatif menunjukkan perbedaan tinggi gelombang model dengan perhitungan secara analitik memiliki kesalahan relatif rata-rata mencapai 16,22 %, dimana *XBeach* secara umum melakukan perhitungan tinggi gelombang pada lokasi lebih besar dari perhitungan analitik (Gambar 11).

Perbedaan pola perubahan tinggi gelombang pada kedalaman 3-10 m antara perhitungan *Xbeach* dan perhitungan analitik kemungkinan disebabkan oleh perbedaan pendekatan terjadinya proses *shoaling*. Pada perhitungan *Xbeach*, pengaruh *shoaling* (kenaikan tinggi gelombang) dimulai pada kedalaman sekitar 9 m dan gelombang pecah pada kedalaman 4 sampai 5 m. Sementara perhitungan analitik menunjukkan kenaikan tinggi gelombang dimulai pada kedalaman 4 m dan pecah pada kedalaman sekitar 2 m. Sedangkan pada kedalaman > 10m menunjukkan pola yang sama.



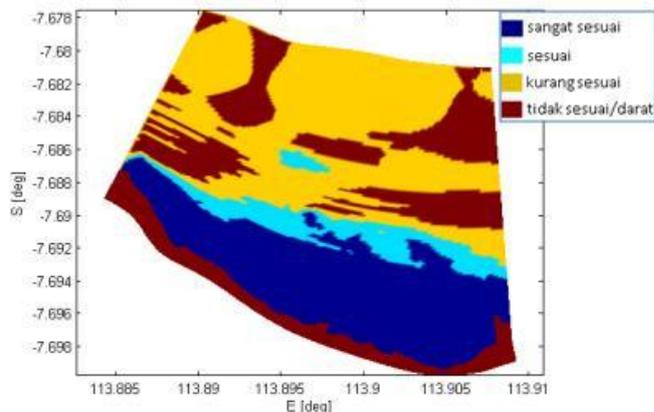
Gambar 11. Pebandingan perhitungan tinggi gelombang model *Xbeach* dan solusi analitik
Figure 11. Comparison of calculated wave heights from Xbeach model and analytical solution
 Sumber: Hasil pengolahan data

3.5 Analisis kesesuaian lahan

Kesesuaian lahan untuk budidaya dibuat dengan mengklasifikasi hasil simulasi model *XBeach* pada setiap grid berdasarkan pada Tabel 1. Hasil analisis menunjukkan adanya empat (4) kategori kesesuaian lahan budidaya yaitu: tidak sesuai tidak sesuai, kurang sesuai, sesuai dan sangat sesuai untuk kegiatan budidaya laut (Gambar 12).

Perairan yang sangat sesuai dan sesuai untuk budidaya laut terletak pada perairan dangkal dekat dengan garis pantai sampai kedalaman kurang lebih 7 meter. Kesesuaian pada daerah tersebut

diperoleh karena tinggi gelombang kecil akibat mengalami deformasi. Pada beberapa lokasi studi terdapat perairan yang kurang sesuai dan tidak sesuai untuk budidaya laut karena tinggi gelombang pada lokasi tersebut dapat lebih dari 1 m. Persentase daerah yang tidak sesuai, kurang sesuai, sesuai dan sangat sesuai untuk budidaya laut berturut-turut adalah 18,08 %, 28,35 %, 6,65 % dan 47 %.

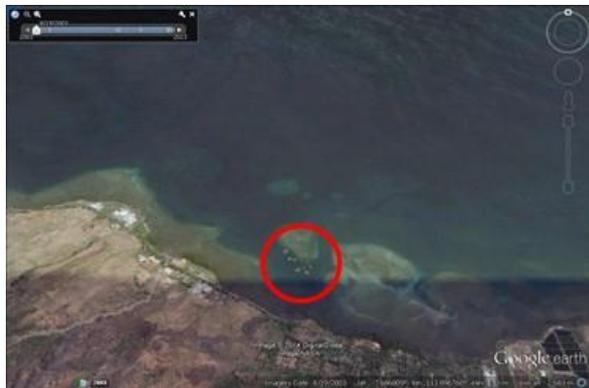


Gambar 12. Sebaran lokasi kesesuaian lahan budidaya laut di perairan pesisir Klatakan, Situbondo berdasarkan parameter tinggi gelombang
Figure 12. Distribution of mariculture suitability area in Klatakan, Situbondo, based on wave height parameter
 Sumber: Hasil pengolahan data

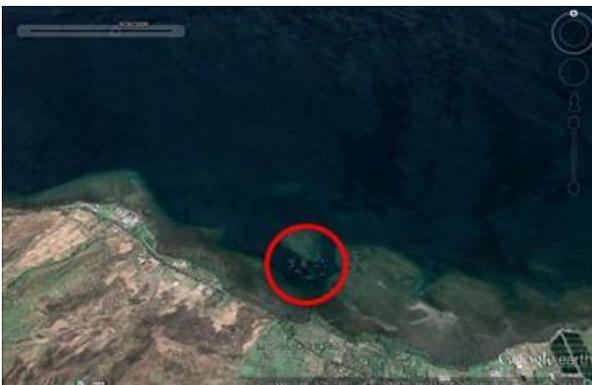
3.6 Verifikasi hasil analisis kesesuaian lahan

Wilayah perairan desa Klatakan Situbondo telah lama digunakan sebagai tempat budidaya laut dengan KJA. Selain pembudidaya lokal, terdapat beberapa pengusaha luar daerah yang melakukan investasi KJA. Lokasi tersebut juga digunakan untuk kegiatan riset terkait budidaya. Terdapat KJA milik Balai Budidaya Air Payau (BBBAP) Situbondo yang digunakan untuk menempatkan komoditas hasil penelitian mereka berupa ikan Kerapu dan ikan Kakap. Mulai tahun 2011, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Budidaya Laut Gondol-Bali melakukan aktivitas penelitian dengan komoditas Abalon. Hasil analisis citra *Google Earth* menunjukkan bahwa KJA telah diaplikasikan di daerah tersebut selama lebih dari 10 tahun (Gambar 13). Pembudidaya menempatkan KJA di belakang gugusan karang sehingga terlindung dari kemungkinan gelombang tinggi.

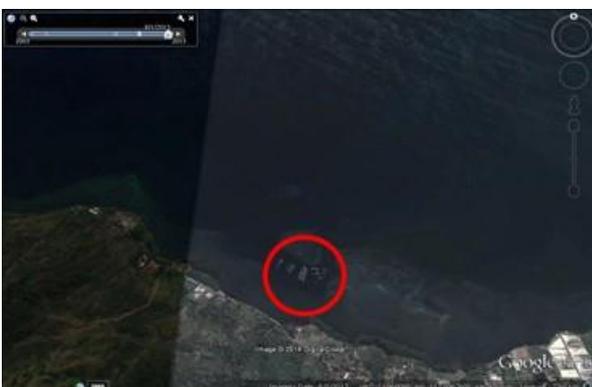
Hasil *overlay* analisis kesesuaian lahan dengan citra *Google Earth* menunjukkan bahwa KJA para pembudidaya terletak di daerah yang dikategorikan sangat sesuai untuk lahan budidaya dengan tinggi gelombang di area tersebut kurang dari 0,6 meter (Gambar 14).



(a)



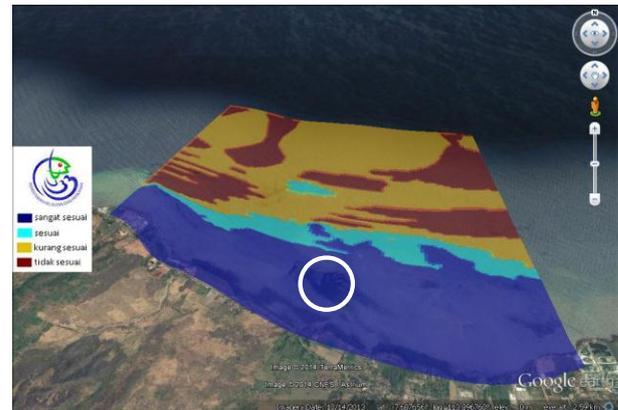
(b)



(c)

Gambar 13. Posisi KJA (lingkaran merah) di perairan Situbondo pada tahun 2003 (a), 2009 (b) dan 2013 (c).
Figure 13. FNCs position (red circles) in Situbondo waters in the year of 2003(a), 2009(b) and 2013(c).
 Sumber: Citra Ikonos *Digital Globe* kompilasi dari *Google Earth* 2003-2013

Akan tetapi, dalam finalisasi penempatan KJA, selain parameter tinggi gelombang, pembudidaya juga harus memperhatikan parameter fisik perairan seperti kecepatan arus, kedalaman perairan. Selain itu, diperlukan kajian parameter lain seperti parameter kimia, parameter biologi dan parameter non teknis lainnya seperti parameter sosial dan ekonomi.



Gambar 14. *Overlay* antara sebaran lokasi kesesuaian lahan budidaya laut berdasar tinggi gelombang dengan lokasi KJA (lingkaran putih) pada citra *Google Earth*.
Figure 14. Overlay of mariculture suitability area distribution based on wave height parameter and FNCs location (white circle) detected on Google Earth imagery)

Sumber: Hasil analisis

KESIMPULAN DAN SARAN

XBeach yang telah diaplikasikan secara luas untuk memodelkan respon pesisir pada kondisi ekstrim (badai) juga dapat diaplikasikan untuk pemilihan lokasi budidaya berdasar tinggi gelombang. Hal itu dilakukan dengan pengaturan (*fine tuning*) parameter model dan input data yang sesuai untuk kebutuhan pemilihan lokasi KJA.

Perairan pesisir Klatakan, Situbondo dikategorikan sebagai perairan yang tenang berdasarkan tinggi gelombang rerata 0,3 meter dan periode gelombang signifikan 4,1 detik. Perairan tersebut terlindung dari gelombang tinggi pada musim timur, namun perlu diwaspadai kemungkinan gelombang tinggi pada musim barat mencapai 1,5 m yang berbahaya bagi karamba pembudidaya.

Hasil validasi pemodelan ini dengan perhitungan analitik menunjukkan perhitungan perubahan tinggi gelombang dengan *XBeach* pada lokasi studi lebih besar daripada perubahan tinggi gelombang dengan perhitungan analitik (16,22 %) yang disebabkan oleh perbedaan pendekatan proses *shoaling* yang terjadi (pada kedalaman 3-10 m) pada kedua perhitungan tersebut. Namun, perubahan tinggi gelombang pada kedalaman >10m pada kedua perhitungan menunjukkan pola yang relatif sama.

Lokasi yang sesuai (6,65 %) dan sangat sesuai (47 %) untuk budidaya laut berdasar tinggi gelombang terletak pada perairan dangkal dekat dengan garis pantai dan di belakang gugusan karang, dimana tinggi gelombang rendah karena telah mengalami deformasi. Terdapat juga sebagian lokasi yang tidak sesuai (18,08 %) dan kurang sesuai (28,35 %) untuk budidaya laut karena tinggi gelombangnya dapat lebih dari 1 meter. Hasil ini mendapatkan verifikasi dari citra ikonos melalui *Google Earth* bahwa KJA para pembudidaya terletak di daerah yang dikategorikan sangat sesuai untuk lahan budidaya dengan tinggi gelombang di area tersebut kurang dari 0,6 meter. Hasil penentuan kesesuaian lahan budidaya ini berdasarkan dari karakteristik gelombang laut, sehingga perlu mempertimbangkan faktor lain, seperti kedalaman, arus, fisika, kimia perairan, dalam finalisasi penempatan KJA pembudidaya.

Untuk hasil lebih akurat, perlu dilakukan verifikasi hasil simulasi model penjalaran gelombang menggunakan data iklim gelombang hasil pengukuran lapangan yang mempunyai durasi pengukuran yang panjang (lebih dari 10 tahun).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Reagan Septory dan I Nyoman Radiarta atas arahan dan bantuannya selama pelaksanaan survey dalam penelitian ini, serta Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Tanjung Perak Surabaya untuk penyediaan data yang diperlukan dalam penelitian ini. Penelitian ini dapat berlangsung menggunakan anggaran DIPA Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Budidaya Laut, Gondol tahun 2012.

DAFTAR PUSTAKA

- Abanades, J., Greaves, D., & Iglesias, G. (2014). Coastal defence through wave farms. *Journal of Coastal Engineering*, *91*, 299-307.
- Anderson, L. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill, Inc.
- Armaroli, C., Grotoli, E., Harley, M. D., & Ciavola, P. (2013). Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Journal of Geomorphology*, *199*, 22-35.
- Balai Budidaya Laut Ambon. (2010). *Petunjuk Teknis Budidaya Laut: Pembesaran Bubara (Caranx sp) di Karamba Jaring Apung*. Ambon.
- Baldock, T. E., Holmes, P., Bunker, S., & Van Weert, P. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, *34*(3-4), 173-196.
- Dissanayake, P., Brown, J., & Karunaratna, H. (2014). Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton Coast, Liverpool Bay, UK. *Journal of Marine Geology*, *357*, 225-242.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2014). *The state of world fisheries and aquaculture. Opportunities and challenges*. E-ISBN 978-92-5-108276-8 (PDF)
- Ferreira J. G., Saurela C., Lencart e Silva J. D., Nunes J. P., & Vazqueza F. (2014). Modelling of interactions between inshore and offshore aquaculture. *Journal of Aquaculture*, *426-427*, 154-164.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Wave in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Jamal, M. H., Simmonds, D. J., & Magar, D. J. (2014). Modelling gravel beach dynamics with *XBeach*. *Journal of Coastal Engineering*, *89*, 20-29.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *77*, 437-471.
- Kristiansen, T. & Faltinsen, O. M. (2014). Experimental and numerical study of an aquaculture net cage with floater in waves and current. *Journal of Fluids and Structures*, *54*, 1-26.
- McCall, R. T. (2008). *The longshore dimension in dune overwash modelling. development, verification and validation of XBeach*. Thesis. TU Delft, the Netherlands.
- McCall, R. T., Van Thiel de Vries, J. S. M., Plant, N. G., Van Dongeren, A. R., Roelvink, J. A., Thompson, D. M., & Reniers, A. J. H. M. (2010). Two-dimensional time dependent

- hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57, 668-683.
- Risandi, J. (2011). *Study of morphological response of maasvlakte 2 soft sea defense using 2D XBeach*. Tesis. Unesco-IHE, Delft-The Netherlands.
- Roelvink, J. A., Reniers, A., Dongeren, Av., Vries, J.v.T.d., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152.
- Roelvink, J. A., Reniers, A., Dongeren, A.v., Vries, J.v.T.d., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). *XBeachModel Description and Manual Unesco-IHE*. Deltares and Delft University of Technology, Delft.
- Roelvink, D., Stelling, G., Hoonhout, B., Risandi, J., Jacobs, W., & Merli, D. (2012). Development and field validation of a 2DH curvilinear storm impact model. *Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering*, Santander, Spain, 2012.
- Rudyani, F. P., Armono, H. D., & Sujantoko. (2013). Pemodelan gelombang di kolam Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong. *Jurnal Teknik POMITS*, 2(2), 2337-3539.
- Ruessink, B. G., Miles, J. R., Feddersen, F., Guza, R. T., & Elgar, S. (2001). Modeling the alongshore current on barred beaches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106 (C10), 22451–22463.
- Van Dongeren, A., Lowe, R., Pomeroya, A., Tranga, D. M., Roelvink, J. A., Symondse, G. (2013). Numerical modeling of low-frequency wave dynamics over a fringing coral reef. *Journal of Coastal Engineering*, 73, 178-190.
- Williams, J. J., de Alegría-Arzaburu, A. R., McCall, R. T., & Van Dongeren, A. (2012). Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: Laboratory and field results. *Coastal Engineering*, 63, 62-80.
- Windupranata. (2007). *Development of a decision support system for suitability assessment of mariculture site selection*. Disertasi. Coastal Engineering and Geoscience, University of Kiel Germany.
- Young, I.R. (1999). *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier. ISBN: 978-0-08-043317-2.

