

Pemodelan Gelombang di Kolam Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong

Faddillah Prahmadana Rudyani, Haryo Dwito Armono, dan Sujantoko
Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: armono@oe.its.ac.id

Abstrak—*Master Plan* Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong yang diterbitkan oleh Dirjen Perikanan Tangkap Departemen Kelautan dan Perikanan RI kurang disetujui oleh para nelayan yang merupakan pengguna dari PPN Brondong. *Layout* dari struktur *breakwater* yang direncanakan dinilai membahayakan dari segi tinggi gelombang yang terjadi di kolam labuh dan kurang memperhatikan akses alur keluar-masuk pelabuhan, untuk itu maka diajukanlah *Master Plan* Perubahan PPN Brondong. Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukanlah penelitian ini untuk menganalisis kondisi tinggi gelombang di area kolam labuh PPN Brondong pada kondisi eksisting agar diketahui kinerjanya. Analisis dilakukan dengan memodelkan perjalanan gelombang menggunakan bantuan perangkat lunak. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi gelombang rata-rata yang terjadi di area studi pada kondisi eksisting untuk gelombang periode ulang 1, 5 dan 50 tahun adalah 0,492 m; 0,538 m dan 0,58 m.

Kata Kunci —Tinggi gelombang, layout, Brondong

I. PENDAHULUAN

KEBERADAAN pelabuhan perikanan sangat diperlukan sebagai salah satu infrastruktur pembangunan ekonomi, pelabuhan memiliki peran penting sebagai penggerak perekonomian suatu kawasan. Fungsi dari pelabuhan perikanan yang komprehensif akan menunjang kegiatan ekonomi kelautan yang lain sehingga lebih efisien dan memberikan manfaat ekonomi yang tinggi. Hal ini dapat dilihat secara nyata bahwa pembangunan pelabuhan perikanan dapat memberikan dampak yang besar bagi pertumbuhan sektor ekonomi lainnya. Pengembangan pelabuhan perikanan dapat memajukan ekonomi di suatu daerah, meningkatkan penerimaan negara dan Pendapatan asli Daerah (PAD). Pelabuhan Perikanan Brondong memiliki potensi strategis dalam pengembangan perikanan dan kelautan. PPN Brondong berfungsi sebagai titik temu yang menguntungkan antara kegiatan ekonomi di laut dengan ekonomi di darat.

Untuk mengoptimalkan potensi PPN Brondong dalam pengembangan perikanan dan kelautan nasional, pemerintah melalui Menteri Kelautan dan Perikanan RI pada tahun 2009 mengeluarkan Keputusan Menteri nomor KEP.11/MEN/2009 tentang wilayah kerja dan wilayah pengoperasian PPN Brondong yang berisi perluasan wilayah kerja darat dan perairan hingga 43,33 hektar untuk fasilitas pokok, fasilitas fungsional dan fasilitas penunjang pelabuhan perikanan. Untuk merealisasikan keputusan tersebut maka disusunlah *Master Plan* Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong

sebagai landasan pengembangan dan pengelolaan PPN Brondong. Namun dalam pelaksanaannya, tata ruang dari *Master Plan* ini kurang disetujui oleh para nelayan yang merupakan pengguna dari PPN Brondong. *Layout* dari struktur *breakwater* yang direncanakan dinilai membahayakan dari segi tinggi gelombangnya dan kurang memperhatikan akses alur keluar-masuk pelabuhan. *Breakwater* adalah bangunan yang digunakan untuk melindungi daerah perairan pelabuhan dari gangguan gelombang [1]. Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukanlah penelitian, makalah ini merupakan bagian dari Tugas Akhir yang berjudul *Pengaruh Perubahan Layout Breakwater Terhadap Kondisi Tinggi Gelombang di Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong* [2] untuk menganalisis kondisi tinggi gelombang di area kolam labuh PPN Brondong agar diketahui kinerjanya.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahap Pengumpulan Data

Untuk memberikan hasil yang optimal, yang dilakukan adalah inventarisasi data sekunder. Secara fungsi, data sekunder merupakan seri data yang bermanfaat bagi keakuratan hasil pekerjaan karena merupakan seri data yang cukup panjang. Berikut ini seri data sekunder yang diperlukan sehubungan dengan pelaksanaan pekerjaan :

- Data angin tiap jam dari BMKG untuk daerah Lamongan
- *Master Plan* PPN Brondong dan Peta Wilayah Kerja PPN Brondong
- Data yang berkaitan dengan bangunan pengaman pantai, termasuk laporan atau kajian yang pernah dilaksanakan sekitar lokasi proyek.

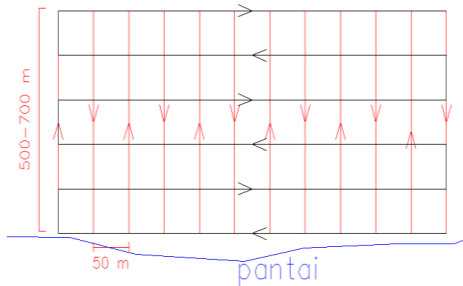
B. Tahap Survei

B.1 Survei Batimetri

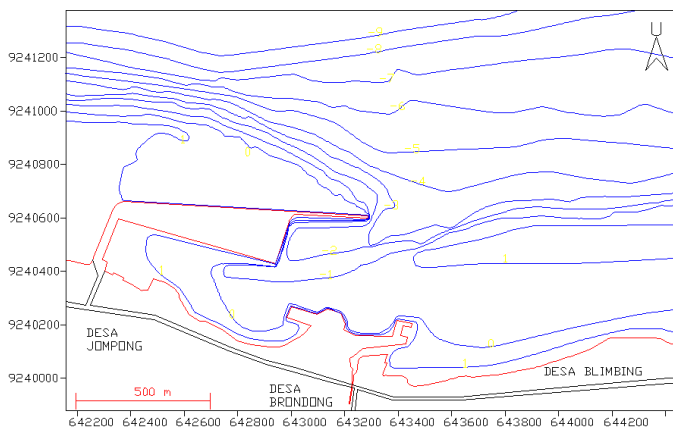
Batimetri adalah survei kontur dasar laut dengan menggunakan pemantulan gelombang suara (*echo sounding*). Survei batimetri sangat diperlukan dalam suatu perencanaan penanganan daerah pantai. Semua metode dan simulasi numerik yang akan dilakukan berdasarkan hasil dari survei ini. Analisis gelombang sebagai dasar rencana perubahan layout pelabuhan dapat akurat dengan adanya data batimetri yang benar.



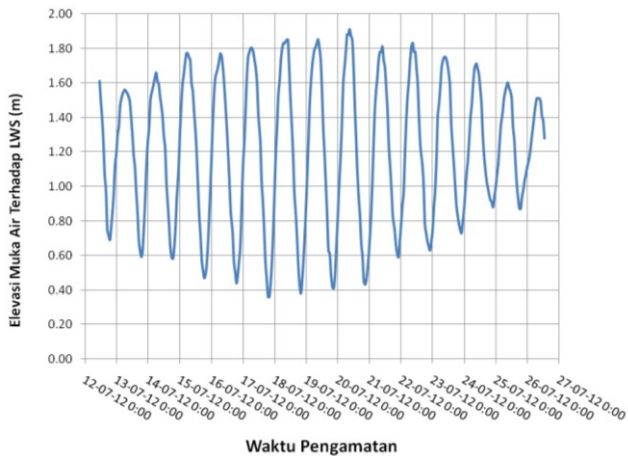
Gambar. 1. GARMIN GPSmap Sounder (GARMIN).



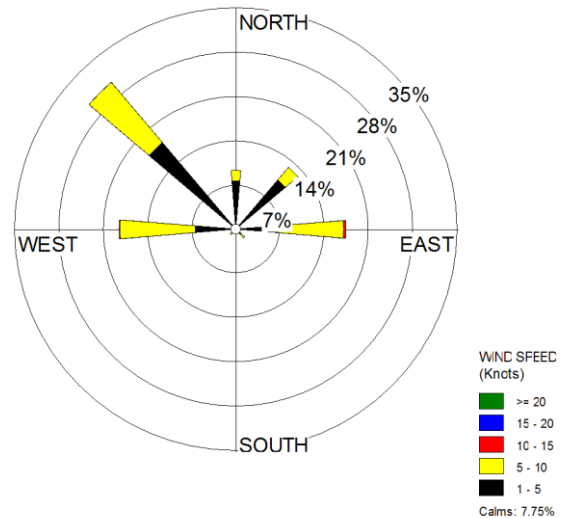
Gambar. 2. Ilustrasi rute survei batimetri.



Gambar. 3. Peta batimetri Brondong Kabupaten Lamongan.



Gambar. 4. Pasang surut wilayah perairan PPN Brondong.



Gambar. 5. Wind Rose kejadian angin Lamongan tahun 2004-2012.

Survei batimetri dilakukan pada tanggal 30 September 2012 menggunakan alatechosounder dengan *type GARMIN GPSmap Sounder*. Alat echosounder jenis ini telah menggunakan sistem digital yang terintegrasi dengan satelit untuk *positioning* alat. Dengan peralatan ini diharapkan kinerja dapat lebih efektif dan efisien sehingga hasil yang diperoleh dapat optimal.

Pemetaan yang dilakukan harus mencakup wilayah studi yang akan diteliti, untuk itu maka sebelum survei dilakukan harus direncanakan terlebih dahulu rute survei yang akan dilalui. Pembuatan rute survei dapat langsung diprogram pada alat echosounder dengan bantuan komputer yang telah terintegrasi. dari peta batimetri wilayah perairan PPN Brondong dan hasil survei batimetri di perairan Desa Blimbing Kecamatan Paciran pada tanggal 30 September 2012 dengan elevasi mengacu pada BM di lokasi, maka didapatkan peta batimetri SEPERTI DITUNJUKKAN DALAM Gambar 3.

B.2 Survei Pasang Surut

Data pasang surut merupakan hasil survei pasang surut di lokasi PPN Brondong selama lima belas hari sejak tanggal 12 Juli 2012. Adapun grafik hasil pengukuran pasang surut dengan elevasi BM setempat sebagai titik acuan adalah seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.

C. Analisis Data Angin

Data angin yang digunakan untuk peramalan gelombang adalah data di permukaan laut pada lokasi pembangkitan. Data angin yang digunakan adalah data angin wilayah Lamongan selama tahun 2004 hingga tahun 2012 yang diperoleh dari BMKG. Dari data angin tersebut kita dapat membuat wind rose untuk mencari arah angin dominan. Wind rose mempermudah kita dalam membaca data angin. Dari wind rose kita dapat menentukan arah angin dominan berasal dari barat laut menuju ke arah tenggara. Data angin ini dipakai untuk menentukan bangkitan gelombang. Wind rose dari data angin dapat dilihat pada Gambar 5.

D. Pembangkitan Gelombang oleh Angin

Metode pembangkitan gelombang yang akan dipakai menggunakan metode yang diberikan dalam “Shore Protection Manual” [3]. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan tinggi gelombang yang dibangkitkan oleh angin adalah:

$$H_0 = 5.112 \times 10^{-4} U_A F^{1/2} \tag{1}$$

$$T_0 = 6.23 \times 10^{-2} [U_A F]^{1/3} \tag{2}$$

di mana:

H_0 = tinggi gelombang laut dalam (m)

T_0 = periode gelombang laut dalam (s)

U = kecepatan angin (m/detik)

U_A = faktor tegangan angin

$$U_A = 0,71 \cdot U^{1,23} \tag{3}$$

F = fetch efektif

Dalam tinjauan pembangkitan gelombang di laut, fetch dibatasi oleh bentuk daratan yang mengelilingi laut. Di daerah pembentukan gelombang, gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin tetapi juga dalam berbagai sudut terhadap arah angin. Fetch rerata efektif diberikan oleh persamaan berikut [4]:

$$F = \frac{\sum Xi \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \tag{4}$$

di mana:

F = fetch efektif

Xi = panjang garis fetch

α_i =

deviasi pada kedua sisi dari arah angin, dengan menggunakan akan pertambahan tiap 6° sampai sudut sebesar 42° pada kedua sisi dari arah angin.

Berdasarkan eksperimen Ir. Bambang Triatmodjo pada buku teknik pantai, batas fetch maksimal adalah 332 km. Karena tidak selalu semakin panjang fetch maka gelombang semakin besar. Dikarenakan angin tidak berhembus setiap saat, dan angin berhembus secara periodik serta adanya kemungkinan semakin besar fetch dan gelombang bisa jadi semakin kecil (lihat Tabel 1).

E. Perkiraan gelombang dengan Periode Ulang

Dari setiap tahun pencatatan dapat ditentukan gelombang representatif, seperti H_s , $H_{1/10}$, H_{maks} dan sebagainya. Berdasarkan data representatif untuk beberapa tahun pengamatan dapat diperkirakan gelombang yang diharapkan disamai atau dilampaui satu kali dalam T tahun, dan gelombang tersebut dikenal dengan gelombang periode ulang T tahun atau gelombang T tahunan. Misalkan apabila $T = 50$, gelombang yang diperkirakan adalah gelombang 50 tahunan atau gelombang dengan periode ulang 50 tahun, artinya bahwa gelombang tersebut diharapkan disamai atau dilampaui rata-rata sekali dalam 50 tahun. Hal ini berarti bahwa gelombang 50 tahunan hanya akan terjadi satu kali dalam setiap periode 50 tahun yang berurutan.

Tabel 1.
Hasil perhitungan tinggi dan periode gelombang di laut dalam

Arah datang gelombang	H_s (m)	T_s (s)
Timur Laut (45°)	0,90	5,95
Utara (0°)	0,84	5,80
Barat Laut (315°)	1,20	6,33

Ada beberapa model distribusi untuk memprediksi gelombang dengan periode ulang tertentu, yaitu distribusi Normal, Log-Normal, Gumbel dan Weibull [5] Dalam metode ini prediksi dilakukan untuk memperkirakan tinggi gelombang signifikan dengan berbagai periode ulang.

Model distribusi tersebut mempunyai bentuk persamaan berikut ini:

1. Normal

$$P = \Phi \left(\frac{H - \bar{H}}{S_H} \right) \tag{5}$$

2. Distribusi Log-Normal

$$P = \Phi \left(\frac{\ln H - \ln \bar{H}}{S_{\ln H}} \right) \tag{6}$$

3. Distribusi Gumbel

$$P = \exp \left(-\exp \left(-\frac{H - \gamma}{\beta} \right) \right) \tag{7}$$

4. Distribusi Weibull

$$Q = \exp \left(-\left(\frac{H - \gamma}{\beta} \right)^\alpha \right) \tag{8}$$

di mana:

P = probabilitas tak terlampaui

Φ = komulatif probabilitas standard normal

H = rata-rata tinggi gelombang

S_H = standard deviasi

Q = probabilitas tak terlampaui

α = parameter Weibull

β = parameter Gumbel

γ = batas bawah dari H

Data masukan disusun dalam kelompok-kelompok kelas dengan interval tertentu urutan dari kecil ke besar. Selanjutnya probabilitas ditetapkan untuk setiap tinggi gelombang menurut data gelombang yang telah dikelompokkan. Setelah itu tiap-tiap distribusi diplotkan dalam grafik hasil transformasi linier dari persamaan (5) hingga (8) dengan nilai pada sumbu X dan Y sebagai berikut:

1. Normal

$$X = H \quad ; \quad Y = \Phi^{-1}(P) \tag{9}$$

2. Log-Normal

$$X = \ln H \quad ; \quad Y = \Phi^{-1}(P) \tag{10}$$

3. Gumbel

$$X = H \quad ; \quad Y = -\ln \left(\ln \frac{1}{P} \right) \tag{11}$$

4. Normal

$$X = H \quad ; \quad Y = \left(\ln \frac{1}{Q} \right)^{1/\alpha} \tag{12}$$

Dari distribusi tersebut diperoleh persamaan regresi linier berbentuk $y = Ax + B$. Nilai A dan B dari kurva transformasi masing-masing distribusi tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai S_H ; \bar{H} ; $S_{\ln H}$; $\ln \bar{H}$; β dan γ dengan rumus sebagai berikut:

$$S_H = 1/A_{(Normal)} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \bar{H} &= B_{(Normal)} \times S_H & (14) \\ S_{\ln H} &= 1/A_{(Log-Normal)} & (15) \\ \ln \bar{H} &= S_{\ln H} \times B_{(Log-Normal)} & (16) \\ \beta &= 1/A & (17) \\ \gamma &= -\beta \times B & (18) \end{aligned}$$

Langkah terakhir adalah mencari tinggi gelombang periode ulang pada tahun tertentu (H_{TR}) dengan persamaan sebagai berikut:

1. Normal

$$H_{TR} = \bar{H} + S_H \Phi^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda T_R} \right) \quad (19)$$

2. Log-Normal

$$H_{TR} = e^{\left(\ln \bar{H} + S_{\ln H} \Phi^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{\lambda T_R} \right\} \right)} \quad (20)$$

3. Gumbel

$$H_{TR} = \gamma - \beta \left(\ln \left\{ \frac{\lambda T_R}{\lambda T_R - 1} \right\} \right) \quad (21)$$

4. Weibull

$$H_{TR} = \gamma - \beta (\ln \{ \lambda T_R \})^{1/\alpha} \quad (22)$$

di mana:

$$\lambda = \frac{\text{jumlah data}}{\text{jumlah tahun}} \quad (23)$$

Metode yang digunakan untuk meramalkan periode ulang gelombang adalah model distribusi normal karena koefisien korelasi (R) kurva yang dihasilkan paling mendekati satu (lihat Tabel 2).

F. Analisis Pasang Surut

Dari hasil survei pasang surut kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari konstanta pasang surut dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\eta(t) = S_0 + sso + \sum_{r=1}^k C_r \cos(\omega_r t - P_r) \quad (24)$$

- di mana:
- $\eta(t)$ = elevasi pasang surut pada waktu t
 - C_r = amplitudo komponen ke-r
 - $\omega_r = \frac{2\pi}{T_r}$, dengan T_r adalah periode komponen ke-r
 - S_0 = duduk tengah permukaan laut (mean sealevel)
 - sso = perubahan duduk tengah musiman yang disebabkan oleh efek muson atau angin
 - t = waktu

Perhitungan komputasional dilakukan dengan program komputasi berbasis web menggunakan metode *Least Squares* [6]. Konstanta harmonik pasang surut hasil perhitungan dengan Metode *Least Squares* di lokasi Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong tersaji dalam Tabel 3.

Dari hasil komputasi tersebut juga diperoleh nilai Z_0 sebesar 120,5 cm. Penentuan tinggi dan rendahnya pasang surut ditentukan dengan rumus-rumus sebagai berikut:

Tabel 2. Periode ulang gelombang laut dalam

Periode Ulang (th)	Timur Laut		Utara		Barat Laut	
	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)
1	0,74	9,87	0,97	9,27	1,59	11,96
2	0,77	10,10	1,02	9,41	1,64	12,25
5	0,81	10,38	1,08	9,60	1,72	12,61
10	0,84	10,58	1,12	9,73	1,77	12,86
20	0,86	10,77	1,16	9,85	1,82	13,11
50	0,89	11,02	1,21	10,02	1,88	13,43
100	0,92	11,20	1,25	10,14	1,93	13,66

Tabel 3. Konstanta harmonik pasang surut wilayah Brondong Lamongan

NO	KONSTANTA	AMPLITUDE (cm)
1	M2	4,91
2	S2	15,98
3	N2	1,89
4	K1	20,81
5	O1	20,40
6	M4	0,58
7	MS4	0,57
8	P1	36,46
9	K2	13,19

$$\begin{aligned} MSL &= Z_0 + 1,1 (M_2 + S_2) & (25) \\ DL &= MSL - Z_0 \text{ MHWL} = Z_0 + (M_2+S_2) & (26) \\ HHWL &= Z_0+(M_2+S_2)+(O_1+K_1) & (27) \\ MLWL &= Z_0 - (M_2+S_2) & (28) \\ LLWL &= Z_0-(M_2+S_2)-(O_1+K_1) . & (29) \\ HAT &= Z_0 + (M_2 + S_2 + N_2 + P_1 + O_1 + K_1) & (30) \\ LAT &= Z_0 - (M_2 + S_2 + N_2 + P_1 + O_1 + K_1) & (31) \end{aligned}$$

Dalam pemodelan gelombang ini muka air rencana yang digunakan adalah saat keadaan air pasang tertinggi, yaitu HAT sebesar 2,21 meter di atas LWS.

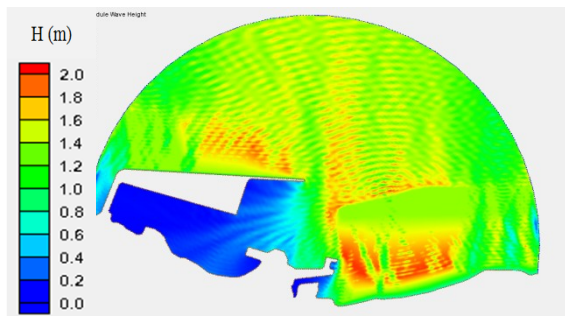
G. Pemodelan Gelombang

Pemodelan gelombang menggunakan program yang mensimulasikan model dan arah penjalaran gelombang di daerah pelabuhan, daerah pantai terbuka, estuaria dan gelombang di sekitar pulau. Simulasi pemodelan merupakan kombinasi dari refraksi-difraksi gelombang, friksi gelombang, gelombang pecah, penyebaran amplitudo gelombang non linier dan alur pelabuhan. Persamaan pengatur yang diselesaikan dalam model refraksi-difraksi adalah persamaan perambatan gelombang yang dimodifikasi dari persamaan gelombang *mild-slope* dua dimensi. Persamaan gelombang tersebut ditulis sebagai berikut [7]:

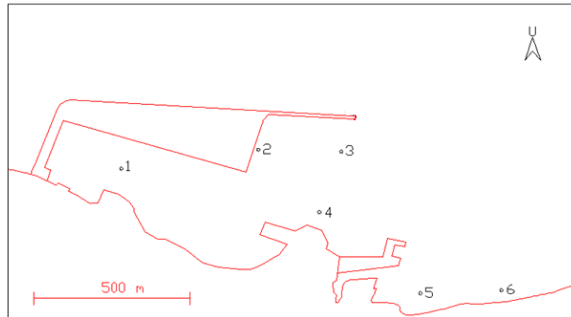
$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \eta) + \frac{C_g}{c} \sigma^2 \eta = 0 \quad (32)$$

di mana:

- $\eta(x,y)$ = fungsi elevasi gelombang yang diestimasi
- σ = frekuensi gelombang (rad/s)
- $C(x,y)$ = cepat rambat gelombang = σ/k
- $C_g(x,y)$ = cepat rambat kelompok gelombang = $\delta\sigma/\delta k = nC$
- $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ (33)



Gambar. 6. Hasil pemodelan kondisi eksisting, arah gelombang datang dari utara ($H_s=0,84$ m; $T_s=5,80$ detik).



Gambar. 7. Lokasi titik observasi pemodelan layout eksisting.

$k(x,y)$ = wave number ($2\pi/L$), hubungannya dengan kedalaman lokal $d(x,y)$ melalui dispersi linier adalah:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \tag{34}$$

Persamaan diatas mensimulasikan refraksi, difraksi dan refleksi gelombang di daerah pantai. Selain itu banyak juga mekanisme lain yang mempengaruhi pola perambatan gelombang di daerah pantai. *Output* dari pemodelan berupa tinggi gelombang pada lokasi tertentu atau keseluruhan grid. Pemodelan dilakukan dengan tiga arah yang berbeda, yaitu timur laut, utara dan barat laut.

H. Validasi Pemodelan Gelombang

Validasi pada pemodelan ini dilakukan dengan mengambil titik-titik sepanjang suatu garis dari lepas pantai hingga garis pantai pada hasil pemodelan untuk mendapatkan pola perubahan tinggi gelombang yang menjalar dari laut dalam ke pantai. Selanjutnya tinggi gelombang di tiap kedalaman dari hasil pemodelan tersebut dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analitik. Untuk membandingkan kedua hasil tersebut persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Persen error relatif} = \frac{|H^* - H|}{H} \times 100\% \tag{45}$$

di mana: $H = H$ analitik
 $H^* = H$ numeric

Dari hasil validasi model di atas dapat diketahui bahwa perbedaan tinggi gelombang antara hasil pemodelan dengan perhitungan secara analitik memiliki kesalahan relatif rata-

rata di bawah 15%.

Tabel 3.
 Hasil validasi pemodelan

Arah	Error rata-rata (%)
Timur Laut	11,18
Utara	14,44
Barat Laut	13,92

Tabel 4.
 Rata-rata tinggi gelombang

Periode ulang	Rata-rata Tinggi gelombang kondisi eksisting (m)		
	Timur Laut	Utara	Barat Laut
1 tahun	0,476	0,561	0,441
5 tahun	0,546	0,607	0,462
50 tahun	0,589	0,653	0,500

III. HASIL DAN DISKUSI

Untuk memverifikasi pemodelan pada kondisi eksisting, dilakukan observasi pada 6 titik lokasi pengambilan sampel tinggi gelombang. Titik yang ditentukan dinilai dapat merepresentasikan kondisi tinggi gelombang di wilayah studi. Pengambilan titik sampel dilakukan menurut tujuan (*purposive sampling*) dengan pertimbangan bahwa titik-titik tersebut merupakan lokasi yang dianggap penting untuk diamati pada lokasi studi.

Hasil observasi tinggi gelombang pada tiap titik observasi dari pemodelan layout eksisting untuk masing-masing periode ulang dan arah datang gelombang dirata-rata sehingga hasilnya adalah seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil adalah:

1. Layout eksisting dapat dikatakan tidak aman dalam melindungi area Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong dan pantai Desa Blimbing. Hal tersebut karena rata-rata tinggi gelombang yang terjadi melebihi kondisi aman yang disyaratkan untuk kapal di bawah 500 GT yaitu 0,3 meter.
2. Perlu dilakukan modifikasi terhadap layout eksisting yang merupakan hasil pembangunan Master Plan PPN Brondong.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Triatmodjo, Bambang. 2003. *Pelabuhan*. Beta Offset, Yogyakarta.
 [2] Rudyani, F. P. 2013. *Pengaruh Perubahan Layout Breakwater Terhadap Kondisi Tinggi Gelombang di Pelabuhan Perikanan Nusantara Brondong*. Jurusan Teknik Kelautan ITS, Surabaya.
 [3] US Army CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. US Army Corps of Engineers, Washington.
 [4] Triatmodjo, Bambang. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset, Yogyakarta.
 [5] Kamphuis, J. W. 2000. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Worl Scientific, Singapura.
 [6] Zakaria, Ahmad. 2009. *Dasar Teori dan Aplikasi Program Interaktif berbasis Web untuk menghitung Panjang Gelombang dan Pasang Surut*. Magister Teknik Sipil Unila, Lampung.
 [7] Demirbilek, Zaki., Panchang, V. 1998. CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation. *Technical Report CHL-98-26*.