

The Analysis of Wave Refraction using SWAN Model

Sujantoko¹

Abstract— Wave simulation is important problem in nearshore coastal design process. Determination of proper wave parameter will provide reliable and accurate design, therefore modeling usually needed to simulate this process where numerical model is the right choice because of its cost is cheaper and the result is quite accurate. SWAN (*Simulating Wave Nearshore*) is numerical model that already used widely to simulate wave in coastal area. In this research we analyze wave refraction by SWAN model with any coastal profile (m) i.e. 0,01 , 0,03 and 0,05. This simulation also applied in the real problem at Tegal port in Central Java Province. According to the result of this model we find that in the same direction, height, and period, the height of wave break will increase as the coastal slope increase. These problems arise due to decreasing in value of d_b/H_b , that means the peak wave is become steep. Coastal Profile affect the wave height (due to refraction) about 2%-34%. The jetty at Tegal Port induce the wave height big alteration at dock pond (228,91%) at wave direction 30°, while at groove, back and head of the jetty, wave reduction reach until 12,96% ; 0,02% and 3,55% at incoming wave direction 45°. In the head of the jetty, the wave almost doesn't being reduced because diffraction and wave reflection doesn't have significant effect.

Keywords—simulation, SWAN, coastal profile, refraction, reduction

PENDAHULUAN

Usaha rekayasa rekayasa pantai dan lepas pantai seringkali membutuhkan informasi yang detail mengenai kondisi gelombang pada suatu lokasi tertentu. Biasanya informasi ini tidak tersedia karena data pengamatan dilapangan seringkali tidak lengkap karena mahal biaya. Hal ini mendorong munculnya beragam model numerik untuk memprediksi gelombang dalam penjalarnya menuju pantai.

Sejarah perkembangan model gelombang dimulai sejak tahun 1947 oleh Svedrup dan Munk (dalam Jin K-R dan Ji Z-G [1]) memperkenalkan formula empirik untuk memperkirakan tinggi gelombang signifikan dilaut dan memperkenalkan konsep tinggi gelombang signifikan selanjutnya model gelombang terus mengalami perkembangan dan semakin beragam. model empirik yang cukup terkenal adalah *Revised Shore Protection Manual* (RSPM) model yang merupakan hasil pengembangan Hurdle dan Strive (1989) (dalam Andrew [2]) terhadap formula empirik dari *Shore Protection Manual* (SPM).

Beberapa model yang lain dikembangkan berdasarkan persamaan “*mild slope*” seperti REF/DIF_S, merupakan generasi terbaru REF/DIF_1 yang dikembangkan oleh Kirby dan Dalrymple [3]. Selain persamaan “*mild slope*” juga berkembang model gelombang yang didasarkan pada persamaan *Boussinesq*. Banyak peneliti yang telah mengembangkan pendekatan *Boussinesq* untuk semakin menyempurnakan model gelombang yang didasarkan pada persamaan ini [1].

Pendekatan yang lain adalah berdasarkan persamaan kerapatan energi gelombang. Pendekatan dengan spektrum kerapatan energi gelombang didasarkan pada persamaan *Eulerian*. Model spektrum ini telah banyak dikembangkan oleh beberapa ahli, dan salah satunya telah dikembangkan untuk memperkirakan tinggi gelombang di perairan dangkal oleh Ewing dan Hogue (1993) dalam Jin K-R dan Ji Z-G [1]. Model spektra ini mampu mempertimbangkan pengaruh refraksi gelombang, pembangkitan gelombang, kehilangan energi gelombang, dan interaksi antar gelombang baik di perairan dalam maupun di perairan dangkal [4]. Meskipun demikian model spektra ini tidak melibatkan pengaruh dari difraksi gelombang. Pengaruh dari difraksi gelombang biasanya dihitung menggunakan model *mild-slope* [5] atau dengan model *Boussinesq* [6]. Namun kelemahan dua model yang yang disebutkan terakhir ini adalah tidak bisa digunakan untuk menghitung pembangkitan gelombang, kehilangan energi gelombang, dan interaksi antar gelombang.

Pendekatan dengan spektrum kerapatan energi gelombang telah mengilhami lahirnya model numerik yang mampu memperkirakan tinggi gelombang pada suatu lokasi tertentu berdasarkan data angin, batimetri, dan data lingkungan yang diberikan. Model numeris yang sudah banyak dikenal dan digunakan dalam rekayasa pantai diantaranya adalah SWAN. SWAN adalah akronim dari *simulating wave nearshore* dan merupakan model gelombang untuk perairan dangkal. Model SWAN dikembangkan pertama kali pada tahun 1970 dan digunakan untuk memperkirakan tinggi gelombang dan spektrum gelombang. Model ini pada awalnya tidak melibatkan perhitungan pengaruh interaksi antar gelombang. Kemudian dalam perkembangannya lahir generasi kedua dari model gelombang ini yang melibatkan pengaruh interaksi antar gelombang. Meskipun generasi kedua model gelombang ini mampu memperbaiki hasil simulasi, namun model ini hanya bisa diterapkan pada daerah dengan kondisi angin tertentu saja. Akhirnya sampai saat ini telah dikembangkan generasi ketiga dari model gelombang ini. Model generasi ketiga ini mampu menyele-

Naskah diterima pada tanggal 16 Maret 2009, selesai revisi pada 11 Mei 2009

¹ Sujantoko adalah dosen Jurusan Teknik Kelautan, FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA
e-mail : sujantoko@oe.its.ac.id

saikan masalah diatas dengan mengintegrasikan persamaan energi gelombang dalam model [7], [8]. Model generasi ketiga ini mampu memperhitungkan pengaruh refraksi, *shoaling*, dan *blocking* sepanjang penjalaran gelombang [1]. Pada awalnya model generasi ketiga ini belum bisa digunakan untuk memperhitungkan pengaruh difraksi gelombang [9], namun sampai saat ini telah dilakukan modifikasi, sehingga pada versi terbaru SWAN cycle III version 40.41 telah dilibatkan perhitungan difraksi dengan menggunakan persamaan “*mild slope*”.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian untuk memeriksa kemampuan dan keakuratan SWAN dalam memodelkan gelombang diperairan dangkal. Hal ini ditunjukkan dengan beberapa hasil verifikasi perhitungan SWAN terhadap pengukuran dilapangan yang dimuat dalam beberapa jurnal. Mai et.al [10] telah membandingkan hasil perhitungan parameter gelombang dengan hasil pengukuran menggunakan “*waverider buoy*” dan hasil perhitungan menggunakan model gelombang MIKE 21 di pantai utara Frisian, Jerman. Berdasarkan penelitian ini ditunjukkan bahwa SWAN memberikan hasil yang akurat terhadap kedua pembanding tersebut. Silva et.al [11] telah membandingkan parameter gelombang hasil perhitungan menggunakan SWAN dengan hasil pengukuran menggunakan “*ACDP sensor buoy*” diperairan pantai barat Portugal, disebelah utara pelabuhan Shines. Hasilnya menunjukkan kesesuaian dan tingkat perbedaan yang bisa diterima. Dykes et.al [12] menunjukkan bahwa model gelombang HISWA merupakan “*steady state model*” sedangkan SWAN bisa *steady state* maupun *time dependent*. Kemudian Sujantoko et al [13] telah menguji kemampuan dan keakuratan model SWAN dengan berbagai hasil laboratorium, yakni percobaan Johnson tahun 1952, Cox et.al tahun 1991, Briggs et.al tahun 1991, Beji dan Battjes tahun 1993, dan Percobaan Yu et.al tahun 1998. Peneliti lain yang telah menggunakan SWAN diantaranya: Gorman dan Nielson [14], Chen dan Douglas [15], Schoones dan Luger [16], Parks et.al [17], Edge [18] dan lain-lain.

Menyadari kenyataan penggunaan SWAN yang begitu luas dan sangat bermanfaat dalam dunia rekayasa pantai maka model ini selayaknya dikuasai oleh pemerhati bidang tersebut. Pada penelitian ini penulis ingin melakukan studi refraksi gelombang dengan model SWAN di berbagai kondisi kemiringan pantai yang berbeda dan kondisi riil di pelabuhan Tegal, setelah sebelumnya melakukan validasi [13].

DESKRIPSI MODEL SWAN

SWAN menggambarkan evolusi gelombang di daerah pantai dengan input angin, dissipasi energi, interaksi antar gelombang dan perubahan parameter gelombang (H , T , α) karena variasi kedalaman air dan pengaruh arus. Perubahan spektrum kerapatan aksi gelombang ini dinyatakan dalam persamaan ketimbangan aksi gelombang yang dalam koordinat kartesian (Hasselman et al, 1973 dalam Booij et al [4]) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Dimana $N=N(t,x,y,\sigma,\theta)$ adalah spektrum kerapatan aksi gelombang; t waktu; C_x dan C_y kecepatan penjalaran gelombang dalam arah x dan y ; C_σ dan C_θ adalah kecepatan penjalaran gelombang dalam ruang σ dan θ ; σ frekuensi relatif; θ arah gelombang; $S = S$ total (σ, θ) adalah suku source dari spektral kerapatan energi gelombang. Suku pertama mewakili perubahan rata-rata waktu kerapatan, suku kedua dan ketiga mewakili penjalaran kerapatan aksi dalam ruang. Suku keempat mewakili frekuensi relatif akibat variasi kedalaman air dan arus dan suku kelima mewakili refraksi gelombang. Suku keenam mewakili kombinasi input angin, efek dissipasi gelombang, dan interaksi gelombang *non-linear*.

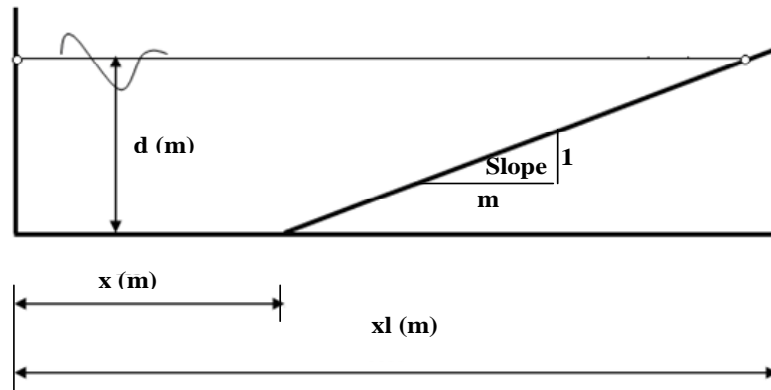
Prinsip dasar perhitungan model SWAN adalah mengintegrasikan persamaan kesetimbangan aksi gelombang dengan menggunakan metode selisih hingga (*finite difference method*) terhadap 5 variabel yang terkait. Variabel waktu didiskritisasi dengan *simple time step* Δt untuk proses integrasi. Variabel ruang horizontal didiskritisasi dengan *grid rectangular* Δx dan Δy , sedangkan variabel spektrum dalam model didiskritisasi dengan *constant directional resolution* $\Delta\theta$ dan dengan *constant relative frequency resolution* $\Delta\sigma/\sigma$. Skema numerik yang dipilih dalam SWAN didasarkan pada kestabilan, keakuratan dan efisiensi waktu perhitungan [8]. Skema yang dipilih adalah *implicit upwind*. Pada skema ini variabel waktu dan ruang tidak saling tergantung satu dengan lainnya.

Kondisi batas dan SWAN baik dalam batas geografis maupun spektral, keduanya akan menyerap energi gelombang yang menjalar ke daerah batas ini. Kondisi batas yang berupa daratan bisa langsung menyerap energi gelombang dan tidak memerlukan informasi kondisi gelombang lagi, karena secara keseluruhan energi terserap. Namun untuk daerah yang terbuka yang berupa perairan, informasi gelombang yang lengkap akan membantu memberikan hasil perhitungan yang akurat. Jika informasi gelombang di daerah ini tidak lengkap atau tidak ada sama sekali, maka sebaiknya daerah batas ini diletakkan pada daerah yang cukup jauh dari daerah perhitungan.

MODEL REFRAKSI GELOMBANG DENGAN SWAN

Model numerik pada SWAN menggunakan koordinat kartesian, dimensi ruang didiskritisasi dengan *grid* segi-empat (*rectangular*) Δx dan Δy . Sensitivitas hasil model diuji dengan frekuensi penjalaran gelombang tunggal dari perairan dalam menuju dangkal. Untuk maksud ini simulasi numerik refraksi gelombang menggunakan skenario model dengan berbagai kemiringan pantai. Model 1, 2 dan 3 dengan kemiringan 0,01 ; 0,03 dan 0,05 secara berturut-turut (Gambar 1). Sedangkan parameter gelombang, seperti periode, tinggi dan arah gelombang datang seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Kedalaman perairan $d=30m$, jarak ujung slope ke perairan dalam $x=500m$, sedangkan jarak dari perairan dalam ke garis pantai adalah 1100m, 1500m dan 3500m.

Dimana a_1 menunjukkan data tinggi gelombang, $H = 1m$ dan periode gelombang, $T=5$ detik pada arah gelombang datang 0° . Simbul yang lain menunjukkan keterangan yang sejenis.



Gambar 1. Konfigurasi kemiringan dalam skenario pemodelan

TABEL 1
SKENARIO MODEL SWAN PADA BERBAGAI TINGGI, PERIODE DAN SUDUT GELOMBANG DATANG

Parameter Gelombang	Arah Gelombang Datang														
	a = 0°					a = 30°					a = 45°				
	a1	b1	c1	d1	e1	a2	b2	c2	d2	e2	a3	b3	c3	d3	e3
H (m)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T (det)	5	8	10	13	15	5	8	10	13	15	5	8	10	13	15

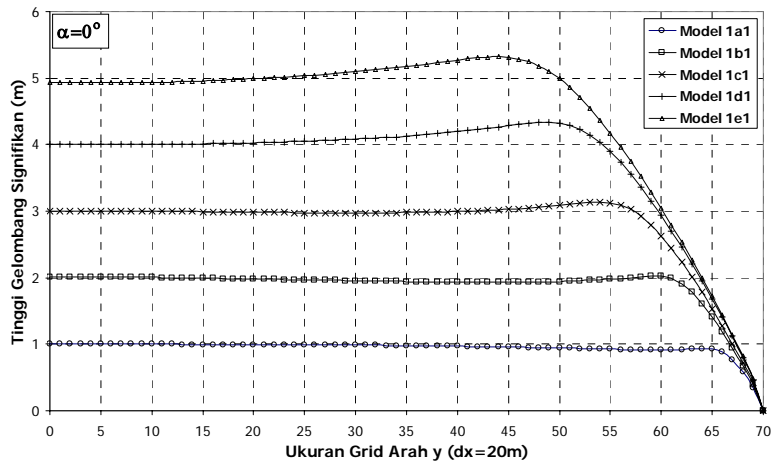
Simulasi SWAN di berbagai kemiringan pantai.

Ukuran *grid* kearah x dan y untuk pemodelan berbagai kemiringan 0,01 ; 0,03 dan 0,05 ditentukan seragam, $\Delta x = \Delta y = 50$. SWAN digunakan untuk menentukan posisi gelombang pecah akibat refraksi gelombang pada 15 kondisi variasi parameter gelombang (Tabel 1). Posisi gelombang pecah dianalisa dengan menggunakan *wave steepness* yang dihasilkan, dimana nilai *wave steepness* yang terbesar sepanjang daerah perhitungan menunjukkan posisi gelombang pecah.

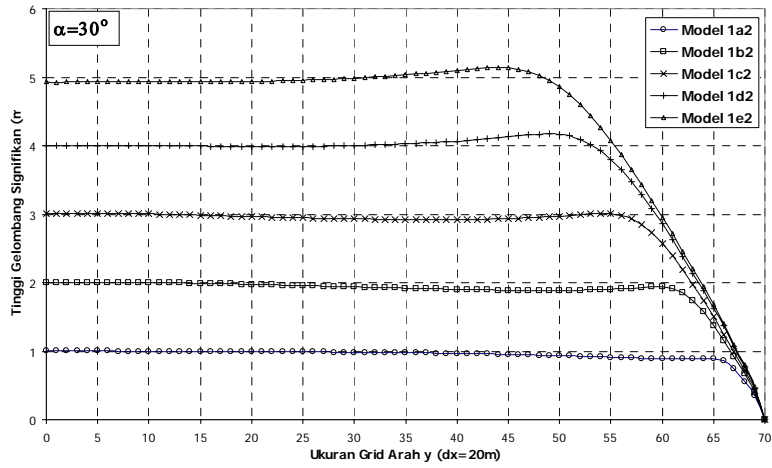
Berdasarkan hasil pemodelan, tinggi gelombang dalam penjarannya menuju pantai akan mengalami perubahan akibat perubahan kedalaman perairan. Pada pantai dengan kemiringan 0,01 (Model 1), semakin tinggi sudut gelombang datang, tinggi gelombang akan mengalami penurunan tetapi letak gelombang pecah relatif sama (Gambar 2 - 4). Sebagai contoh Model 1a₁ dengan Model 1a₂ yang memiliki tinggi gelombang datang 1 m dan periode 5 detik, gelombang pecah terjadi pada posisi ± 110 m dari garis pantai pada kedalaman 1,1 m dengan tinggi gelombang pecah 0,93 m dan 0,89 m. Rata-rata perubahan tinggi gelombang tersebut 12,2% ; 1,2% dan -18,8% pada arah gelombang datang 0°, 30° dan 45° secara berturut-turut (Tabel 2). Tinggi gelombang pecah jika dibandingkan dengan arah gelombang datang 0° pada tinggi dan periode gelombang yang juga mengalami

penurunan sebesar 3,15% - 4,49% untuk arah gelombang datang 30° dan 9,85%-12,8% arah gelombang datang 45°. Pada Model 2 tinggi gelombang mengalami rata-rata perubahan sebesar 15,6% ; 4% dan -20,6% pada arah 0°, 30° dan 45° secara berturut-turut (Tabel 3) dengan reduksi sebesar 3,3%-3,7% pada arah 30° dan 11,9%-13% pada arah gelombang datang 45° jika dibandingkan dengan arah gelombang datang 0°. Demikian juga pada Model 3 tinggi gelombang mengalami perubahan rata-rata 15%, 2,8%, -15,6% pada arah 0°, 30° dan 45° secara berturut-turut (Tabel 4) dengan reduksi gelombang sebesar 3,69%-4,4% pada arah 30° dan 10,1%-11% pada arah gelombang datang 45° jika dibandingkan dengan arah gelombang datang 0°.

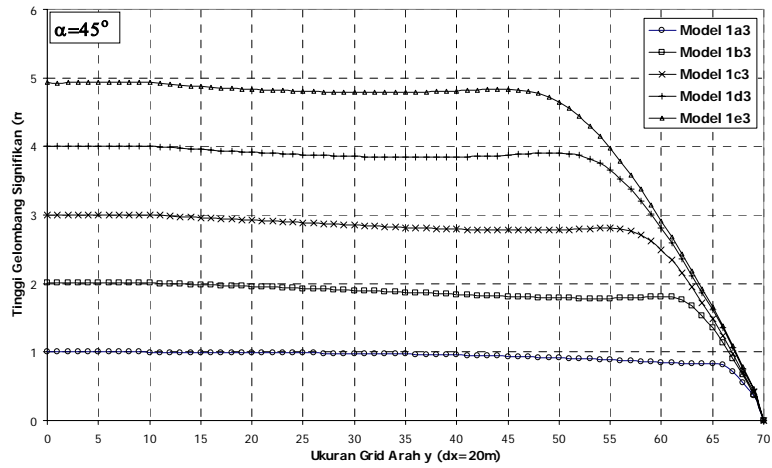
Analisa perubahan tinggi gelombang (akibat refraksi) juga dilakukan dengan melihat hubungan *wave steepness*, H_b/gT^2 dengan kedalaman dan tinggi gelombang pecah, d_b/H_b (Gambar 5 - 7). Berdasarkan hasil model tersebut dapat disimpulkan bahwa pada tinggi, periode dan arah gelombang yang sama, maka gelombang pecah akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kemiringan suatu perairan. Hasil model ini jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh CERC [19] mempunyai nilai yang hampir sama. Hal ini nampak dengan jelas kecenderungan bentuk dan pola garis yang sama.



Gambar 2. Perubahan tinggi gelombang Model 1 untuk arah gelombang datang 0°



Gambar 3. Perubahan tinggi gelombang Model 1 untuk arah gelombang datang 30°



Gambar 4. Perubahan tinggi gelombang Model 1 untuk arah gelombang datang 45°

TABEL 2
PERUBAHAN DAN LETAK TINGGI GELOMBANG PECAH PADA MODEL 1

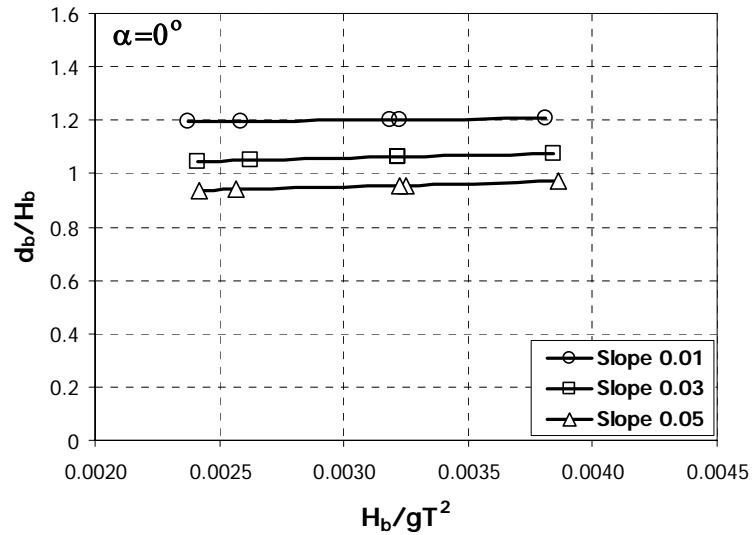
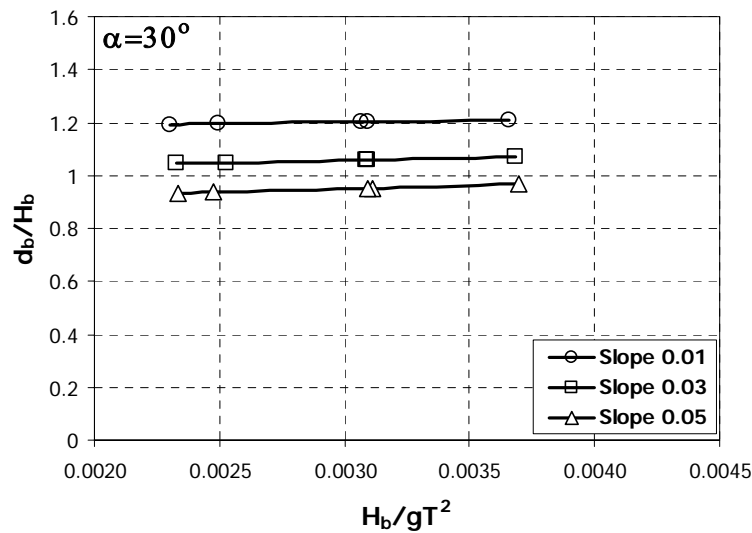
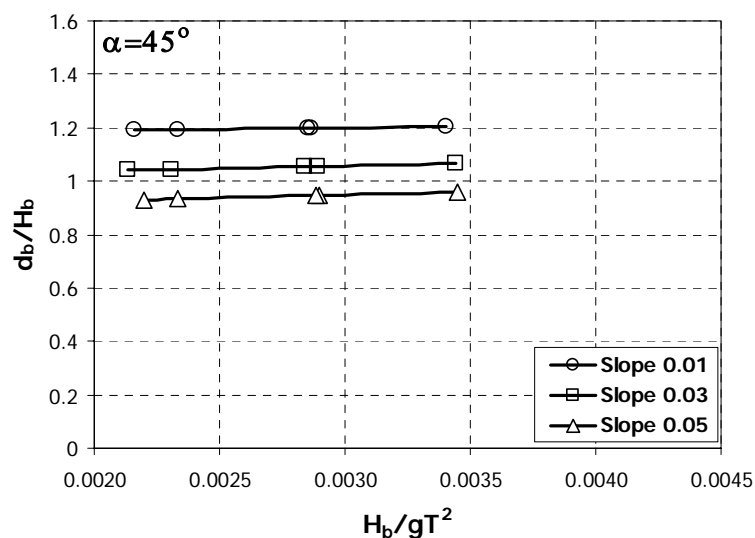
Parameter Gelombang	Model 1 dengan $m = 0,01$														
	$\alpha = 0^\circ$					$\alpha = 30^\circ$					$\alpha = 45^\circ$				
	a1	b1	c1	d1	e1	a2	b2	c2	d2	e2	a3	b3	c3	d3	e3
Ho (m)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hb (m)	0.93	2.02	3.13	4.29	5.24	0.89	1.94	3.01	4.14	5.08	0.84	1.79	2.79	3.87	4.77
db (m)	1.13	2.43	3.76	5.12	6.26	1.08	2.33	3.61	4.94	6.06	1.01	2.16	3.36	4.61	5.68
Xb (m)	113	243	376	512	626	108	233	361	494	606	101	216	336	461	568
Perubahan H (o/o)	-7	2	13	29	24	-11	-6	1	14	8	-16	-21	-21	-13	-23
Perubahan H rata-rata (o/o)	12.2					1.2					-18.8				
Reduksi tinggi gelombang pecah (Hb) terhadap $\alpha = 0^\circ$ untuk Ho dan T yang sama (o/o)						4.49	4.12	3.99	3.62	3.15	10.7	12.8	12.2	10.9	9.85

TABEL 3
PERUBAHAN DAN LETAK TINGGI GELOMBANG PECAH PADA MODEL 2

Parameter Gelombang	Model 2 dengan $m = 0,03$														
	$\alpha = 0^\circ$					$\alpha = 30^\circ$					$\alpha = 45^\circ$				
	a1	b1	c1	d1	e1	a2	b2	c2	d2	e2	a3	b3	c3	d3	e3
Ho (m)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hb (m)	0.94	2.02	3.16	4.34	5.32	0.91	1.94	3.03	4.19	5.13	0.84	1.81	2.78	3.83	4.71
db (m)	1.01	2.15	3.35	4.57	5.56	0.97	2.06	3.21	4.39	5.36	0.9	1.91	2.94	4	4.89
Xb (m)	33.7	71.7	112	152	185	32.4	68.7	107	146	179	30	63.7	98.1	133	163
Perubahan H (o/o)	-6	2	16	34	32	-9	-6	3	19	13	-16	-19	-22	-17	-29
Perubahan H rata-rata (o/o)	15.6					4					-20.6				
Reduksi tinggi gelombang pecah (Hb) terhadap $\alpha = 0^\circ$ untuk Ho dan T yang sama (o/o)						3.3	4.12	4.29	3.58	3.7	11.9	11.6	13.07	13.3	13

TABEL 4
PERUBAHAN DAN LETAK TINGGI GELOMBANG PECAH PADA MODEL 3

Parameter Gelombang	Model 2 dengan $m = 0,05$														
	$\alpha = 0^\circ$					$\alpha = 30^\circ$					$\alpha = 45^\circ$				
	a1	b1	c1	d1	e1	a2	b2	c2	d2	e2	a3	b3	c3	d3	e3
Ho (m)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hb (m)	0.95	2.04	3.16	4.26	5.34	0.91	1.95	3.03	4.1	5.15	0.85	1.82	2.83	3.87	4.85
db (m)	0.92	1.95	3.02	4	5	0.88	1.86	2.89	3.85	4.81	0.81	1.72	2.68	3.62	4.52
Xb (m)	18.4	39	60.4	80	100	17.6	37.2	57.8	77	96.2	16.2	34.4	53.6	72.4	90.4
Perubahan H (o/o)	-5	4	16	26	34	-9	-5	3	10	15	-15	-18	-17	-13	-15
Perubahan H rata-rata (o/o)	15					2.8					-15.6				
Reduksi tinggi gelombang pecah (Hb) terhadap $\alpha = 0^\circ$ untuk Ho dan T yang sama (o/o)						4.4	4.62	4.29	3.9	3.69	11.8	12.1	11.7	10.1	10.1

Gambar 5. Hubungan d_b/H_b dengan H_b/gT^2 untuk arah gelombang datang 0° Gambar 6. Hubungan d_b/H_b dengan H_b/gT^2 untuk arah gelombang datang 30° Gambar 7. Hubungan d_b/H_b dengan H_b/gT^2 untuk arah gelombang datang 45°

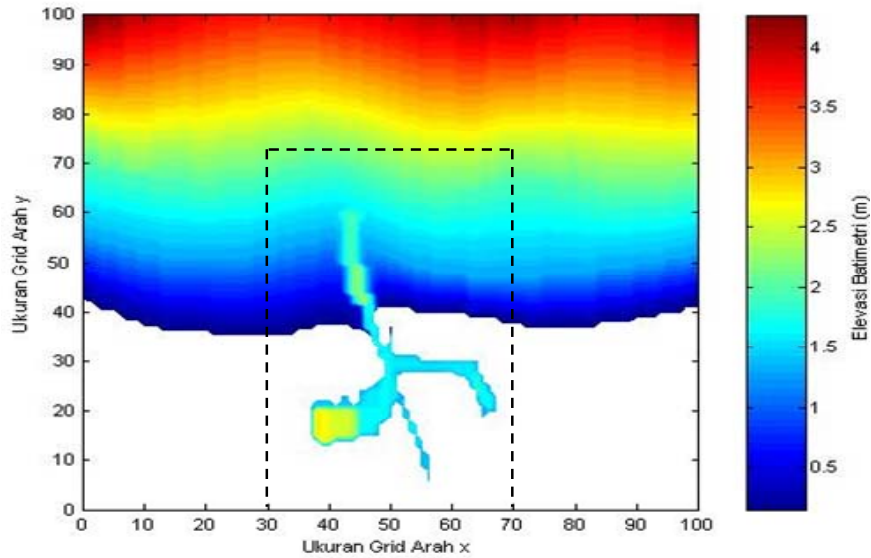
Simulasi SWAN di pelabuhan Tegal. Simulasi dengan model SWAN pada perairan di Indonesia sebagai contoh studi dilakukan di pelabuhan Tegal Jawa Tengah. Pada pelabuhan ini terdapat *jetty* memanjang dari garis

pantai ke tengah laut sepanjang 470 m. Data peta kolam labuh dan alur diperoleh dari hasil *sounding* PELINDO III 14 Juli 2006 dan peta Lingkungan Pantai Indonesia (LPI) tahun 1998. Ukuran daerah perhitungan untuk pe-

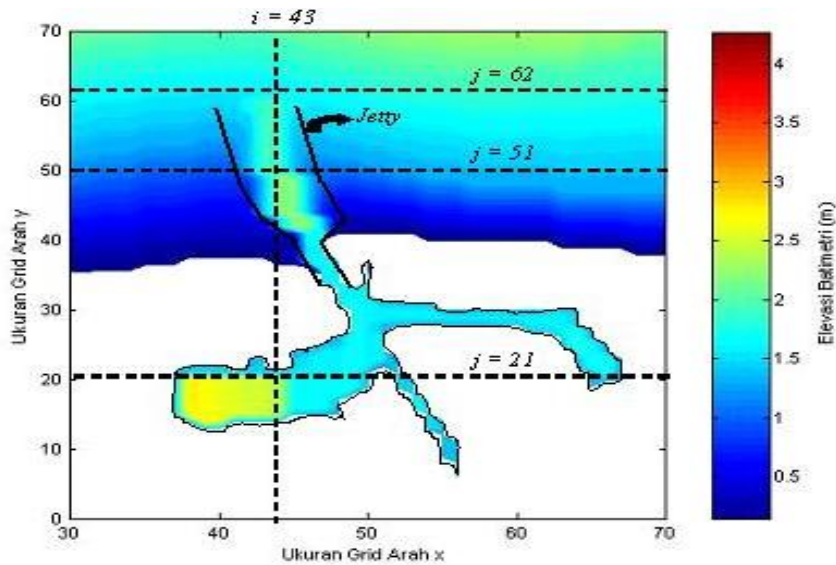
modelan adalah 2000m x 2000m yang dibagi dalam *grid* kearah x dan y sebesar 100, sehingga jarak antar *grid* adalah 20 m (Gambar 8). Berdasarkan prediksi dari data angin didapat Tinggi gelombang signifikan, $H_s = 2,4$ m dengan periode gelombang, $T = 7$ detik.

Model SWAN digunakan untuk analisa perubahan penjalaran tinggi gelombang sebelum dan sesudah ada-

nya bangunan *jetty* pada lokasi di alur (*grid* $i = 43$), di depan *jetty* (*grid* $j = 62$), di belakang *jetty* (*grid* $j = 51$), dan di kolam labuh (*grid* $j = 21$), seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Dari dua kondisi sebelum dan sesudah adanya *jetty* tersebut akan dilakukan perhitungan nilai perubahan rata-rata tinggi gelombang signifikan dan perubahan arah gelombang untuk tiap arah gelombang datang.



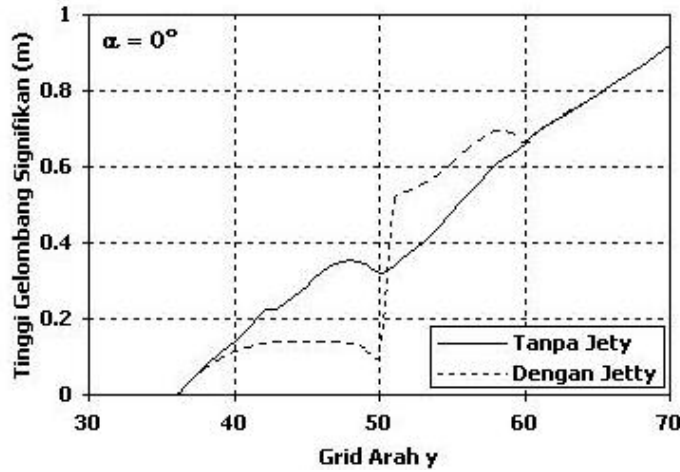
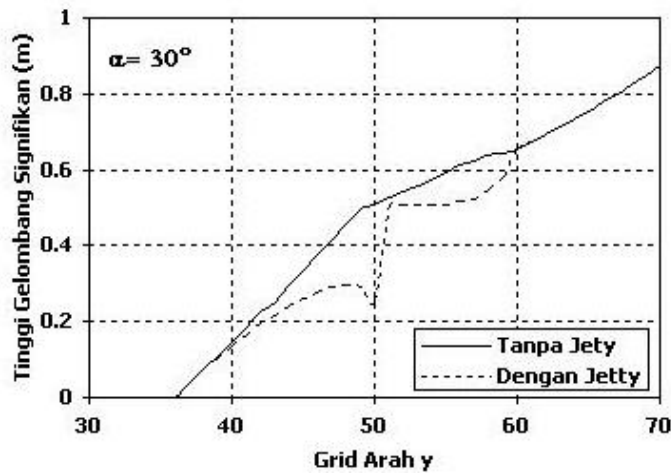
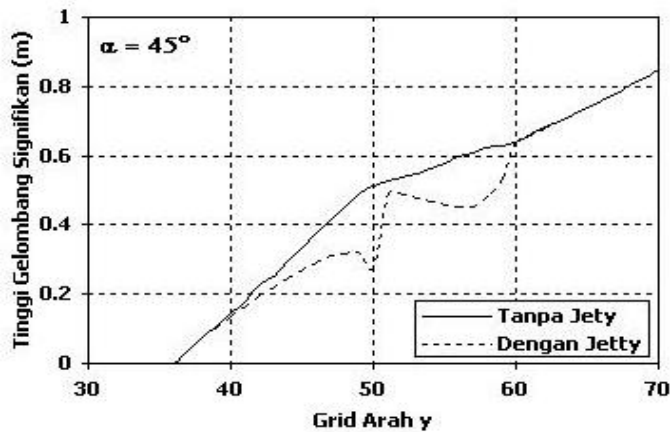
Gambar 8. Domain komputasi untuk simulasi di pelabuhan Legal



Gambar 9. Lokasi analisa pengaruh *jetty* terhadap parameter gelombang

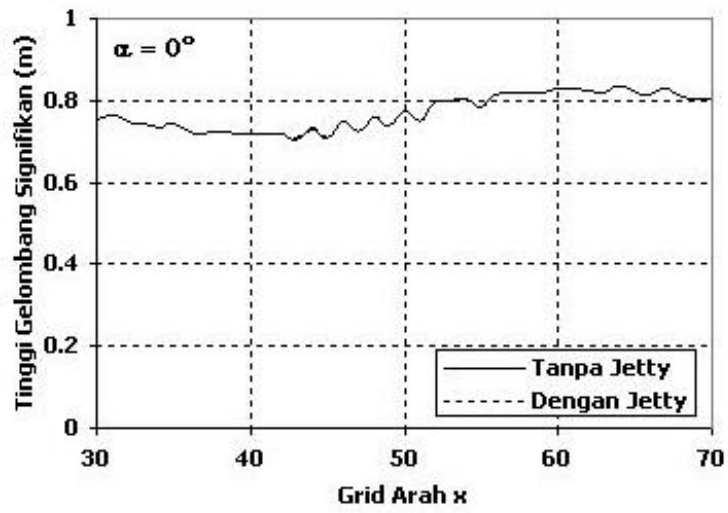
Berdasarkan hasil model SWAN, untuk arah gelombang datang 0° setelah ada *jetty* tinggi gelombang pada *grid* ke 50-60 mulai naik karena dampak dari difraksi gelombang yang menghantam pada dinding *jetty* sehingga menimbulkan energi gelombang, kemudian turun secara drastis (Gambar 10). Sebaliknya pada arah gelombang

30° dan 45° tinggi mengalami penurunan setelah adanya *jetty* (Gambar 11 dan Gambar 12). Perubahan rata-rata tinggi gelombang di daerah alur pelabuhan adalah 2,64% ; 10,53% dan 12,96% untuk arah gelombang 0° , 30° dan 45° secara berturut-turut.

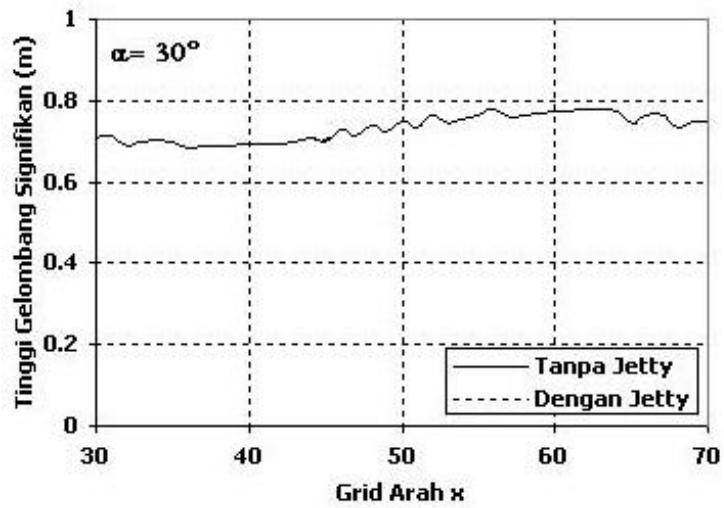
Gambar 10. Perubahan tinggi gelombang di alur pelabuhan Tegal pada $\alpha=0^\circ$ Gambar 11. Perubahan tinggi gelombang di alur pelabuhan Tegal pada $\alpha=30^\circ$ Gambar 12. Perubahan tinggi gelombang di alur pelabuhan Tegal pada $\alpha=45^\circ$

Pada lokasi didepan *jetty* (*grid j* = 62) tinggi gelombang hampir tidak mengalami perubahan (0,02%) baik pada arah gelombang 0° , 30° dan 45° . Karena gelombang mengalami reduksi di sebelah kiri dan kanan *jetty* dan dampak gelombang pantul tidak terasa pada lokasi sekitar 70 m di depan *jetty* (Gambar 13-15). Pada posisi di belakang *jetty* (*grid j* = 51) yakni alur pelabuhan, gelombang mengalami kenaikan akibat difraksi gelombang di kedua dinding *jetty*. Disebelah kiri *jetty* gelombang tertahan oleh *jetty* sedangkan di kanan *jetty* tinggi gelombang naik sebelum berimpit karena dampak dari gelombang pantul. Perubahan rata-rata tinggi gelombang pada kon-

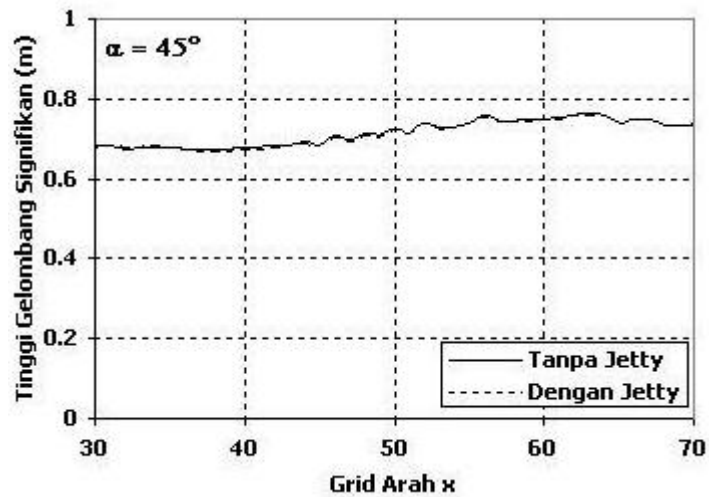
disi ini adalah sebesar 1,12% ; 0,18% dan 3,55% untuk arah gelombang datang 0° , 30° dan 45° (Gambar 16-18). Analisa perubahan tinggi gelombang di daerah kolam pelabuhan (*grid j* = 21) secara keseluruhan gelombang mengalami penurunan yang sangat tajam akibat adanya *jetty* walaupun tinggi gelombang di kolam labuh sangat kecil (0-0,014 m). Penurunan ini disebabkan karena ruang gerak air di pelabuhan semakin sempit dan jaraknya cukup jauh dari muara pelabuhan (800 m). Perubahan rata-rata tinggi gelombang dikolam labuh adalah 63,03% ; 228,91% dan 227,17% pada arah gelombang 0° , 30° dan 45° . (Gambar 19-21).



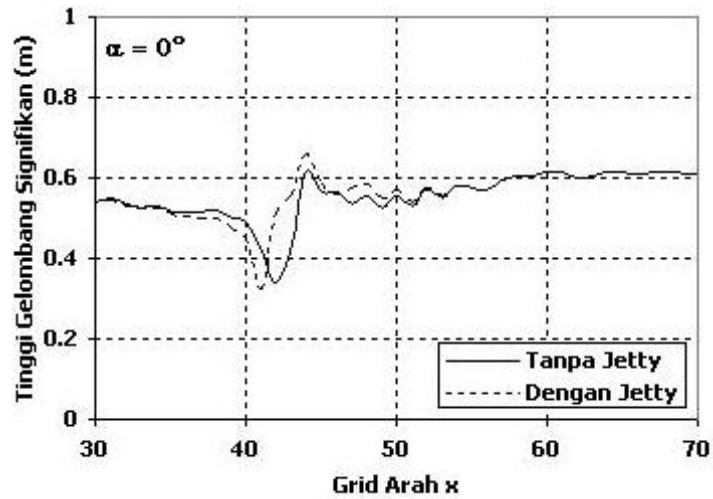
Gambar 13. Perubahan tinggi gelombang di depan *jetty* pada $\alpha=0^\circ$



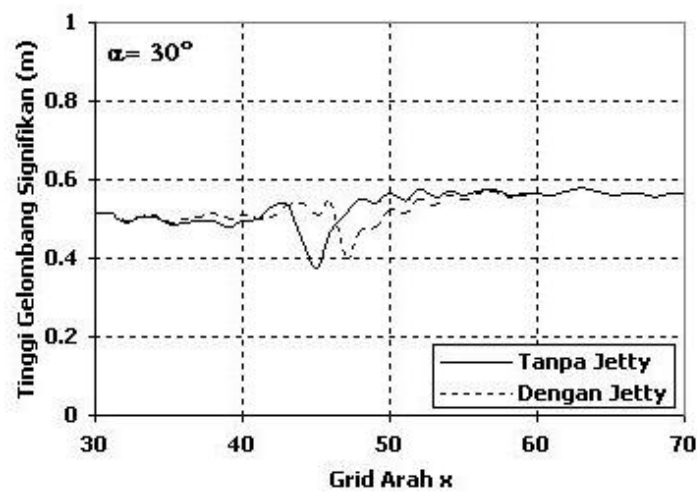
Gambar 14. Perubahan tinggi gelombang di depan *jetty* pada $\alpha=30^\circ$



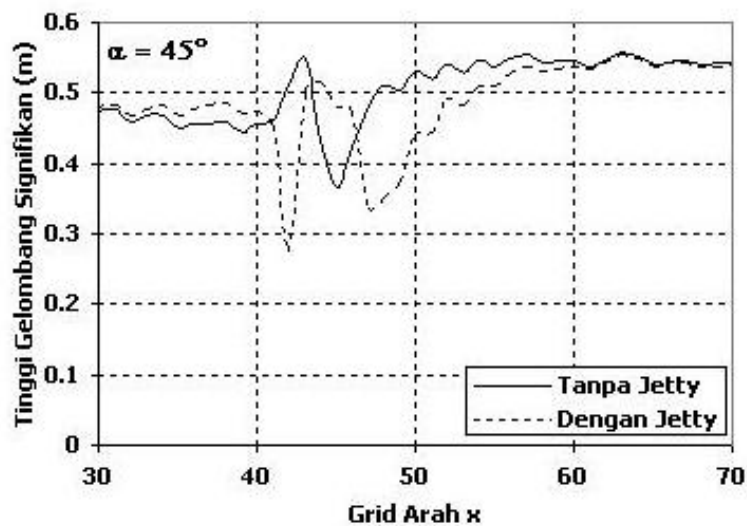
Gambar 15. Perubahan tinggi gelombang di depan *jetty* pada $\alpha=45^\circ$



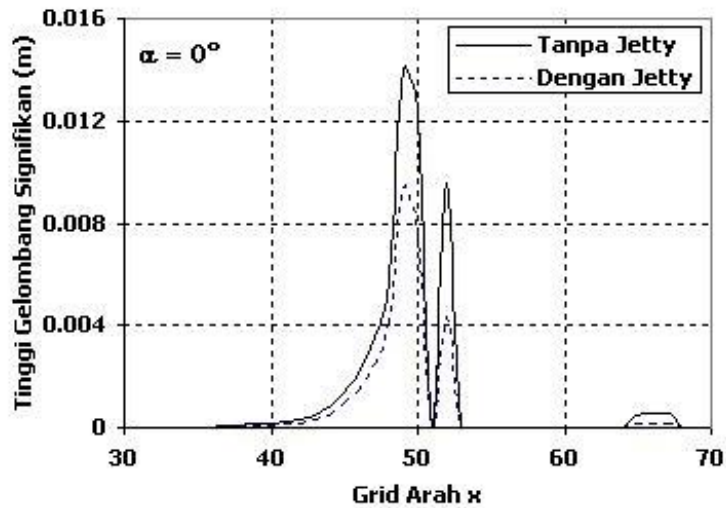
Gambar 16. Perubahan tinggi gelombang di belakang *jetty* pada $\alpha=0^\circ$



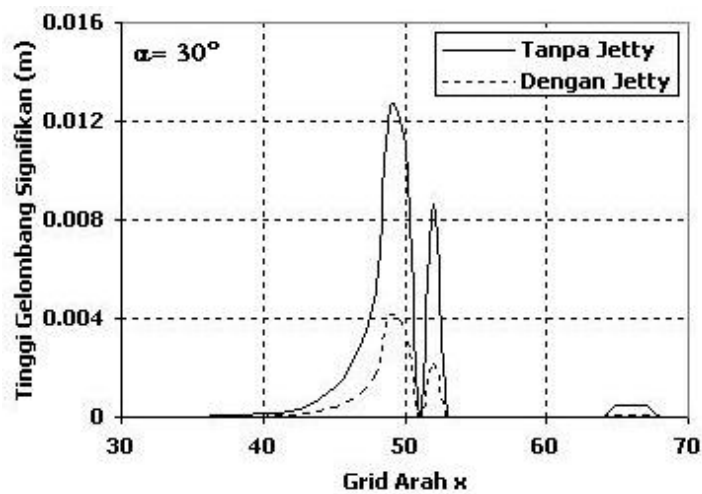
Gambar 17. Perubahan tinggi gelombang di belakang *jetty* pada $\alpha=30^\circ$



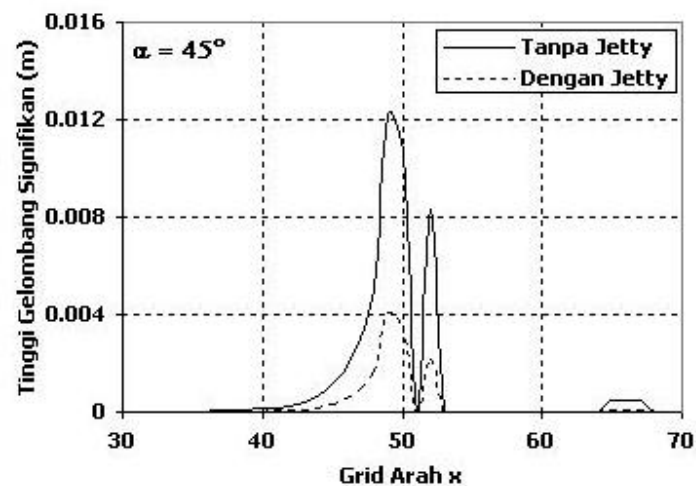
Gambar 18. Perubahan tinggi gelombang di belakang *jetty* pada $\alpha=45^\circ$



Gambar 19. Perubahan tinggi gelombang di kolam labuh pada $\alpha=0^\circ$



Gambar 20. Perubahan tinggi gelombang di kolam labuh pada $\alpha=30^\circ$



Gambar 21. Perubahan tinggi gelombang di kolam labuh pada $\alpha=45^\circ$

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pemodelan numerik refraksi gelombang dengan SWAN diberbagai profil pantai dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada batimetri dengan kemiringan 0,01 ; 0,03 dan 0,05 dan arah gelombang datang 0° , 30° dan 45° tinggi gelombang akan mengalami perubahan aki-

bat refraksi gelombang sebesar 2%-34%. Berdasarkan hubungan terjadinya gelombang pecah diketahui bahwa pada arah, tinggi dan periode gelombang sama, maka tinggi gelombang pecah akan semakin besar seiring bertambahnya kemiringan perairan. Hal ini akibat harga d_b/H_b semakin kecil yang menunjukkan puncak gelombang semakin curam.

2. Pengaruh pembangunan *jetty* di pelabuhan Tegal terhadap perubahan tinggi gelombang yang sangat besar terjadi pada kolam labuh (228,91%) dengan arah gelombang 30°, sehingga air kondisinya lebih tenang. Sedangkan pada alur, di belakang *jetty* dan didepan *jetty* gelombang mengalami reduksi terbesar 12,96% ; 0,02% dan 3,55% pada arah gelombang 45°. Pada kondisi didepan *jetty* gelombang hampir tidak mengalami reduksi karena difraksi dan gelombang pantul tidak berdampak sekitar jarak 70 m di depan *jetty*.
3. Penelitian dengan model SWAN ini keakuratannya telah diverifikasi dengan model fisik, namun demikian pada kasus di pelabuhan Tegal ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan pengamatan gelombang secara langsung baik sebelum dan sesudah pembangunan *jetty*, sehingga pengaruh refleksi dan difraksi akibat *jetty* dapat diketahui dengan sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jin, K.R., and Ji, R.G. 1999, "Calibration and Verification of Spectral Wind-Wave Model for Lake Okeechobee", *Ocean Engineering*, Vol 28, pp. 571-584.
- [2] Andrew, C.J.F. 1999, "Bibliographic Review of nearshore Wave Model", Maritime Operation Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne Victoria, Australia.
- [3] Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. 1983, "A Parabolic Equation For Combined Refraction-Diffraction of Stokes by Mild Varying Topography", *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp. 543-566.
- [4] Booij, N., Holthuijsen L.H., and Hernandez., P.R. 1997, "Numerical Wave Propagation On a Curvilinear Grid", *Ocean Wave Measurement and Analysis*, Vol 1, pp. 286-294
- [5] Holthuijsen, L.H., Herman, A., and Booij, N. 2003, "Phase Decoupled Refraction-Diffraction for Spectral Wave Model", *Coastal Engineering*, Vol 49, pp. 291-305.
- [6] Madsen P.A, and Sørensen, R. 1992, 'A new Form of the Boussinesq Equation with Improve Linier Dispersion Characteristics Part 2 a Slowly-Varying Bathymetry", *Coastal Engineering*, Vol 18, pp. 183-204.
- [7] WAMDI Group, 1988, "The WAM Mode a Third Generation Ocean Wave Prediction Model", *Phys.Oceanography*, Vol 18, pp.1775-1810.
- [8] Battjes, J.A. 2003, 'Development in Coastal Engineering Research', *Proceeding of 50th Japanese Conference on Coastal Engineering*, pp. 25-39.
- [9] Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.T.M., Kriezti, E.E., Zijelma, M., and van der Westhuyzen, A.J. 2004, "SWAN User Manual Cycle III version 40.31". Delft University of Technology, Delft.
- [10] Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.T.M., Kriezti, E.E., Zijelma, M., and van der Westhuyzen, A.J. 2004, "SWAN User Manual Cycle III version 40.41". Delft University of Technology, Delft.
- [11] Booij, N., Ris R.C., and Holthuijsen L.H. 1999, "A Third Generation Wave Model for Coastal Region Part I model Description and Validation", *Geophysics Research*, Vol 104, pp.7649-7666.
- [12] Mai, S., Ohle, N., and Zimmarmenn, C. 1999. "Applicability of Wave Model in Shallow Coastal Waters", *Proceeding of The 5th International COPEDEC*, Cape Town, South Africa 1999, Pp. 170-179.
- [13] Silva, A.A.P., Makarynsky, O., Monbaliu, J., and Soares, C.V. 2002. "WAM/SWAN Simulation in an Open Coast: Comparison with ACDP Measurement", *Littoral 2002 The Changing Coast Eurocoast/EUCC*, Porto, Portugal.
- [14] Dykes, J.D., Hsu. Y.L., and Rogers, W.E, 2003. "The Development of an Operational SWAN Model for NGLI", Naval Research Laboratory, Missisipi, USA.
- [15] Sujantoko, Armono, H.D Dan Novianto, A. 2005, "Verifikasi Model Gelombang Swan Dengan Hasil Eksperimen", *Jurnal Teknologi Kelautan Ftk Its*, Nopember.
- [16] Gorman, R.M., and Nielson, C.G. 1999, "Modelling Shallow Water Wave Generation and Transformation in An Intertidal Estuary", *Coastal Engineering*, Vol 36, Pp. 197-217
- [17] Chen, Q.J., and Douglas, S.L. 2002, "Characteristic of Ship Wave and Wind Wave in Mobile Bay", Annual Report Summary 4/1/02, Department of Civil Engineering, University of South Alabama.
- [18] Schoones, J.S., and Luger, S.A. 2003, "EIA for The Ekspansion of Containment Terminal Stacking Area at The Port of Cape Town", CSIV Report ENV-S-C 2003-83, CSIR Enviromentek, Cape Town.
- [19] Park, S., and Park, S.H. 2004, "Operational Wave Forecast and Verification at KMA and New Implementation Planar for The 2nd Phase KMA Superkomputer", Numerical Weather Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul.
- [20] Edge, B.L. 2004, "Insitu Containment and Treatment: Engineering Cap Integrity and Reactivity", EPA Project Report, HSRC/S & Sw, Texas A & M University.
- [21] CERC 1984, "Shore protection Manual", US Army coastal Engineering Research centre, Washington