LINTASAN GELOMBANG LAUT MENUJU PELABUHAN PULAU BAAI BENGKULU

Birhami Akhir¹, Mas Mera²

ABSTRAK

Penelitian ini adalah tentang prediksi lintasan gelombang laut di pelabuhan Pulau Baai di Provinsi Bengkulu yang memperhitungkan refraksi dan pendangkalan gelombang. Prediksi ini membutuhkan parameter-parameter: data batimetri, tinggi gelombang laut dalam, periode gelombang, koefisien pendangkalan, koefisien refraksi, dan sudut datang gelombang. Data batimetri adalah data sekunder. Tinggi gelombang laut dalam diperoleh dari hubungan skala Beaufrot dan data angin. Data angin juga data sekunder. Periode gelombang diperoleh dari hubungan panjang *fetch* efektif dan kecepatan angin di laut. Kecepatan angin diperoleh dari pengolahan dan analisis data angin. Koefisien pendangkalan merupakan fungsi dari nilai asimtot dan panjang gelombang. Panjang gelombang diperoleh dari hubungan dispersi. Koefisien refraksi diperoleh dari fungsi jarak ortogonal antara dua lintasan gelombang sebelum dan sesudah dibiaskan. Skenario simulasi lintasan gelombang didasarkan pada variasi sudut datang gelombang di laut dalam. Lintasan gelombang lokal ditentukan dengan hukum Snellius. Dari Skala Beaufrot diperoleh tinggi gelombang laut dalam setinggi 2 meter dan dari grafik SMB (Sverdrup, Munk and Bretschneider) diperoleh periode gelombang 7 detik. Prediksi penjalaran gelombang dari laut dalam adalah lintasan gelombang di sekitar *breakwater* (pemecah gelombang) merapat (terjadi pengumpulan energi gelombang) sehingga tinggi gelombangnya membesar yang mencapai 3,16 meter. Sedangkan pada daerah mulut pelabuhan lintasan gelombang menyebar (terjadi penyebaran energi gelombang) sehingga tinggi gelombangnya mengecil yang mencapai 1,24 meter.

Kata Kunci: lintasan, pendangkalan, refraksi, dispersi, energi, tinggi gelombang.

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki lebih dari 3.700 buah pulau dengan garis pantai sepanjang 80.000 km (Triatmodjo, 1999). Hal ini seharusnya dapat memicu kita untuk tahu lebih banyak tentang laut karena laut dapat berfungsi sebagai prasarana transportasi, tempat pariwisata dan sebagai lokasi eksplorasi sumber-daya laut dan dasar laut. Untuk itu, pengetahuan tentang parameter gelombang suatu perairan seperti tinggi dan periode gelombang menjadi penting. Parameter-parameter ini selalu digunakan sebagai dasar dalam perencanaan bangunan pantai dan lepas pantai, serta untuk keselamatan dan kenyamanan dalam pelayaran. Tetapi informasi tentang parameter gelombang yang merupakan karakteristik gelombang ini di perairan Indonesia saat ini sangat kurang, hal ini disebabkan mahalnya operasional pengumpulan data aktual serta masih kurangnya penelitian di bidang ini yang pernah dilakukan.

Lolong pada tahun 1998 melakukan penelitian tentang karakteristik gelombang laut berupa tinggi, periode dan spektrum gelombang di perairan Lemahabang di Provinsi Jawa Tengah. Penelitian ini dilakukan dengan tiga pendekatan yaitu: analisis domain waktu, analisis domain frekuensi, serta perbandingan antara prediksi (perhitungan, ramalan) dan data lapangan. Prediksi penentuan tinggi dan periode gelombang menggunakan metode pada CERC (1984). Analisis domain waktu merupakan pengukuran langsung, sebab tinggi dan periode gelombangnya berasal dari hasil pencatatan langsung di lapangan, sehingga hasilnya dijadikan sebagai dasar untuk mengkalibrasi

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas, email: babackraider@gmail.com

² Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas, email: masmera@ft.unand.ac.id

tinggi dan periode gelombang hasil analisis domain frekuensi, juga untuk mengkalibrasi hasil prediksi menggunakan metode pada CERC. Hasil yang diperoleh dari analisis domain waktu menunjukkan tinggi gelombang signifikan perairan Lemahabang berkisar antara 0,28 s/d 0,99 meter dan periode signifikan 2,77 s/d 12,52 detik. Perbandingan tinggi dan periode gelombang hasil analisis domain waktu terhadap hasil analisis domain frekuensi, H_s/H_{m0} berkisar antara 0,93 s/d 1,09 dan T_s/T_{m0} antara 0,99 s/d 1,32. Perbandingan ini memberikan nilai yang mendekati satu, hal ini mengindikasikan bahwa spektrum yang dihasilkan dalam analisis domain frekuensi dapat mewakili spektrum yang sebenarnya dari laut tersebut. Spektrum bulanan dari perairan Lemahabang pada umumnya mempunyai satu puncak yang dominan kecuali pada beberapa bulan tertentu spektrumnya mempunyai beberapa puncak tetapi tetap mempunyai satu puncak yang dominan. Perbandingan antara tinggi dan periode gelombang signifikan prediksi terhadap data lapangan adalah H_s (prediksi) / H_s (ukur) = 0,25 s/d 0,59 dan T_s (ramal)/ T_s (ukur) = 0,25 s/d 0,53. Dalam meramalkan tinggi dan periode gelombang di perairan Lemahabang faktor koreksi ini perlu diperhitungkan.

Pada tahun 2005, Zein dan Tarigan melakukan analisis refraksi gelombang pada pantai dengan menggunakan empat metode, yaitu metode ortogonal, metode Snellius, metode diagram dan metode panjang gelombang. Keempat metode ini pada dasarnya mengacu pada teori gelombang linier atau teori gelombang amplitudo pendek (*small-amplitude wave teori*). Hasil yang diperoleh dari tiap-tiap metode menunjukkan hasil visualisasi sudut pembelokan yang cukup baik untuk digunakan dalam memahami dan menganalisis refraksi gelombang. Namun terdapat keterbatasan pada tiap-tiap metode yang mempengaruhi beberapa kasus. Seperti pada metode ortogonal, ada keterbatasan nilai perbandingan kecepatan gelombang pada *template* sehingga penggambaran refraksi tidak dapat dilakukan untuk nilai perbandingan kecepatan gelombang yang relatif besar. Pada metode Snellius terdapat nilai beda sudut perpindahan gelombang yang cukup kecil sehingga sulit untuk memvisualisasikan hasil refraksi dibandingkan dengan metode ortogonal. Metode panjang gelombang, walaupun sulit untuk digambarkan tapi memiliki kelebihan dalam penggunaan yang tidak terbatas hanya untuk pantai dengan kontur lurus dan sejajar.

Pada tahun 2007, Riyadi menggunakan model numeris SWAN (*Simulating Wave Nearshore*) untuk mensimulasi penjalaran gelombang dengan mempertimbangkan efek refraksi untuk profil pantai yang mempunyai kemiringan 0,01, 0,03 dan 0,05 untuk melihat pola gelombang pecah. Model numeris ini juga diaplikasi untuk mensimulasikan penjalaran gelombang di Pelabuhan Tegal, Jawa Tengah untuk melihat pengaruh *jetty* terhadap tinggi dan arah penjalaran gelombang.

Hasil simulasi menggunakan model numeris ini menunjukkan bahwa batimetri dengan kemiringan 0,01, 0,03, dan 0,05 untuk sudut gelombang datang 0° , 30° , dan 45° , terjadi gelombang pecah dengan persentase perubahan tinggi gelombang 2% sampai dengan 34%. Pengaruh pembangunan *jetty* di Pelabuhan Tegal terhadap perubahan tinggi gelombang signifikan yang sangat besar terjadi pada kolam pelabuhan dengan sudut datang 30° , sehingga kondisi air lebih tenang, dan nilai perubahan reduksi tinggi gelombang signifikan rata-rata mencapai 228,91%. Perubahan arah penjalaran gelombang rata-rata akibat pembangunan *jetty* di Pelabuhan Tegal terbesar terjadi pada lokasi di belakang *jetty* dengan sudut datang 45° , yaitu sebesar $6,31^\circ$.

Dengan menggunakan model numeris yang sama dengan Riyadi (2007), Rojali pada tahun 2009 menggunakan model numeris SWAN ini untuk mensimulasikan penjalaran gelombang di laut selatan Bali. Transformasi gelombang yang diamati adalah refraksi, dissipasi dan gelombang pecah. Parameter gelombang yang dijadikan *input* untuk program SWAN ini didapat dari model *WAVEWATCH III* dan kondisi angin dari NCEP. Simulasi juga dilakukan untuk menyelidiki sensitivitas gelombang terhadap angin dengan kondisi angin yang berbeda dan uji pengaruh dissipasi. Kondisi angin dengan kecepatan tinggi menghasilkan distribusi gelombang yang tinggi pula. Bila *input* parameter gelombang kasus waktu pertama digunakan untuk menyelidiki faktor

disipasi, kontributor terbesar dalam peluruhan gelombang adalah *wave blocking* sebesar 64% yang timbul akibat adanya penghalangan penjalaran gelombang dari bentuk garis pantai. Hasil perbandingan tinggi gelombang simulasi SWAN memberikan nilai rms (*root mean square*) sebesar 0,26 untuk persamaan Young dan Verhagen (1996) (lihat Rojali, 2009) dan 0,25 untuk persamaan Bretschneider (1984) (lihat Rojali, 2009).

Taqwim (2009) melakukan studi tentang penjalaran dan transformasi gelombang menggunakan model numeris MIKE 21 *Near Shore Spectral Waves* (NSW). Penggunaan model numeris ini ditujukan untuk mensimulasikan dan menganalisis penjalaran serta transformasi gelombang di perairan sintetis dengan berbagai skenario simulasi pengujian perubahan parameter gelombang yang melibatkan efek refraksi, pendangkalan dan gelombang pecah. Hasil simulasi telah dapat menggambarkan keadaan fisis dari penjalaran dan transformasi gelombang. Sedangkan untuk hasil pengujian perubahan nilai parameter gelombang terhadap model, didapatkan bahwa perubahan batimetri yang diwakili oleh variasi besarnya kemiringan dasar, merupakan parameter yang paling peka terhadap penjalaran gelombang. Sebagai validasi, dilakukan pengujian pada model terhadap pengukuran laboratorium transformasi gelombang terkait efek pendangkalan dan gelombang pecah yang dilakukan oleh Izumiya dan Horikawa (1983) (lihat Taqwin, 2009) dengan kemiringan dasar yang konstan. Dari validasi ini didapatkan bahwa data hasil model MIKE NSW dengan nilai referensi parameter gelombang pecah dari Nelson (1987) (lihat Taqwin, 2009), mempunyai kesalahan rms yang lebih kecil daripada model analitis yang diujikan Watanabe dan Maruyama (1986) (lihat Taqwin, 2009). Nilai kesalahan rms ini sebesar 0.1040467 meter.

Provinsi Bengkulu terletak di pulau Sumatera, membujur dari utara ke selatan dibatasi oleh Bukit Barisan di sebelah timur dan Samudera Indonesia di sebelah barat. Provinsi Bengkulu terus berbenah meningkatkan perekonomiannya dengan menjadikan Pelabuhan Pulau Baai sebagai gerbang utama keluar masuk barang ke dan dari provinsi itu. Pelabuhan Pulau Baai Bengkulu merupakan pelabuhan laut yang terbuka untuk umum dan merupakan pelabuhan samudera satu-satunya di daerah Provinsi Bengkulu.

Salah satu parameter utama dalam merencanakan (*design*) struktur dan tata letak (*layout*) pelabuhan adalah tinggi gelombang di kawasan dimana pelabuhan akan dibangun. Dinas Hidro Oseanografi (Dihidros) TNI AL (Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut) telah membuat peta laut pada pelabuhan Pulau Baai dengan mengukur kontur dasar lautnya (*bathymetry*).

Penelitian yang sekarang ini adalah memprediksi lintasan gelombang laut menuju Pelabuhan Pulau Baai Bengkulu. Transformasi gelombang yang dipertimbangkan adalah refraksi dan pendangkalan, sehingga tinggi dan arah gelombang di depan mulut Pelabuhan Pulau Baai dapat diperkirakan.

2. PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Tinggi gelombang merupakan faktor utama dalam mendisain bangunan-bangunan pantai seperti dermaga, groin, *jetty* dan *sea wall*. Gelombang yang kita lihat sehari-hari di tepi pantai umumnya gelombang yang dibangkitkan oleh angin (*wind-generated waves*). Secara periodik, gelombang yang terjadi juga disebabkan oleh pasang surut.

Gelombang yang dibangkitkan angin ini terbentuk karena transfer energi dari angin ke permukaan air. Kecepatan angin menimbulkan riak kecil di atas permukaan air. Bila kecepatan angin bertambah, riak tersebut semakin besar, dan bila angin berhembus terus maka terjadilah gelombang. Semakin lama dan semakin kuat angin berhembus maka semakin besar gelombang yang terbentuk. Tiga faktor yang mempengaruhi karakteristik gelombang yang dibangkitkan oleh angin, adalah: (a) lama angin bertiup atau durasi angin; (b) kecepatan angin; dan (c) *fetch* (jarak yang ditempuh angin pada daerah pembangkitan gelombang).

Gelombang harmonik yang terbentuk ini dinamakan dengan gelombang signifikan (*significant waves*) dengan periodenya disimbolkan dengan T_s dan tingginya dengan H_s . Biasanya tinggi dan periode gelombang signifikan yang digunakan adalah T_{33} dan H_{33} . Pembangkitan gelombang oleh angin didasarkan pada data angin dan panjang *fetch* efektif.

2.1 Fetch

Fetch didefinisikan sebagai daerah yang dipengaruhi oleh angin dan arahnya konstan. *Fetch* dibatasi oleh bentuk daratan yang mengelilingi laut. Peta *fetch* untuk Pelabuhan Pulau Bai diperlihatkan oleh **Gambar 1**. Di daerah pembentukan gelombang, gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin tetapi juga dalam berbagai sudut terhadap arah angin. Peramalan tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan dapat dilakukan dengan menggunakan grafik Sverdrup, Munk and Bretschneider (SMB) (CERC, 1984). Persamaan panjang *fetch* efektif:

$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i}$$

dimana: F_{eff} adalah panjang *fetch* efektif; X_i adalah panjang segmen *fetch* yang diukur dari titik observasi gelombang ke ujung akhir *fetch*; α adalah deviasi pada kedua sisi dari arah angin, dengan menggunakan pertambahan 6° sampai sudut sebesar 42° pada kedua sisi dari arah angin. Hasil perhitungan panjang *fetch* efektif dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Gambar 1. Peta *Fetch* Dari Arah Barat di Pelabuhan Pulau Baai

Tabel 1. Perhitungan Panjang *Fetch* Efektif Dari Arah Barat

α (°)	$\cos \alpha$	X_i (km)	$X_i \cos \alpha$ (km)
-42	0,743145	560,0	416,16
-36	0,809017	409,0	330,89
-30	0,866025	11,7	10,13
-24	0,913545	220,0	200,98
-18	0,951057	212,0	201,62
-12	0,978148	3.299,0	3226,91
-6	0,994522	6.261,0	6226,70
0	1,000000	6.773,0	6773,00
6	0,994522	6.954,0	6915,91
12	0,978148	6.420,0	6279,71
18	0,951057	5.902,0	5613,14
24	0,913545	6.165,0	5632,01
30	0,866025	7.980,0	6910,88
36	0,809017	15.132,0	12242,05
42	0,743145	15.329,0	11391,67
Total	13,510917		72371,75
$Feff = 72371,75 / 13,510917 = 5356,5$ km			
$Feff = 2892,3$ mil laut			

2.2 Angin

Data angin digunakan untuk meramalkan gelombang yang terjadi di permukaan laut pada lokasi pembangkitan. Data tersebut dapat diperoleh dari pengukuran langsung di atas permukaan laut (dengan kapal) atau pengukuran di darat (dekat lokasi peramalan). Kecepatan angin diukur oleh *anemometer* dengan satuan knots (1 knot = 1 mil laut / jam, 1 mil laut = 1852 m).

Pengukuran data angin di permukaan laut adalah yang paling sesuai untuk peramalan gelombang. Data angin dengan pengukuran di kapal perlu dikoreksi dengan menggunakan persamaan berikut ini (CERC, 1984):

$$U = 2,16(U_s)^{\frac{7}{9}}$$

dimana: U_s = kecepatan angin yang diukur di kapal (knots), dan U = kecepatan angin dikoreksi (knots).

Biasanya pengukuran vektor kecepatan angin dilakukan di daratan U_L . Padahal di dalam rumus-rumus pembangkitan gelombang data angin yang ada di atas permukaan laut U_w . Oleh sebab itu diperlukan transformasi dari data angin di daratan ke data angin di atas permukaan laut. Hubungan angin di atas permukaan laut dan angin di daratan diberikan oleh

$$R_L = \frac{U_w}{U_L}$$

Kecepatan angin $U = U_w$ dalam m/s dikoreksi dengan memperhitungkan faktor tegangan angin (*wind-stress factor*) sehingga:

$$U_A = 0,71U^{1,23}$$

dimana U_A adalah kecepatan angin dalam m/s.

Dari data angin diperoleh persentase kejadian angin terbesar dengan kecepatan angin yang dapat membangkitkan gelombang (≥ 10 knot) terjadi pada arah barat dengan persentase kejadian sebesar 1,06 % dan kecepatannya $U_L = 11$ knots = 5,659 m/s (lihat Akhir, 2012). Grafik hubungan kecepatan angin di darat dan di laut dapat dilihat pada Figure 3-15 di CERC (1984). Berdasarkan grafik tersebut diperoleh $R_L = 1,3$, sehingga $U_w = (1,3)(5,659) = 7,255$ m/s, maka

$$U_A = 0,71 (U_w)^{1,23} = 0,71 (7,255)^{1,23} = 8,125 \text{ m/s} = 15,794 \text{ knots} \approx 16 \text{ knots}$$

Dari hasil perhitungan, $U_A = 16$ knots dan $F_{eff} = 2892,3$ mil laut ≈ 2900 mil laut, maka berdasarkan grafik SMB (CERC, 1984) diperoleh periode gelombang $T = 6,9$ detik ≈ 7 detik.

Berdasarkan kecepatan angin ($= 16$ knots), dan dengan menggunakan skala Beaufrot (Wikipedia, 2012), diperoleh tinggi laut dalam $H_o = 2$ m.

2.3 Gelombang Laut

Panjang gelombang laut dalam L_o dan kecepatan gelombang laut dalam C_o berturut-turut adalah

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = 76,5 \text{ m}$$

$$C_o = \frac{L_o}{T} = 10,9 \text{ m/s}$$

dimana g adalah percepatan gravitas (m/s^2). Dalam Teknik Kelautan (Dean and Dalrymple, 2000), istilah "laut dalam" berarti bila perbandingan kedalaman dan penjang gelombang besar atau sama dengan setengah, maka laut dalam di depan Pelabuhan Pulau Baai adalah $h = (h/L) L_o = (0,5) 76,5 = 38,2$ m.

Panjang gelombang lokal ditentukan dengan hubungan dispersi:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

dimana: $\omega = 2\pi/T$; ω adalah frekuensi sudut; T = periode gelombang dalam detik; $k = 2\pi/L$; k adalah angka gelombang; L adalah panjang gelombang dalam meter. Hubungan dispersi adalah persamaan implisit sehingga tidak mempunyai penyelesaian analitis, tapi dapat diselesaikan dengan cara numeris, seperti menggunakan metode Newton-Raphson (Mera, 2011).

Jika gelombang datang membentuk sudut θ_1 dengan garis tegak lurus kontur dasar laut, maka gelombang akan dibiaskan (dibelokkan) sehingga cenderung mengarah tegak lurus garis kontur (**Gambar 2**). Sudut gelombang meninggalkan garis kontur menjadi θ_2 terhadap garis tegak lurus kontur. Kecepatan (*celerity*) gelombang datang sebelum gelombang melewati garis kontur C_1

menjadi lebih lambat setelah melewatinya C_2 . Hubungan ini dapat digambarkan oleh hukum Snellius:

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2}$$

Gambar 2. Lintasan Gelombang Melewati Garis Kontur

Dengan mempertimbangkan refraksi dan pendakalan, tinggi gelombang lokal H dapat ditentukan (Dean and Dalrymple, 2000)

$$H = H_0 K_r K_s$$

dimana H_0 adalah tinggi gelombang laut dalam, dan koefisien refraksi (*shoaling coefficient*) K_r , dan koefisien pendangkalan (*refraction coefficient*) K_s . T

$$K_s = \sqrt{\frac{C_0}{2n_2 C_2}}$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}}$$

2.4 Skenario Penjalaran Gelombang

Meskipun dari hasil perhitungan, arah gelombang utama yang dibangkitkan angin berasal dari barat, tetapi dalam penelitian ini sudut gelombang datang dibuat bervariasi, yaitu dari utara (0°), utara-barat laut (15° dan 30°), barat laut (45°) dan dari barat laut-barat (60°). Karena mulut Pelabuhan Pulau Baai menghadap ke utara, maka sudut datang dari barat tidak bisa ditampilkan karena sejajar kontur dan akan menghasilkan perhitungan yang tidak akurat.

2.4.1 Skenario 1: Sudut Gelombang Datang dari Utara (0°)

Hasil prediksi lintasan gelombang dengan sudut datang 0° atau dari arah utara ditunjukkan oleh **Gambar 3**. Semua lintasan yang melewati kedalaman 12 m sampai dengan 10 m nyaris tidak

mengalami pembelokan (refraksi) karena sudut datang gelombang yang hampir tegak lurus dengan kontur dan kedalaman tersebut adalah kedalaman transisi ($1/20 < h/L < 1/2$) sehingga efek refraksi kecil. Lintasan gelombang yang melewati kedalaman 9 m dan yang lebih dangkal, efek refraksi semakin jelas terlihat. Misalnya lintasan gelombang A, B, C, D, E, F dan T yang merapat satu sama lain. Hal ini berarti terjadi pengumpulan energi gelombang yang disebut dengan konvergensi energi gelombang dimana energi gelombang pada daerah itu membesar, akibatnya tinggi gelombang juga semakin tinggi karena tinggi gelombang berbanding lurus dengan energinya.

Sebaliknya lintasan gelombang H, I, J dan K tampak merenggang satu sama lain. Hal ini berarti terjadi penyebaran energi yang disebut dengan divergensi energi gelombang dimana energi gelombang pada daerah itu mengecil, akibatnya tinggi gelombang juga semakin kecil.

Gambar 3. Lintasan-lintasan Gelombang dengan Sudut Gelombang Datang 0° (Utara)

2.4.2 Skenario 2: Sudut Gelombang Datang dari Utara -Barat Laut (15°)

Lintasan gelombang yang berasal dari gelombang dengan sudut datang 15° atau dari utara-barat laut dapat dilihat pada **Gambar 4**, dimana tampak semua lintasan gelombang yang melewati kedalaman 12 m mulai berbelok (refraksi). Hal ini disebabkan oleh sudut datang yang tidak tegak lurus dengan kontur. Hal ini sangat berbeda dengan kondisi sebelumnya (dimana sudut gelombang datang nyaris tegak lurus dengan kontur sehingga praktis tidak tampak terjadi pembelokan lintasan). Sedangkan pada kedalaman 11 dan 10 m semua lintasan gelombang A sampai G juga menampilkan lintasan gelombang yang mulai berbelok yang juga disebabkan oleh sudut gelombang datang yang tidak tegak lurus dengan kontur. Sedangkan lintasan H sampai R tidak menampilkan pembelokan gelombang yang disebabkan oleh sudut gelombang datang yang tegak lurus dengan kontur.

Lintasan gelombang A, B, T dan U menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang 0° (konvergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang semakin tinggi. Pada lintasan gelombang E, F, G, H, I dan K juga

menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang 0° (divergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang mengecil.

Gambar 4. Lintasan-lintasan Gelombang dengan Sudut Gelombang Datang 15° (Utara-Barat Laut)

2.4.3 Skenario 3: Sudut Gelombang Datang dari Utara-Barat Laut (30°)

Pada **Gambar 5**, semua lintasan gelombang kecuali lintasan M yang melewati kedalaman 12 m menunjukkan hal yang sama dengan lintasan gelombang dengan sudut datang 15° yang menampilkan lintasan-lintasan tersebut berbelok (refraksi). Sedangkan lintasan gelombang M tidak tampak terjadi pembelokan karena lintasan gelombang itu tegak lurus dengan kontur. Pada kedalaman 11 dan 10 m semua lintasan gelombang kecuali lintasan gelombang P, Q, R dan S juga menampilkan lintasan gelombang yang mulai berbelok yang juga disebabkan oleh sudut gelombang datang yang tidak tegak lurus dengan kontur. Sedangkan lintasan P, Q, R dan S tidak menampilkan pembelokan gelombang yang disebabkan oleh sudut gelombang datang yang hampir tegak lurus dengan kontur. Pada kedalaman yang lebih dangkal dari 10 meter semua lintasan gelombang mulai berbelok (refraksi tampak jelas) kecuali pada lintasan gelombang O sampai T yang tampak relatif lurus (refraksi tidak tampak jelas).

Lintasan gelombang A, B, C, T, U dan V menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang 0° (konvergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang semakin tinggi. Pada lintasan gelombang E, F, G, H, dan I juga menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang sebelumnya (divergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang mengecil.

Gambar 5. Lintasan-lintasan Gelombang dengan Sudut Datang Gelombang 30° (Utara-Barat Laut)

2.4.4 Skenario 4: Sudut Gelombang Datang dari Barat Laut (45°)

Pada **Gambar 6**, hampir semua lintasan gelombang yang menuju *breakwater* dan mulut masuk pelabuhan terlihat terjadi pembelokan kecuali lintasan gelombang T yang hanya terlihat sedikit berbelok. Lintasan-lintasan tersebut terlihat berbelok karena lintasan gelombang tersebut tidak tegak lurus dengan kontur dan sebaliknya lintasan gelombang T relatif regak lurus kontur. Pada semua lintasan gelombang yang menuju ke arah pantai, refraksi jelas terlihat pada kedalaman 1 sampai dengan 3 meter kecuali pada lintasan J yang lintasan gelombangnya juga relatif tegak lurus dengan kontur.

Lintasan gelombang I, J, dan K menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang sebelumnya (konvergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang semakin tinggi. Pada lintasan gelombang C dan D, E, dan F juga menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang sebelumnya (divergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang mengecil.

Gambar 6. Lintasan-lintasan Gelombang dengan Sudut Datang Gelombang 45° (Barat Laut)

2.4.5 Skenario 5: Sudut Gelombang Datang dari Barat Laut-Barat (60°)

Pada **Gambar 7**, hampir semua lintasan gelombang yang menuju *breakwater* dan mulut masuk pelabuhan juga terlihat terjadi pembelokan (serupa dengan lintasan gelombang dengan sudut datang 45°) kecuali lintasan gelombang U yang juga serupa dengan lintasan gelombang T pada lintasan gelombang dengan sudut datang 45° . Pada semua lintasan gelombang yang menuju ke arah pantai refraksi juga jelas terlihat pada kedalaman 1 sampai dengan 3 meter kecuali pada lintasan F yang juga serupa dengan lintasan gelombang J pada lintasan gelombang dengan sudut datang 45° .

Lintasan gelombang A, R, S, T dan U, menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang sebelumnya (konvergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang semakin tinggi. Pada lintasan gelombang C, D, E, F dan G juga menunjukkan hal yang sama pada lintasan-lintasan gelombang yang ada pada lintasan gelombang dengan sudut datang sebelumnya (divergensi energi gelombang) sehingga tinggi gelombang mengecil. Pada lintasan gelombang T tampak tidak terjadi refraksi karena sudut datang gelombang yang tegak lurus dengan kontur.

Dari perhitungan tinggi gelombang lokal tersebut diperoleh tinggi gelombang maksimum sebesar 3,16 meter yang berada pada lintasan gelombang T pada kedalaman 1 meter (depan *breakwater*) dengan arah sudut gelombang datang 15° dan tinggi gelombang minimum sebesar 1,24 m pada lintasan J pada kedalaman 9 m dengan arah sudut gelombang datang 15° . Dari perhitungan tinggi gelombang tersebut juga diperoleh nilai H pada kedalaman awal di laut transisi lebih kecil dari tinggi gelombang laut dalam $H_0 = 2$ m. Hal ini adalah hal yang pasti karena tinggi gelombang akan rendah dahulu sebelum naik apabila mendekati garis pantai ataupun daerah yang dangkal. Tinggi gelombang yang akan mendekati garis pantai akan semakin besar karena efek *shoaling* akan bertambah besar seiring dengan berkurangnya kedalaman.

Gambar 7. Lintasan-lintasan Gelombang dengan Sudut Datang Gelombang 60°(Barat Laut-Barat)

3 KESIMPULAN

Berdasarkan data angin (kecepatan dan arah) dan *fetch* diperoleh tinggi gelombang signifikan (H_s) 2,5 meter dengan periode (T_s) 7 detik. Panjang gelombang laut dalam (L_o) 76,5 meter dan kecepatan gelombang laut dalam (C_o) 10,92 meter/detik. Berdasarkan kecepatan angin (= 16 knots), maka dengan menggunakan skala Beaufrot, diperoleh tinggi gelombang laut dalam (H_o) 2 meter.

Hasil simulasi dengan lima sudut datang yang berbeda (0°, 15°, 30°, 45°, dan 60°) menunjukkan pada daerah dekat *breakwater* terjadi pengumpulan energi sehingga tinggi gelombang terbesar di daerah tersebut dengan ketinggian maksimum sebesar 3,16 meter. Pada mulut masuk pelabuhan terjadi penyebaran energi sehingga tinggi gelombang menjadi lebih kecil sampai pada ketinggian minimum sebesar 1,24 meter.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Akhir, B., (2012), "Lintasan Gelombang Laut Menuju Pelabuhan Pulau Baai Provinsi Bengkulu", Tugas Akhir S1 di Jurusan Teknik Sipil, Universitas Andalas.
- CERC, (1984), "Shore Protection Manual", US Army Corps of Engineers, Washington DC.
- Dean, R.G., dan Dalrymple, R.A., (2000), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist, Advance Series on Ocean Engineering Volume 2", New Jersey, World Scientific.
- Lolong, M., (1998), "Perumusan Karakteristik Gelombang Perairan Lemahabang Jawa Tengah", Tesis Master di Jurusan Teknik Sipil ITB.
- Mera, M., (2011), "Proses Pantai", Catatan Kuliah Program Magister Teknik Sipil, Universitas Andalas.

- Riyadi, S., (2007), "*Studi Gelombang di Perairan Selatan Bali Menggunakan Model SWAN*", Tugas Akhir S1 di Jurusan Teknik Kelautan, ITS.
- Rojali, A., (2009), "*Pemodelan penjalaran dan transformasi Gelombang Laut di Perairan dengan Kemiringan Dasar Konstan*", Tugas Akhir S1 di Jurusan Oseanografi, ITB.
- Taqwin, S., (2009), "*Pemodelan penjalaran dan transformasi Gelombang Laut di Perairan dengan Kemiringan Dasar Konstan*", Tugas Akhir S1 di Jurusan Oseanografi, ITB.
- Taringan, A.P.M., dan Zein, A.S., (2005), "*Analisa Refraksi Gelombang Pada Pantai*", Jurnal Teknik SIMETRIKA, Vol. 4 No. 2, PP. 345-351.
- Triatmodjo, B., (1999), *Teknik Pantai*, Yogyakarta, Beta Offset.