

TRANSFORMASI GELOMBANG DI SEPANJANG PANTAI DELTA SUNGAI JENEBERANG, MAKASSAR

Wave Transformation in The Coast of Delta at Jeneberang River, Makassar

Sakka¹, Mulia Purba², I Wayan Nurjaya², Hidayat Pawitan³ dan Vincentius P. Siregar²

1. Mahasiswa Pasca Sarjana, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor. E-mail: sakka_psl@yahoo.com
2. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor.
3. Departemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor.

Diterima: 11 Desember 2009; Disetujui: 10 April 2010

ABSTRACT

A study on wave transformation has been conducted in the coast of delta of Jeneberang River, Makassar. The wave heights and periods at deep water offshore of the coast are predicted using wind data recorded at Potere Stasiun, Makassar in 1990 – 2008. Wave transformation as these deep water waves propagated toward the coast are analyzed by considering the effect of shoaling and refraction to determine changes of wave patterns (wave directions and heights) and the breaking of the waves near the coast. Results show that offshore wave heights and periods vary between 0.26 to 2.78 m and 3.06 to 7.26 seconds, respectively. Higher waves height occurred generally in December to February (northwest Monsoon) than in the June to August (southeast Monsoon). This study indicated that when the waves propagate from deep water to the shore, wave height decreased as the water depth shallower but as the depth continue decreases nearby the coast the wave height gradually increased until it reaches maximum height then the waves break. After wave breaking, wave height is reduced drastically to zero at the shoreline. The results showed that waves tended to be converge at convex-shaped coastline (around the river mouth), whereas at concave-shaped coastlines waves tended to be divergent.

Keywords: deep water wave, refraction, shoaling, wave transformation.

PENDAHULUAN

Pengetahuan tentang karakteristik gelombang yang dibangkitkan oleh angin merupakan suatu kebutuhan yang sangat penting dalam perencanaan bangunan pantai, dimana data gelombang dalam waktu yang panjang sangat diperlukan (Shahidi *et al.* 2009). Namun demikian pada beberapa tempat data gelombang hasil pengukuran di lapangan dalam waktu panjang biasanya tidak tersedia sehingga perlu untuk melakukan prediksi gelombang dengan menggunakan data angin.

Sampai saat ini telah dikembangkan beberapa metode prediksi gelombang di laut lepas, seperti metode SMB, Wilson, JONSWAP, Donelan dan CEM (Shahidi *et al.*, 2009). Metode tersebut telah digunakan dan diuji ketelitiannya di berbagai tempat seperti metode SMB telah digunakan di U.S. Army dan British standard, metode Wilson telah digunakan di pelabuhan Jepang, Metode Donelan, SMB dan JONSWAP di gunakan dan dievaluasi di Ontario, metode CEM juga telah digunakan dan dievaluasi di Ontario untuk kondisi fetch terbatas (Kazeminezhad *et al.*, 2005). Beberapa model dan empiris telah dikembangkan untuk

¹⁾ Korespondensi:

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Hasanuddin
Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10 Tamalanrea Makassar 90245
E-mail: sakka_psl@yahoo.com

memprediksi karakter gelombang. Model yang menyelesaikan persamaan kekekalan energi telah dilakukan oleh Booij *et al.* (1999), Kazeminezhad *et al.* (2007) dan Moeini dan Shahidi (2009). Model tersebut memerlukan data batimetri, meteorologi dan oseanografi dalam waktu yang panjang.

Gelombang yang menjalar dari lepas pantai ke pantai mengalami perubahan karakter. Hal ini disebabkan karena gelombang yang menjalar di atas batimetri yang tidak seragam akan mengalami sejumlah perubahan bentuk (Balas & Inan, 2002). Terjadinya perubahan bentuk gelombang pada saat merambat dari laut lepas ke pantai dapat disebabkan karena pengaruh dari beberapa proses seperti *shoaling*, refraksi, difraksi, refleksi, interaksi nonlinier, gesekan dasar, perkolasi, input energi angin, irregularitas gelombang, penyebaran arah gelombang, gelombang pecah dan interaksi gelombang arus (Maa & Wang, 1995 dan US Army Corps of Engineers, 2003). Analisis transformasi gelombang sangat sulit dilakukan jika semua faktor tersebut dimasukkan dalam perhitungan dengan hanya menggunakan program komputer sederhana. Namun demikian, pada saat gelombang merambat dari laut lepas ke garis pantai faktor-faktor tersebut tidak mempunyai pengaruh yang sama pentingnya pada semua kasus. Umumnya, faktor yang sangat penting dalam transformasi gelombang adalah proses refraksi dan *shoaling*, tetapi jika terdapat struktur maka faktor-faktor yang berpengaruh adalah refraksi, *shoaling* dan difraksi (Maa & Wang, 1995),

Model yang mensimulasikan transformasi gelombang dengan hanya memperhitungkan pengaruh *shoaling* telah dilakukan oleh Thornton & Guza (1983) yang didasarkan pada persamaan kekekalan flux energi untuk menjelaskan transformasi distribusi tinggi gelombang di pantai Torrey Pines. Model ini memberikan hasil simulasi transformasi gelombang yang baik dengan memasukkan pengaruh disipasi akibat gesekan dasar pantai.

Model yang memperhitungkan tiga proses utama (refraksi gelombang, *shoaling* dan difraksi gelombang) pada transformasi gelombang telah dilakukan oleh Maa & Wang (1995) yang menggunakan model RCPWAVE yang dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers. Model ini telah digunakan di teluk Chesapeake, pantai Virginia. Hasil simulasi model menunjukkan bahwa gesekan dasar merupakan faktor yang sangat penting dalam transformasi gelombang. Jika efek gesekan dasar dikeluarkan, maka hasil perhitungan tinggi gelombang di dekat pantai akan menjadi sangat lebih besar dari pada hasil pengukuran.

Balas & Inan (2002) membuat model transformasi gelombang yang memperhitungkan pengaruh *soaling*, difraksi, refraksi dan gelombang pecah dengan menggunakan persamaan *Mild Slopes*. Untuk menjelaskan transformasi gelombang, persamaan *mild slope* diselesaikan dalam tiga parameter yaitu tinggi gelombang, sudut gelombang dan fase gelombang. Hasil simulasi model menunjukkan adanya kesesuaian dengan hasil eksperimen.

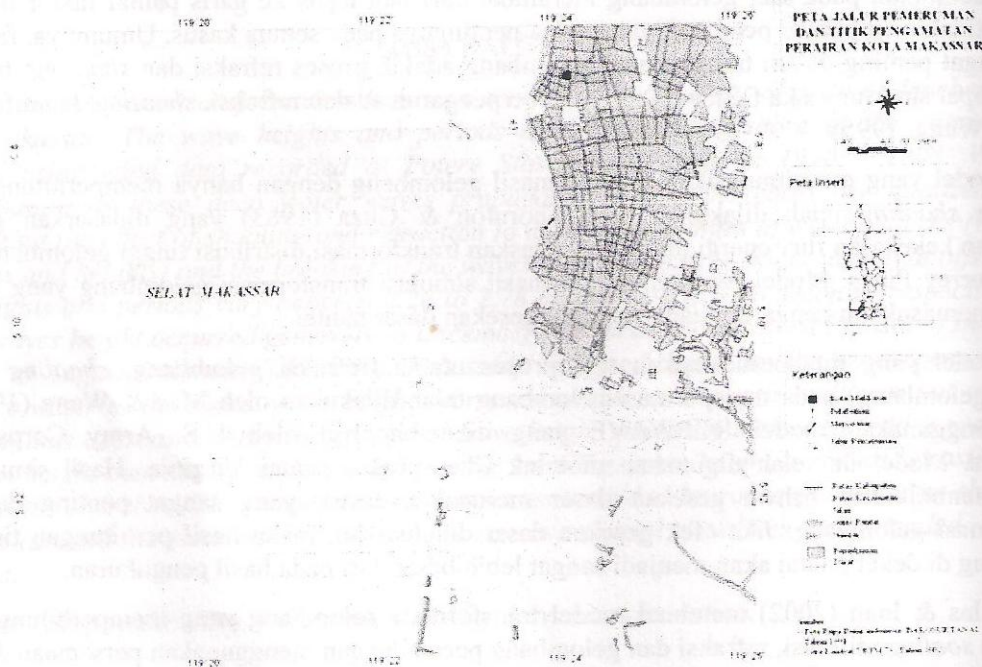
Abdallah *et al.* (2006) memprediksi parameter gelombang (tinggi, perioda dan arah gelombang) laut lepas dan transformasi gelombang di Tanjung Rosetta, Teluk Abu-Qir dengan menggunakan program ACES. Tinggi gelombang rata-rata tahunan sekitar 0,94 m dan perioda sekitar 6,5 detik dengan arah gelombang dominan datang dari arah barat daya sepanjang tahun. Hasil simulasi transformasi gelombang menunjukkan bahwa karakteristik gelombang pada kedua sisi Tanjung Rosetta hampir sama.

Perairan delta muara Sungai Jeneberang yang terletak di dalam wilayah Kota Makassar, Propinsi Sulawesi Selatan merupakan perairan yang sangat strategis, karena fungsi ekonomis dan ekologisnya memberikan manfaat bagi Kota Makassar. Sejumlah penelitian dalam aspek oseanografi dan geologi telah dilakukan pada kawasan perairan Kota Makassar. Lokasi penelitian dipusatkan di sekitar muara Sungai Jeneberang, karena wilayah ini merupakan wilayah yang sangat dinamik dan mempunyai arti strategis. Departemen PU (1989) memfokuskan penelitian tentang hidrologi, perubahan garis pantai dan batimetri di Sekitar muara Sungai Jeneberang. Suriamiharja (2005) telah melakukan telaah pasang surut, gelombang, arus dan angkutan sedimen dalam kaitannya dengan sedimentasi dan abrasi pantai Tanjung Bunga.

Penelitian ini menganalisis transformasi gelombang yang merambat dari laut lepas menuju ke pantai dengan mempertimbangkan pengaruh *shoaling* dan refraksi. Selain itu juga dilakukan perhitungan tinggi dan periode gelombang laut dengan menggunakan metode CEM (US Army Corps of Engineers, 2003).

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri dari : data kedalaman dasar laut (batimetri) dan data angin. Pengukuran kedalaman dasar laut dilakukan dengan menggunakan echosounder, sedangkan posisi pengukuran menggunakan GPS. Pengukuran kedalaman dilakukan di sepanjang pantai delta Sungai Jeneberang dengan membentuk lintasan, seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Data angin diperoleh dari Badan Meteorologi Maritim Makassar yang diukur di stasiun Potere, Makassar. Data angin yang diperoleh berupa data kecepatan dan arah angin harian selama tahun 1990 sampai 2008.



Gambar 1 Peta lintasan pengukuran kedalaman dasar laut.

Data angin yang diperoleh kemudian dianalisis secara statistik dengan menggunakan *Software WRPlot* untuk mendapatkan persentase kejadian kecepatan dan arah angin. Dalam melakukan analisis data angin, maka data angin dikelompokkan dalam beberapa kelas dengan interval 0,5 - 2,1 m/det, 2,1 - 3,6 m/det, 3,6 - 5,7 m/det, 5,7 - 8,8 m/det, 8,8 - 11,1 m/det dan > 11,1 m/det dalam 8 arah angin. Data angin yang telah dikelompokkan digunakan untuk menggambarkan *wind rose* tahunan dan musiman di pantai Makassar.

Data angin digunakan untuk memprediksi tinggi dan periode gelombang di laut lepas yang menuju pantai Delta Sungai Jeneberang. Karena data angin tersebut diukur di darat pada ketinggian 12 m dari permukaan laut, maka perlu dilakukan koreksi terhadap ketinggian 10 m. Koreksi pengukuran kecepatan angin di darat ke laut, koreksi durasi dan koreksi stabilitas. Prediksi tinggi (H_0) dan periode gelombang (T_p) di laut lepas dilakukan dengan menggunakan persamaan CEM (USACE, 2003):

$$\frac{g H_0}{U_c^2} = 4,13 \times 10^{-2} \left(\frac{E F}{U_c^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{g T_p}{U_c} = 0,651 \left(\frac{E F}{U_c^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots(2)$$

$$U_s^2 = C_D U_{10}^2 \dots\dots\dots(3)$$

$$C_D = 0,001 (1,1 + 0,035 U_{10}) \dots\dots\dots(4)$$

dimana :

H_o = Tinggi gelombang di laut lepas (m)

T_p = Periode gelombang (detik)

g = Percepatan gravitasi (m/det²)

F = Fetch (m)

U_{10} = Kecepatan angin yang diukur pada ketinggian 10 m (m/det)

Setelah gelombang di laut lepas terbentuk oleh angin, maka gelombang akan merambat menuju pantai. Pada penelitian ini transformasi gelombang menuju pantai hanya mempertimbangkan pengaruh *shoaling* dan refraksi. Daerah studi dibagi dalam titik grid yang berbentuk persegi empat (Gambar 2). Tinggi gelombang pada kedalaman h dihitung dengan menggunakan persamaan (USACE, 2003):

$$H_h = H_o K_s K_r \dots\dots\dots(5)$$

dimana:

K_s = koefisien *shoaling*

$$K_s = \left(\frac{C_{g0}}{C_{gh}} \right)^{1/2} = \left(\frac{0,5 C_o}{n C} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

$$C_o = \frac{gT}{2\pi} \dots\dots\dots(7)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h / L}{\sin \pi (4\pi h / L)} \right) \dots\dots\dots(8)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots(9)$$

K_r = koefisien *refraksi*

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

Sudut gelombang dihitung dengan menggunakan persamaan (USACE, 2003): yaitu:

$$\frac{\sin \alpha}{C} = \frac{\sin \alpha_o}{C_o} \dots\dots\dots(11)$$

dimana:

$$L = L_o \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \dots\dots\dots(12)$$

Apabila gelombang datang membentuk sudut α_o terhadap sumbu x, maka sudut datang gelombang pecah terhadap garis pantai α_b adalah :

$$\alpha_b = \alpha_i \pm \alpha_o \dots\dots\dots(13)$$

Dimana :

α_i = sudut garis pantai terhadap sumbu x

$$tg \alpha_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x}$$

Dengan manipulasi matematika, maka sudut gelombang pecah terhadap garis pantai dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Komar, 1983):

$$\tan \alpha_b = \tan(\alpha_i - \alpha_o) = \frac{\tan \alpha_i - \tan \alpha_o}{1 + \tan \alpha_i \tan \alpha_o} \dots\dots\dots(14)$$

Saat gelombang merambat dari laut bebas menuju pantai maka kelancipan gelombang semakin

meningkat karena pengaruh perubahan kedalaman laut. Bila kelancipan gelombang telah mencapai nilai maksimum maka gelombang akan pecah. Gelombang pecah pada kedalaman air yang mendekati nilai tinggi gelombang (USACE, 2003). Tinggi gelombang pecah (H_b) dihitung dengan menggunakan asumsi (Bird, 1992):

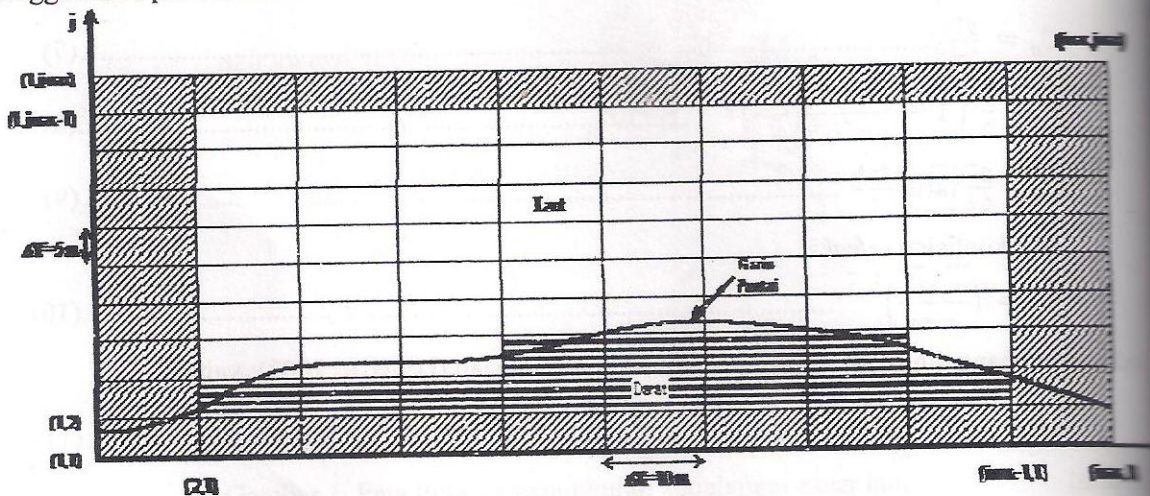
$$\frac{H_b}{h_b} = \gamma_b = 0,78 \dots\dots\dots(15)$$

dimana :

h_b = kedalaman dimana gelombang pecah (m)

γ_b = indeks gelombang pecah

Perhitungan tinggi dan sudut gelombang dilakukan pada setiap titik grid dengan menggunakan grid yang berbentuk persegi empat seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Jumlah grid dalam arah sejajar pantai (arah x) adalah 978 titik dengan jarak antara titik grid 10 meter, sedangkan dalam arah tegak lurus pantai (arah y) adalah 2028 titik dengan jarak antara titik grid 5 meter. Perhitungan tinggi dan periode gelombang di laut lepas dilakukan dengan menggunakan persamaan 1 dan 2. Perhitungan tinggi dan sudut gelombang pada setiap titik grid dilakukan dengan menggunakan persamaan 5 dan 11. Pada perhitungan ini tinggi dan sudut gelombang pada semua titik grid $j = 2028$ sama dengan tinggi dan sudut gelombang di laut lepas. Perhitungan tinggi gelombang pecah dan sudut gelombang pecah sepanjang pantai menggunakan persamaan 14 dan 15.



Gambar 2 Bentuk grid yang digunakan dalam perhitungan transformasi gelombang.

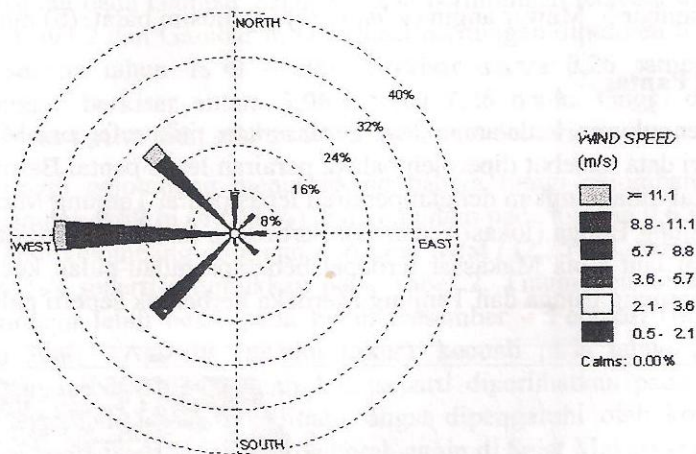
HASIL DAN PEMBAHASAAN

Kecepatan Dan Arah Angin

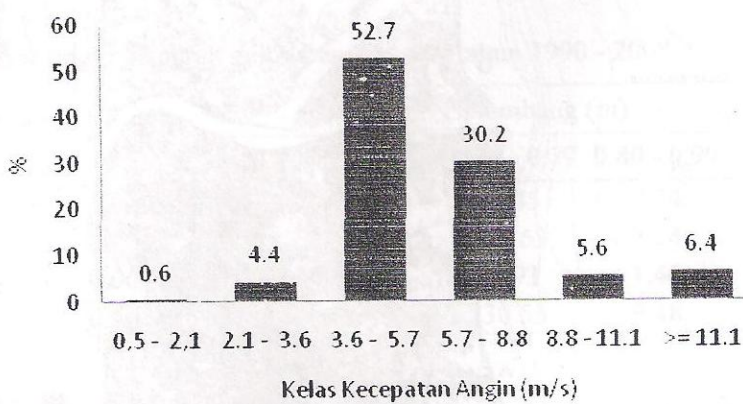
Hasil analisis statistik (frekuensi dan presentase) data kecepatan dan arah angin selama 19 tahun diperlihatkan pada Tabel 1, dan dibuat dalam bentuk diagram mawar angin (Gambar 3). Berdasarkan data angin tersebut, maka diperoleh bahwa selama 19 tahun arah angin di lokasi penelitian dominan dari arah barat (32,248 %), barat laut (21,455 %) dan barat daya (20,461 %). Kecepatan angin sebagian besar berkisar antara 3,6 sampai 5,7 m/s (52,738 %), dan antara 5,7 sampai 8,8 m/detik (30,216 %) seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

Tabel 1 Distribusi persentase kecepatan angin tahun 1990 – 2008

Arah Angin	Kecepatan Angin (m/det)						Total
	0,5 - 2,1	2,1 - 3,6	3,6 - 5,7	5,7 - 8,8	8,8 - 11,1	>= 11,1	
337,5 - 225 (Utara)	0,058	0,331	3,718	2,450	0,504	0,447	7,507
22,5 - 67,5 (Timur Laut)	0,043	0,187	2,118	2,104	0,331	0,159	4,942
67,5 - 112,5 (Timur)	0,072	0,562	3,040	1,297	0,389	0,346	5,706
112,5 - 157,5 (Tenggara)	0,087	0,317	3,199	1,527	0,115	0,058	5,303
157,5 - 202,5 (Selatan)	0,000	0,130	1,427	0,677	0,115	0,029	2,378
202,5 - 247,5 (Barat Daya)	0,087	0,490	10,418	8,069	0,980	0,418	20,461
247,5 - 292,5 (Barat)	0,144	1,326	19,380	7,867	1,311	2,219	32,248
292,5 - 337,5 (Barat Laut)	0,115	1,052	9,438	6,225	1,859	2,767	21,455
Sub Total	0,605	4,395	52,738	30,216	5,605	6,441	100

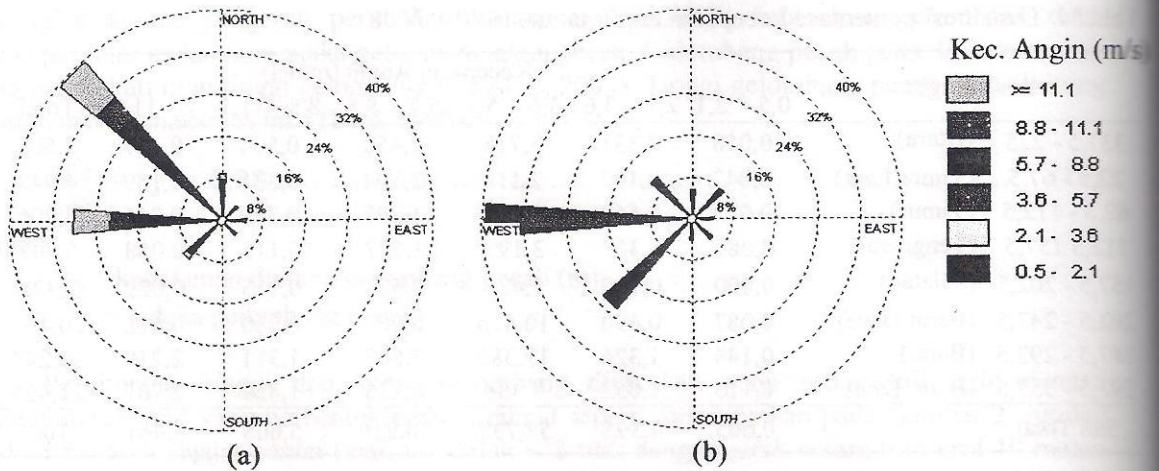


Gambar 3 Mawar angin (*wind rose*) pada tahun 1990 – 2008.



Gambar 4 Diagram batang distribusi kecepatan angin tahun 1990 – 2008.

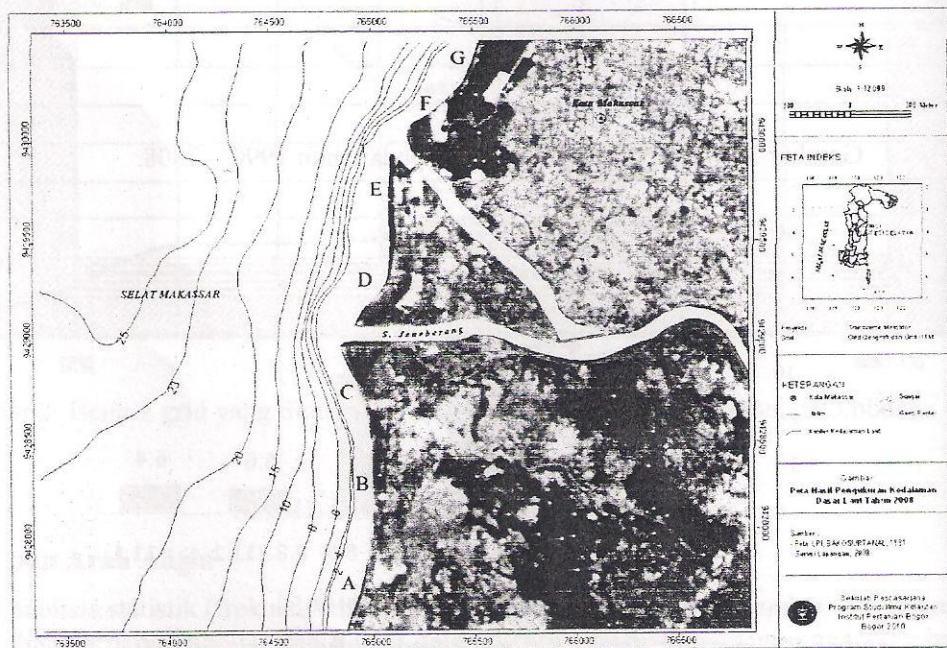
Pada bulan Desember sampai Februari (musim barat) arah angin dominan berasal dari arah barat laut (39,48 %) dan dari arah barat (28,05 %), sedangkan kecepatan angin dominan berkisar antara 3,6 sampai 5,7 m/s (32,65 %) dan antara 5,7 sampai 8,8 m/detik (31,49 %). Pada bulan Juni sampai Agustus (musim timur) arah angin dominan berasal dari arah barat (39,30 %) dan dari arah barat daya (22,42 %), sedangkan kecepatan angin dominan berkisar antara 3,6 sampai 5,7 m/s (68,76 %) dan antara 5,7 sampai 8,8 m/detik (23,68 %). seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Mawar angin (*wind rose*) (a) musim barat, (b) musim timur.

Bentuk Profil Pantai

Hasil pengukuran kedalaman laut berdasarkan titik referensi MSL diperlihatkan pada Gambar 6. Dari data tersebut diperoleh bahwa perairan lepas pantai Barombong (lokasi A,B dan C) lebih dangkal dibandingkan dengan perairan lepas pantai Tanjung Merdeka (lokasi D, dan E) dan pantai Tanjung Bunga (lokasi F dan G). Perbedaan kedalaman ini dapat disebabkan karena di sebelah barat laut Kota Makassar terdapat beberapa pulau-pulau kecil sehingga kedalaman laut di pantai Tanjung Bunga dan Tanjung Merdeka berbentuk seperti palung.



Gambar 6 Data kedalaman dasar laut di lokasi penelitian.

Berdasarkan data kedalaman dasar laut, kemudian dibuat 7 (tujuh) profil lereng dasar pantai pada jarak 0 sampai 1 km ke lepas pantai. Dari profil tersebut diperoleh bahwa dari selatan ke utara (dari pantai Barombong sampai Tanjung bunga) kelerengan dasar pantai bervariasi. Kelerengan dasar pantai di perairan Barombong berkisar antara 0,009 sampai 0,013, di perairan Tanjung Merdeka berkisar antara 0,008 sampai 0,012 dan di perairan Tanjung bunga berkisar antara 0,010 sampai 0,013.

Gelombang Laut lepas

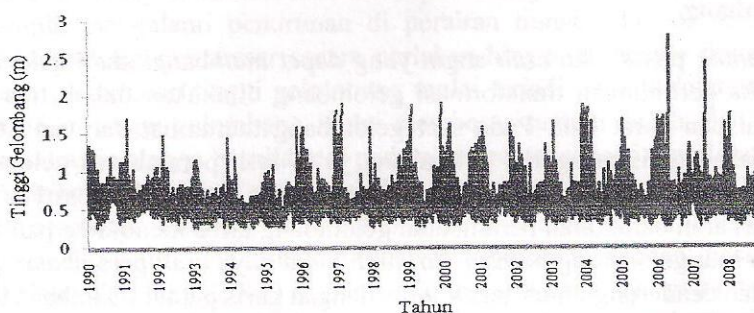
Berdasarkan letak geografis daerah penelitian, maka pantai di daerah tersebut dapat diterjang oleh hempasan gelombang yang dibangkitkan oleh angin yang berhembus dari Selat Makassar, terutama pada saat angin dari arah barat daya, barat dan barat laut. Di sekitar daerah penelitian terdapat beberapa pulau yang umumnya terletak di sebelah barat laut lokasi penelitian. Keberadaan pulau tersebut dapat berfungsi sebagai penghalang gelombang sehingga gelombang yang dibangkitkan oleh angin dan bergerak menuju ke lokasi penelitian dapat tertahan oleh pulau-pulau tersebut. Karena letak pulau-pulau tersebut berada di sebelah barat laut daerah penelitian, maka gelombang yang dibangkitkan oleh angin yang bersal dari arah barat laut umumnya lebih kecil dari pada gelombang yang berasal dari barat dan barat daya. Karena pantai lokasi penelitian merupakan pantai barat, maka dalam perhitungan tinggi gelombang digunakan panjang *fetch* dari arah barat laut, barat, barat daya.

Hasil perhitungan tinggi dan periode gelombang pada kedalaman 20 m selama tahun 1990 sampai 2008 diperlihatkan pada Gambar 7 dan 8. Hasil perhitungan tersebut diringkaskan seperti diperlihatkan pada Tabel 2 dan Gambar 8. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa tinggi gelombang yang terjadi selama tahun 1990 – 2008 berkisar antara 0,26 sampai 2,78 m, sedangkan perioda gelombang berkisar antara 3,06 sampai 7,26 detik. Tinggi dan perioda gelombang yang terjadi di lokasi penelitian selama 19 tahun sangat bervariasi.

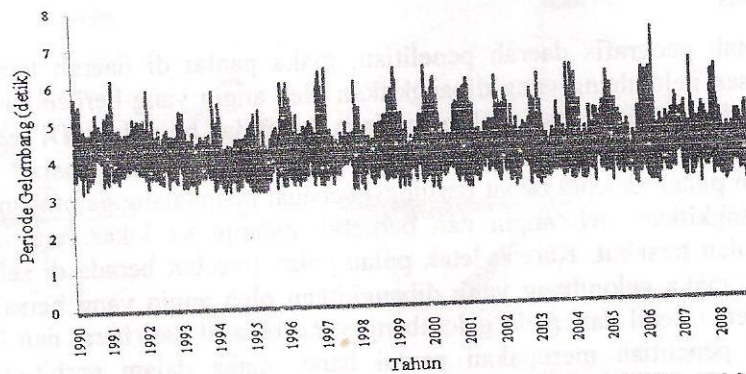
Hasil perhitungan tinggi gelombang menunjukkan bahwa tinggi gelombang dominan berada pada kisaran 0,40 sampai 0,59 m (47,98 %) dan kemudian pada kisaran 0,6 sampai 0,79 m (30,53 %). Sedangkan arah gelombang dominan dari arah barat (32,25 %), barat laut (21,46 %) dan barat daya (20,46 %), seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Tinggi gelombang rata-rata bulanan yang terjadi umumnya lebih besar pada bulan Desember – Februari (musim barat) dibandingkan pada bulan Juni – Agustus (musim timur), kecuali pada tahun 2007 tinggi gelombang rata-rata bulanan terbesar pada bulan Juni seperti diperlihatkan pada Gambar 9. Tinggi gelombang yang terjadi di lokasi penelitian sangat dipengaruhi oleh kondisi angin musiman di Selat Makassar, sedangkan kecepatan dan arah angin di Selat Makassar dipengaruhi oleh sistem angin muson yang selalu berubah tergantung pada musim. Perubahan sistem angin muson di sebabkan oleh posisi matahari yang melintasi equator dua kali setiap tahun (Wrytki, 1961).

Tabel 2 Presentase tinggi dan arah gelombang selama tahun 1990 - 2008

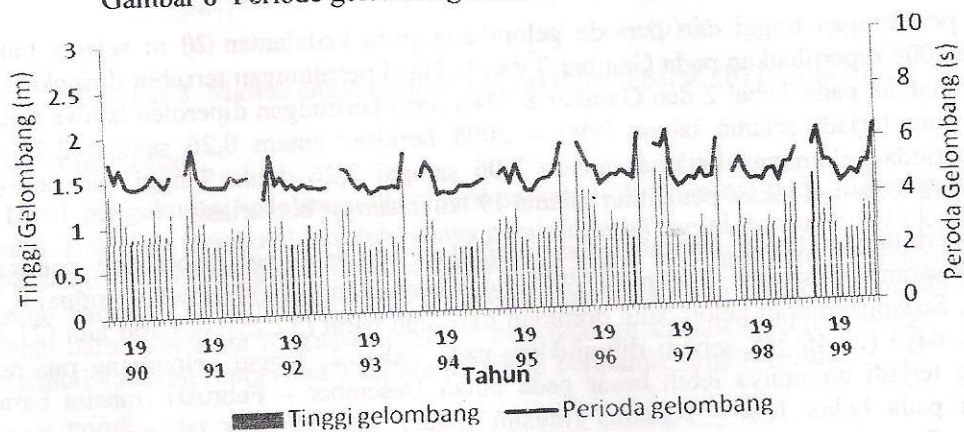
Arah Gelombang (dari)	Tinggi Gelombang (m)						Total
	0 - 0,19	0,20 - 0,39	0,40 - 0,59	0,60 - 0,79	0,80 - 0,99	$\geq 1,00$	
Barat Laut	0.01	1.95	10.30	4.45	2.74	2.00	21.46
Barat	0.07	1.02	13.92	11.63	3.24	2.36	32.25
Barat Daya	0.00	0.68	9.93	7.93	1.46	0.48	20.46
Total	0.14	5.81	47.98	30.53	9.48	6.05	100



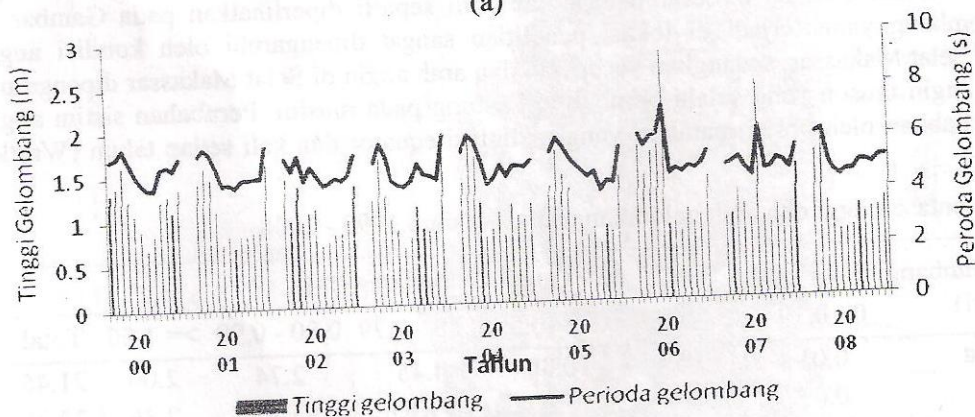
Gambar 7 Tinggi gelombang harian selama tahun 1990 –2008.



Gambar 8 Periode gelombang harian selama tahun 1990 –2008.



(a)



(b)

Gambar 9. Tinggi dan periode gelombang maksimum bulanan (a) tahun 1990 – 1999, (b) tahun 2000 – 2008.

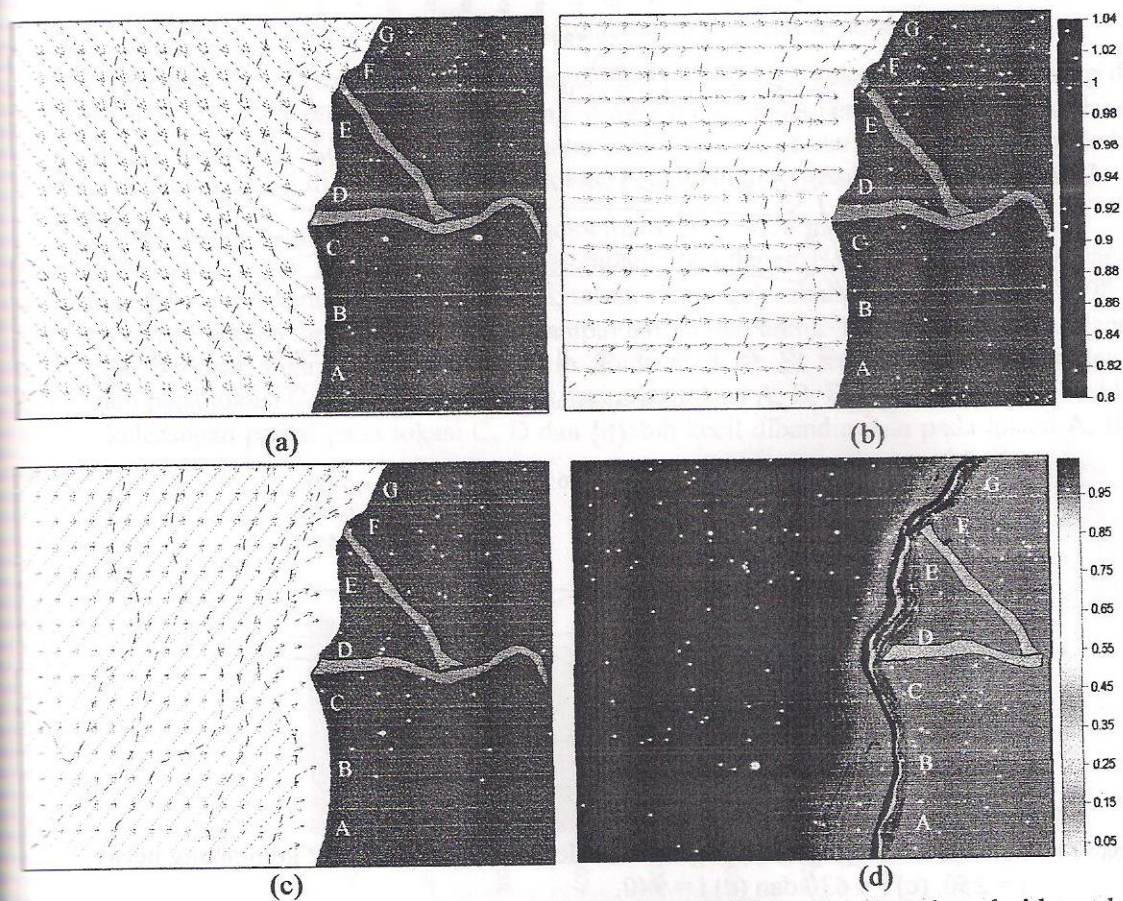
Transformasi Gelombang

Berdasarkan bentuk pantai dan arah angin yang dapat membangkitkan gelombang pada lokasi penelitian, maka perhitungan transformasi gelombang dilakukan dalam tiga arah yaitu arah barat daya, barat dan barat laut. Pada saat gelombang merambat dari arah barat daya, terlihat adanya perubahan garis ortogonal gelombang yaitu arah perambatan gelombang yang membelok ke kiri dan cenderung untuk tegak lurus dengan garis pantai (Gambar 10a), pada saat gelombang berasal dari arah barat, arah perambatan gelombang lurus menuju ke pantai (Gambar 10b), sedangkan pada saat gelombang berasal dari arah barat daya arah perambatan gelombang membelok ke kanan dan cenderung untuk tegak lurus dengan garis pantai (Gambar 10c).

Perubahan arah gelombang terutama terjadi pada saat gelombang sudah dekat dengan pantai. Perubahan ini disebabkan oleh pengaruh refraksi karena adanya perbedaan kecepatan

rambat gelombang. Perbedaan kecepatan gelombang terjadi di sepanjang garis muka gelombang yang bergerak membentuk sudut terhadap garis pantai. Gelombang yang berada pada laut yang lebih dalam bergerak lebih cepat dari pada gelombang yang berada pada laut yang lebih dangkal (USACE, 2003).

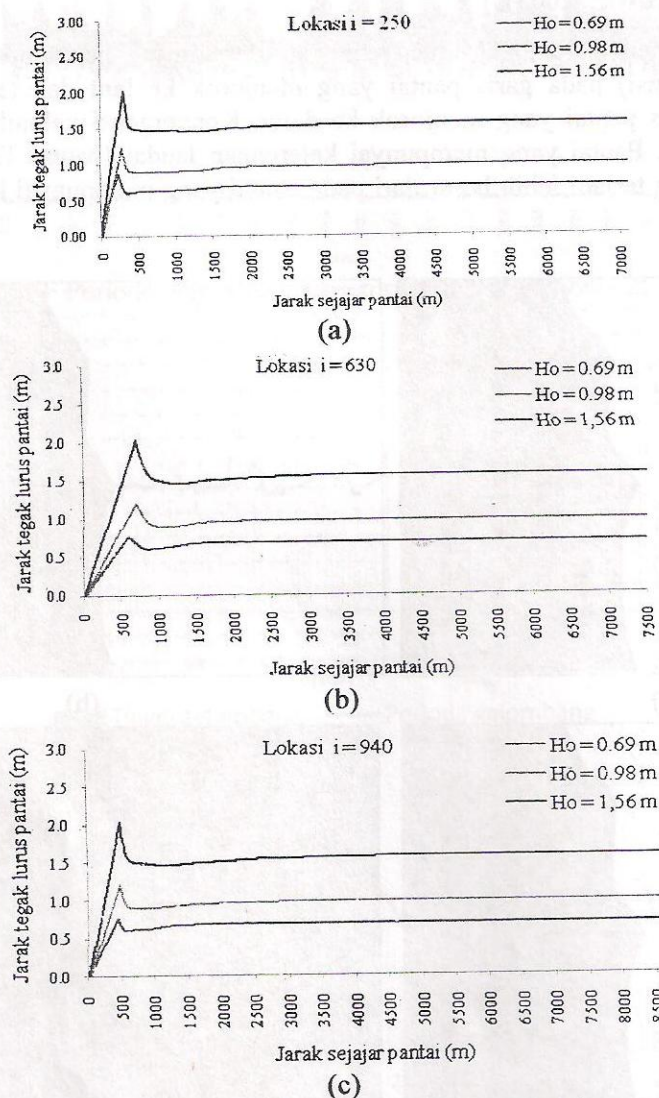
Perubahan arah gelombang menyebabkan terjadinya pengumpulan garis arah gelombang (konvergensi) pada garis pantai yang menjorok ke laut dan terjadi penyebaran (divergensi) pada garis pantai yang menjorok ke darat. Konvergensi gelombang terjadi pada lokasi C, D, E dan F. Pantai yang mempunyai kelerengn landai (pantai Tanjung Merdeka) tinggi gelombang yang terjadi lebih besar dari pada pantai yang mempunyai kelerengn curam (Gambar 10d).



Gambar 10. Proses refraksi gelombang yang menuju pantai (a) arah gelombang dari barat laut, (b) dari barat dan (c) dari barat daya (d) Kontur tinggi gelombang.

Pada saat gelombang merambat dari laut lepas menuju ke pantai, maka tinggi gelombang tersebut mula-mula mengalami penurunan di perairan transisi dan di perairan yang sangat dangkal tinggi gelombang membesar secara perlahan hingga mencapai tinggi maksimum saat gelombang pecah. Penurunan tinggi gelombang mulai terjadi pada kedalaman 10 m kemudian pada kedalaman 5 m tinggi gelombang mulai membesar sampai pecah, dan tinggi gelombang berkurang secara drastis hingga bernilai nol pada garis pantai seperti diperlihatkan pada Gambar 11. Perubahan tinggi gelombang yang terjadi selama menjalar dari laut lepas ke pantai disebabkan oleh pengaruh *shoaling* dan refraksi karena adanya perubahan kedalaman laut (USACE, 2003). Hasil ini menunjukkan adanya kemiripan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Balas dan Inan (2002) di pantai Turki yaitu pada saat gelombang tiba di pantai, tinggi gelombang mengalami peningkatan sampai gelombang pecah. Perbedaan model ini dengan model yang dibuat oleh Balas dan Inan (2002) adalah model ini menggunakan

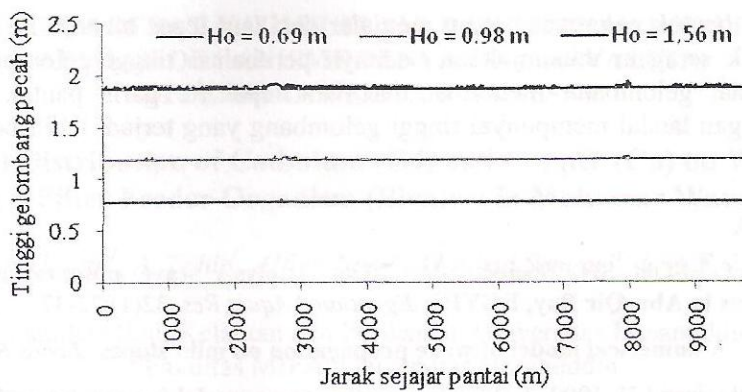
persamaan CEM yang dibangun oleh US Army Corps of Engineers sedangkan dalam model Balas dan Inan (2002) menggunakan persamaan *Mild Slopes*.



Gambar 11. Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas sampai pada saat gelombang pecah, (a) $i = 250$, (c) $i = 630$ dan (c) $i = 940$.

Hasil perhitungan tinggi gelombang pecah yang diperlihatkan pada Gambar 12 dilakukan dengan menggunakan tinggi gelombang laut lepas : $H_o = 0,69$, $H_o = 0,98$ dan $H_o = 1,56$ m. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa untuk input $H_o = 0,69$ m, maka tinggi gelombang pecah berkisar antara 0,77 sampai 0,79 m, untuk input $H_o = 0,98$ m maka tinggi gelombang pecah yang terjadi berkisar antara 1,18 sampai 1,21 m, untuk input $H_o = 1,56$ m maka tinggi gelombang pecah yang terjadi berkisar antara 1,86 sampai 1,94 m.

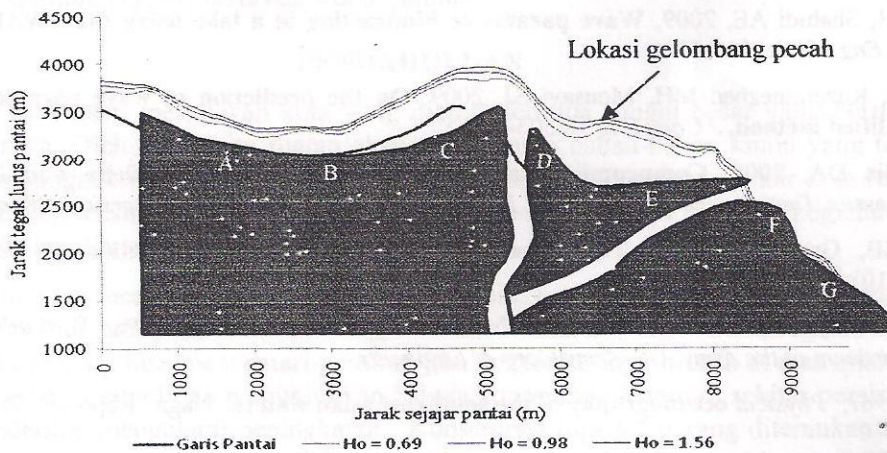
Hasil perhitungan tinggi gelombang pecah, secara umum menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Abdallah *et al.* (2006) yang mengamati transformasi gelombang di Tanjung Rosetta, teluk Abu-Qir. Tinggi gelombang pecah pada kedua sisi Tanjung Rosetta hampir sama. Untuk tinggi gelombang laut lepas 1 m, gelombang pecah terjadi pada kedalaman air sekitar 1,7 m dengan tinggi gelombang pecah 1,5 m. Dalam penelitian ini model transformasi gelombang menggunakan persamaan CEM (USACE, 2003) dan kriteria gelombang pecah menggunakan persamaan Horikawa (1988), sedangkan pada model Abdallah *et al.* (2006) menggunakan program ACES.



Gambar 12 Hasil perhitungan tinggi gelombang pecah sepanjang pantai.

Lebar daerah dangkalan (*surf zone*) tergantung pada tinggi gelombang yang datang dan kelerengan pantai. Semakin tinggi gelombang yang datang, maka semakin besar lebar daerah dangkalan dan semakin kecil kelerengan pantai maka semakin besar lebar daerah dangkalan. Lebar daerah dangkalan di sepanjang pantai lokasi penelitian diperlihatkan pada Gambar 13.

Lebar daerah dangkalan untuk tinggi gelombang $H_o = 1,56$ m lebih besar dari pada $H_o = 0,69$ dan $H_o = 0,98$ m. Untuk tinggi gelombang laut lepas $H_o = 0,69$ m, lebar daerah dangkalan berkisar antara 170 sampai 790 m, untuk tinggi gelombang laut lepas $H_o = 0,98$ m, lebar daerah dangkalan berkisar antara 245 sampai 840 m dan untuk $H_o = 1,56$ m, lebar daerah dangkalan berkisar antara 275 sampai 880 m. Pada Gambar 12 terlihat bahwa lebar daerah dangkalan pada lokasi C, D dan E lebih besar dari pada lokasi A, B, F dan G. Hal ini disebabkan karena kelerengan pantai pada lokasi C, D dan E lebih kecil dibandingkan pada lokasi A, B, F dan G.



Gambar 13. Lebar daerah dangkalan gelombang dari garis pantai dengan tinggi gelombang laut lepas (H_o).

KESIMPULAN

Model numerik yang digunakan untuk memprediksi parameter gelombang laut lepas yang dibangkitkan oleh angin menunjukkan bahwa hubungan antara angin dan gelombang sangat perlu diteliti secara kontinu untuk mengetahui karakter gelombang suatu perairan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tinggi gelombang rata-rata bulanan yang terjadi di lokasi penelitian selama 19 tahun sangat bervariasi. Tinggi gelombang umumnya lebih besar pada bulan Desember – Februari (musim barat) dibandingkan pada bulan Juni – Agustus (musim timur). Arah gelombang cenderung konvergen pada pantai yang menjorok kelaut, sedangkan pantai yang menjorok ke darat cenderung divergen. Hasil simulasi transformasi gelombang dari laut lepas ke garis pantai dengan menggabungkan efek *shoaling* dan refraksi gelombang

terhadap perubahan bentuk gelombang yang menjalar dari laut lepas menuju ke pantai di atas batimetri yang tidak seragam menunjukkan adanya perubahan tinggi gelombang dan arah gelombang pada saat gelombang merambat dari laut lepas ke garis pantai. Pantai yang mempunyai kelerengan landai mempunyai tinggi gelombang yang terjadi lebih besar dari pada pantai yang curam.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdallah AM, Sharaf El-Din SH, Shereet SM, 2006, **Analysis wave observations and wave transformations in Abu-Qir Bay, EGYPT**, *Egyptian J Aquat Res*, 32(1):22-33.
- Balas L, Inan A, 2002, **A numerical model of wave propagation on mild slopes**, *J coas Res* 36:16-21.
- Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH, 1999, **A third-generation wave model for coastal regions** *J Geophys Res* 104(C4):7649-7666.
- Browne M *et al.* 2007, **Near-shore swell estimation from a global wind-wave model: Spectral process, linear, and artificial neural network models**, *J Coas Eng* 54:445-460.
- Departemen PU, 1989, **Bili-Bili Multipurpose Dam Project Detailed Design for Jeneberang River Improvement Works**, Supporting Report Study on Hydrology and River Hydraulics Volume II.
- Horikawa K, 1988, **Nearshore dynamics and coastal processes**, Japan: University of Tokyo Press.
- Kazeminezhad MH, Shahidi AE, Mousavi SJ, 2005, **Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters**, *J Ocean Eng* 32:1709-1725.
- Kazeminezhad MH, Shahidi AE, Mousavi SJ, 2007, **Evaluation of neuro fuzzy and numerical wave prediction models in lake ontario**, *J coas Res* 50:317-321.
- Maa JPY, Wang DWC, 1995, **Wave transformation near virginia coast: The "Halloween" northeaster**, *J coas Res* 11(4):1258-1271.
- Moeini MH, Shahidi AE, 2009, **Wave parameter hindcasting in a lake using the SWAN model**, *J Civil Eng* 16(2):156-164.
- Shahidi AE, Kazeminezhad MH, Mousavi SJ, 2009, **On the prediction of wave parameters using simplified method**, *J Coas Eng* 56:505-509.
- Suriamihardja DA, 2005, **Compromise management in the jeneberang delta and iosari bay, Makassar**, *Department of Geography, Publication Series Number 61 University of Waterloo*.
- Thornton EB, Guza RT, 1983, **Transformation of wave height distribution**, *J Geophys Res* 88(C10):5925-5938.
- USACE (US Army Corps of Engineers), 2003. **Meteorology and wave climate. Part II. Washington DC. Department of the Army. US. Army Corp of Engineers.**
- Wyrski K, 1961, **Physical oceanography of the southeast asian waters. Naga Report**, 2:1-195.