

Aplikasi Model *Shoaling* dan *Breaking* pada Perencanaan Perlindungan Pantai dengan Metoda *Headland Control*

Syawaluddin Hutahaean

Kelompok Keahlian Teknik Pantai, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10 Bandung, 40132, E-mail: syawaluddin@ocean.itb.ac.id

Abstrak

Perencanaan perlindungan pantai dengan metoda headland control, memerlukan informasi mengenai orientasi pantai stabil yang diperoleh dengan melakukan analisis transportasi sedimen oleh gelombang breaking. Analisis transportasi sedimen ini memerlukan input tinggi gelombang, kedalaman perairan dan arah gelombang pada saat breaking. Pada paper ini tinggi gelombang breaking dan kedalaman perairan dimana gelombang tersebut breaking diperoleh dengan menggunakan model shoaling dan breaking. Selanjutnya dengan informasi tersebut dilakukan analisis transportasi sedimen dan orientasi pantai stabil. Dengan informasi orientasi pantai stabil ini, dilakukan perencanaan perlindungan pantai dengan metoda headland control.

Kata-kata Kunci: Tinggi gelombang breaking, Kedalaman breaking, Orientasi pantai stabil.

Abstract

A planning of a coastal protection using headland control method, needs informations about orientation of stabil coastline. The orientation of stabil coastline is obtained by analyzing sediment transportation due to breaking wave. Sediment transportation analysis needs informations of wave height, water depth and wave direction of breaking wave. In this paper the breaking wave height and the water depth where the wave is breaking is obtained by using wave shoaling and breaking model. Using those informations sediment transportation and the stabil coastline orientation are calculated. Finally, coastal protection by headland control method is designed using the information of stabil coastline orientation information.

Keywords: Breaking wave height, Water depth of a wave breaking, Stabil coastline orientation.

1. Pendahuluan

Perencanaan suatu bangunan pelindung pantai memerlukan informasi mengenai kondisi gelombang pada saat breaking, antara lain tinggi gelombang pada saat *breaking*, kedalaman perairan dimana terjadi *breaking* dan arah gelombang pada saat breaking, dimana semua besaran tersebut dapat diperoleh dengan melakukan analisis transformasi gelombang dari perairan dalam menuju perairan pantai yang dangkal.

Dengan model 2-D, yaitu analisis refraksi-difraksi dapat dimodelkan gelombang breaking (Hutahaean 2007b dan 2008b). Namun kurang praktis untuk digunakan dalam melakukan analisis arah/orientasi pantai stabil, mengingat meliputi perhitungan jumlah gelombang yang sangat banyak.

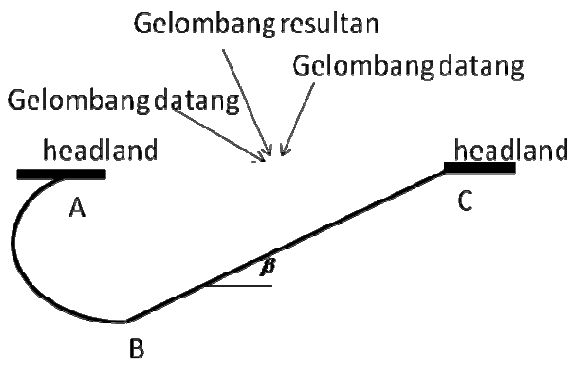
Pada penelitian ini dikembangkan model transformasi gelombang 1-D meliputi shoaling dan breaking saja, dimana hasil model diaplikasikan untuk melakukan perencanaan perlindungan pantai dengan metoda *headland control*.

2. Perlindungan Pantai dengan Metoda Headland Control

Dalam terdapat pantai stabil yang disebut dengan crenulated shaped bay (Silverster, 1974), (Herbich, 2000), seperti diperlihatkan pada **Gambar 1**. Pada kedua ujung pantai tersebut terdapat headland, yaitu suatu bagian pantai yang tahan erosi, dimana dialam bagian tersebut dapat berupa batu karang.

Gelombang yang datang terdiri dari gelombang dari arah kiri dan kanan, yang menyebabkan sedimen bergerak dari kiri kekanan dan gelombang dari kanan yang menyebabkan terjadi gerakan sedimen dari kanan ke kiri. Pada pantai stabil, resultan dari transportasi sedimen dari kedua arah gelombang tersebut adalah nol. Jadi seolah-olah resultan dari kedua komponen gelombang tersebut adalah gelombang yang tegak lurus segmen pantai BC (**Gambar 1**).

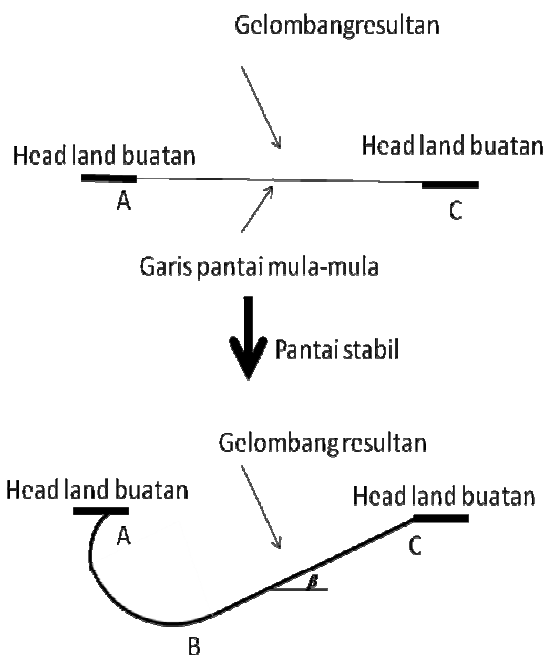
Berdasarkan kondisi pantai stabil ini maka, bila pada suatu segmen pantai dibuat suatu headland, maka segmen pantai tersebut akan berevolusi menuju bentuk pantai stabil (**Gambar 2**).



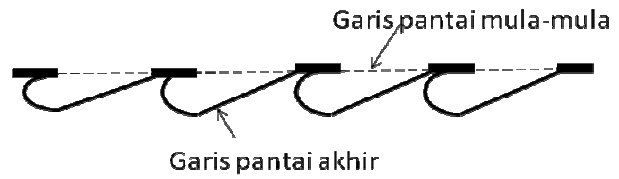
Gambar 1. Profil pantai stabil

Garis pantai yang semula berupa garis AC, akan berevolusi menjadi garis lengkung ABC, dimana garis BC membentuk sudut sebesar β terhadap suatu referensi, dimana pada kasus ini sebagai referensi adalah garis pantai mula-mula (garis AC). Garis BC ini tegak lurus arah gelombang resultan sehingga transportasi sedimen netto adalah nol. Jadi dapat dikatakan bahwa segmen pantai antara dua headland buatan ini akan berevolusi menuju tegaklurus gelombang resultan, dimana evolusi tersebut menyebabkan pantai tererosi terlebih dahulu kemudian menjadi stabil.

Perlindungan pantai berdasarkan bentuk pantai stabil ini disebut dengan metoda headland control. Untuk suatu segmen pantai yang sangat panjang, dimana jarak antar headland juga sangat panjang maka besar cekungan atau besarnya erosi pada proses pembentukan pantai stabil juga akan sangat besar.



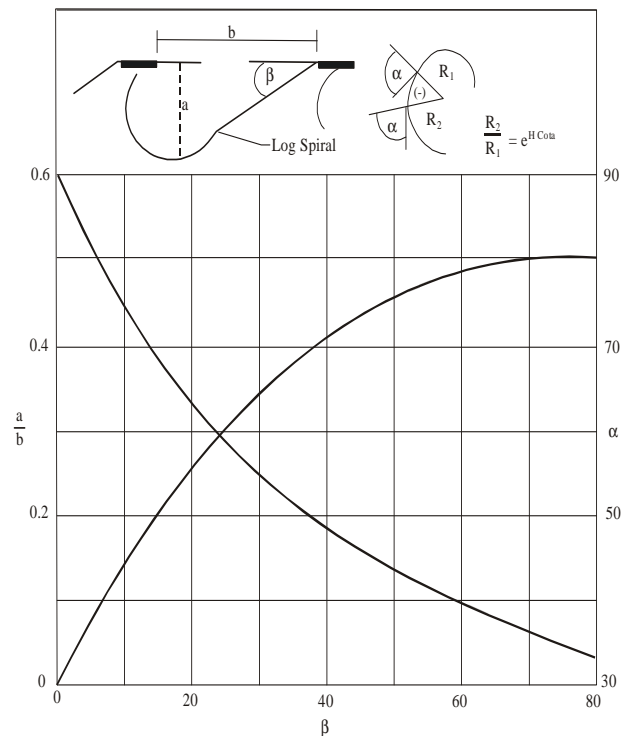
Gambar 2. Pantai stabil dengan headland buatan



Gambar 3. Perlindungan pantai dengan membentuk segmen-segmen pantai stabil

Untuk memperkecil besarnya erosi, dapat dikembangkan sistem pantai stabil, yang terdiri dari sejumlah segmen pantai stabil dengan jarak antar headland yang pendek seperti pada Gambar 3.

Besarnya cekungan (erosi) antar dua headland ini dapat dihitung dengan menggunakan metoda dari Silverster dan Hsu (Herbich, 2000), dimana mereka telah membuat nomogram relasi antara besarnya erosi (a) dengan jarak antar headland (b), dengan sudut arah pantai stabil (β), Gambar 4.



Gambar 4. Relasi antara jarak antar headland dengan kedalaman cekungan pada pantai stabil dari Silverster dan Hsu. (Herbich, 2000)

Jarak antar headland (b) dapat diatur, sesuai dengan keperluan, namun sudut arah pantai stabil (β), harus dihitung berdasarkan kondisi iklim gelombang yang ada dilokasi. Dengan demikian langkah-langkah perencanaan perlindungan pantai metoda headland control adalah :

- Menghitung sudut arah pantai stabil β
- Menentukan jarak antar headland dengan memperhitungkan erosi yang diijinkan.

3. Perhitungan Sudut Arah Pantai Stabil (β)

Bila sudut arah pantai mula-mula adalah β_0 , dimana $\beta_0 = 0^0$, maka sudut arah pantai stabil adalah $\beta = \beta_0 + \delta$, dimana δ dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{i,j} ((\theta_{b,i} + \delta), H_j) = 0 \quad \text{dimana } n = \text{jumlah}$$

variasi arah gelombang, sedangkan $m =$ banyaknya tinggi gelombang pada suatu arah gelombang. Perhitungan dapat dilakukan dengan metoda iterasi sederhana (*trial-error*), maupun dengan metoda Newton-Rhapson.

Perhitungan transportasi sedimen yang digunakan pada penelitian ini adalah persamaan dari CERC (Herbich, 2000), yaitu bahwa gelombang breaking akan menimbulkan arus sejajar pantai dengan flux energi sebesar,

$$P_{L_s} = \frac{\rho g}{16} (H^2 C_g)_b \sin 2\theta_b \quad (1)$$

H_b = tinggi gelombang pada saat *breaking*
 $C_{g,b}$ = kecepatan group pada kedalaman *breaking*
 θ_b = arah gelombang pada saat *breaking*

Flux energi ini akan menimbulkan gerakan sedimen dengan debit :

$$q = \frac{K}{0.6(\rho_s - \rho)g} P_{L_s} \text{ m}^3/\text{dt} \quad (2)$$

K = koefisien dari CERC (untuk pasir, digunakan 0.4)
 ρ_s = massa jenis sedimen
 ρ = massa jenis air laut
 g = percepatan gravitasi

Terlihat bahwa perhitungan dengan metoda ini memerlukan input tinggi gelombang pada saat *breaking* H_b , kedalaman perairan pada lokasi gelombang *breaking* h_b dan arah gelombang pada saat *breaking* θ_b , dimana θ_b dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Snellius (Dean, 1984),

$$\theta_b = \arcsin \left(\frac{C_b}{C_0} \sin \theta_0 \right) \quad (3)$$

θ_{b0} adalah arah gelombang diperairan dalam, C_0 adalah seleritas gelombang diperairan dalam dan C_b adalah seleritas dikedalaman *breaking*.

4. Pemodelan *Shoaling* dan *Breaking*

Harga-harga tinggi gelombang *breaking* H_b dan kedalaman *breaking* h_b diperoleh dengan menggunakan model *shoaling* dan *breaking*. Model *shoaling* dan

breaking yang digunakan pada penelitian ini adalah model yang dikembangkan berdasarkan sifat-sifat konstanta pada persamaan potensial aliran terhadap perubahan kedalaman pada potensial aliran gelombang nonlinier, Hutahaean S (2007a-b dan 2008 a-b).

4.1 Persamaan potensial aliran dan sifat konstanta G

Hutahaean S (2007a-b dan 2008a-b), mendapatkan potensial aliran gelombang yang bergerak pada arah ξ , pada sistem sumbu (ξ, z), dimana, ξ sumbu horisontal, sedangkan z adalah sumbu vertikal (**Gambar 5**) dimana $z = 0$ pada muka air diam, adalah

$$\phi = G e^{kh} \beta(z) \cos k\xi \sin \sigma t \quad (4)$$

G = konstanta gelombang, k = bilangan gelombang = $2\pi / L$, L = panjang gelombang, h = kedalaman perairan,

σ = frekuensi sudut = $2\pi / T$

T = periode gelombang

$$\beta(z) = \alpha e^{k(h+z)} + e^{-k(h+z)}, \quad \beta_1(z) = \alpha e^{k(h+z)} - e^{-k(h+z)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{\partial h}{\partial \xi} & 1 - \frac{\partial h}{\partial \xi} \\ 1 - \frac{\partial h}{\partial \xi} & 1 + \frac{\partial h}{\partial \xi} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$\partial h / \partial \xi$ adalah kemiringan dasar perairan.

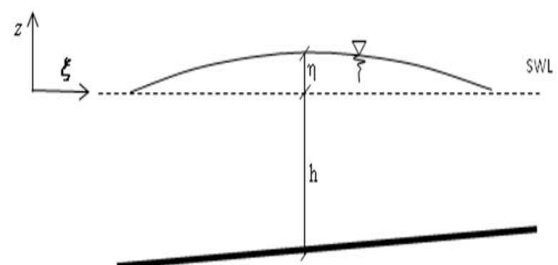
4.1.1 Beberapa sifat penting

Pada metoda pemisahan variabel, dikerjakan anggapan bahwa $\phi(\xi, z, t) = X(\xi)Z(z)T(t)$, dimana $X(\xi)$ suatu fungsi ξ saja, $Z(z)$ suatu fungsi z saja sedangkan $T(t)$ suatu fungsi t saja. Untuk fungsi $\phi(\xi, z, t)$ seperti pada **Persamaan (4)**,

$$X(\xi) = G e^{kh} \cos k\xi ; Z(z) = \beta(z) ; T(t) = \sin \sigma t \quad (7)$$

Persamaan $Z(z)$ diturunkan terhadap sumbu horisontal

$$-\xi \frac{\partial Z(z)}{\partial \xi} = \beta_1(z) \frac{\partial k(h+z)}{\partial \xi}$$



Gambar 5. Sistem sumbu dan sket muka air akibat gelombang

Mengingat $Z(z)$ suatu fungsi z saja, maka $\frac{\partial Z(z)}{\partial \xi} = 0$ sehingga $\beta_1(z) \frac{\partial k(h+z)}{\partial \xi} = 0$, untuk

$$\beta_1(z) \neq 0. \text{ Maka } \frac{\partial k(h+z)}{\partial \xi} = 0 \quad (8)$$

Syarat batas kinematik permukaan dikerjakan pada muka air dimana $z = \eta$ ($\eta = \eta(\xi, t)$) (adalah persamaan muka air). Dan pada perumusan berbagai persamaan pada tulisan ini, digunakan kondisi pada saat $\cos k\xi = \sin k\xi = \cos \sigma$

$$\sin \sigma = \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ dimana pada kondisi ini } \eta = \frac{A}{2},$$

$$\frac{\partial k\left(h + \frac{A}{2}\right)}{\partial \xi} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta\left(\frac{A}{2}\right)}{\partial \xi} = \beta_1\left(\frac{A}{2}\right) \frac{\partial k\left(h + \frac{A}{2}\right)}{\partial \xi} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \beta_1\left(\frac{A}{2}\right)}{\partial \xi} = \beta\left(\frac{A}{2}\right) \frac{\partial k\left(h + \frac{A}{2}\right)}{\partial \xi} = 0 \quad (11)$$

Hutahaean (2010) dengan mengerjakan persamaan kontinuitas memperoleh,

$$\frac{\partial kh}{\partial \xi} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial G}{\partial \xi} = -\frac{G}{2k} \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} \quad (13)$$

Dari **Persamaan (9)** dan **(12)**, diperoleh

$$\frac{\partial k \frac{A}{2}}{\partial \xi} = 0 \quad (14)$$

Persamaan-persamaan kecepatan partikel adalah, kecepatan partikel pada arah horisontal ξ ,

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = Gke^{kh} \beta(z) \sin k\xi \sin \sigma - \frac{\partial G}{\partial \xi} e^{kh} \beta(z) \cos k\xi \sin \sigma$$

Persamaan ini adalah kecepatan horisontal pada suatu posisi z , di bawah muka air, sedangkan kecepatan horisontal pada permukaan diperoleh dengan mensubstitusikan $z = \eta$. Substitusi **Persamaan (13)**,

$$\frac{\partial G}{\partial \xi} = \frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi}$$

$$u = Gke^{kh} \beta(z) \sin k\xi \sin \sigma - \frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} e^{kh} \beta(z) \cos k\xi \sin \sigma \quad (15)$$

Kecepatan arah vertikal- Z ,

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = -Ge^{kh} k \beta_1(z) \cos k\xi \sin \sigma \quad (16)$$

Pada bagian berikut akan ditunjukkan relasi antara G dengan amplitudo gelombang A yang dengan demikian perubahan G juga merupakan perubahan tinggi gelombang dan sebaliknya. Berdasarkan sifat G yang seperti ini, maka analisis shoaling dapat dilakukan dengan melalui analisis perubahan G .

4.1.2 Persamaan muka air

Hutahaean (2010), dengan menggunakan metoda inversi integral mendapatkan bahwa persamaan muka air akibat gelombang adalah

$$\eta(\xi, t) = A \cos k\xi \cos \sigma \quad (17)$$

4.2 Persamaan untuk G dan k

Pada persamaan potensial aliran, **Persamaan (4)**, terdapat 2 konstanta yang belum diketahui, yaitu G dan k . Untuk itu pada bagian ini dirumuskan persamaan-persamaan untuk menghitung kedua konstanta tersebut.

Hutahaean (2007a-b dan 2008a-b, 2010), melakukan perhitungan ke dua konstanta tersebut dengan menggunakan persamaan-persamaan syarat batas kinematik permukaan dan persamaan momentum, dimana syarat batas kinematik permukaan adalah (Dean, 1984):

$$w_\eta = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_\eta \frac{\partial \eta}{\partial \xi}$$

Dengan mensubstitusikan u_η dan w_η dan $\partial \eta / \partial \xi$ dari **Persamaan (15)**, **(16)** dan **(17)**, dengan

$$\begin{aligned} &\text{mengerjakan kondisi } \cos k\xi = \sin k\xi = \cos \sigma = \sin \sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \sigma A &= Ge^{kh} k \beta_1(\eta) - Gke^{kh} \beta(\eta) \frac{kA}{2} + \frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} e^{kh} \beta(\eta) \frac{kA}{2} \end{aligned} \quad (18)$$

Persamaan syarat batas kinematik permukaan tersebut adalah merupakan suatu persamaan untuk G dan k yang dapat ditulis menjadi,

$$f_1(G, k) = -\sigma A + Ge^{kh} k \beta_1(\eta) - Gke^{kh} \beta(\eta) \frac{kA}{2} +$$

$$\frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} e^{kh} \beta(\eta) \frac{kA}{2} = 0 \quad (19)$$

Sebagai persamaan berikutnya adalah persamaan momentum permukaan,

$$\frac{\partial u_\eta}{\partial t} = \frac{\beta_1(\eta)}{\beta(\eta)} k u_\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u_\eta u_\eta + w_\eta w_\eta) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (20)$$

atau,

$$f_2(G, k) = \frac{\partial u_\eta}{\partial t} - \frac{\beta_1(\eta)}{\beta(\eta)} k u_\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \xi} (u_\eta^2 + w_\eta^2) + g \frac{\partial \eta}{\partial \xi} = 0 \quad (21)$$

Perumusan persamaan momentum ini tidak disertakan, karena fokus paper ini adalah pada model shoalingnya. Perumusan akan ditulis pada penelitian yang lain.

Pada **Persamaan (21)**, disubstitusikan persamaan-persamaan kecepatan dan muka air dan dikerjakan pada kondisi $\cos k\xi = \sin k\xi = \cos \sigma\tau = \sin \sigma\tau$. Dengan menggunakan **Persamaan-persamaan (19)** dan **(21)**, G dan k dapat dihitung, dengan input amplitudo gelombang A, periode gelombang T, dimana $\sigma = 2\pi/T$ dan kedalaman perairan h, dengan metoda iterasi dari Newton-Rhapson, yaitu

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial G} & \frac{\partial f_1}{\partial k} \\ \frac{\partial f_2}{\partial G} & \frac{\partial f_2}{\partial k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta G \\ \delta k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(G, k) \\ f_2(G, k) \end{bmatrix} \quad (22)$$

4.3 Pemodelan shoaling dan breaking

Shoaling adalah pembesaran tinggi gelombang akibat pendangkalan perairan, dimana gelombang yang bergerak dari perairan dalam menuju perairan yang lebih dangkal selalu mengalami peristiwa shoaling ini. Pembesaran tinggi gelombang tersebut terjadi terus-menerus dan pada akhirnya gelombang akan mengalami breaking. Besaran-besaran lain yang mengalami perubahan pada peristiwa shoaling adalah k dan G.

4.3.1 Perubahan amplitudo

Persamaan (18) dapat ditulis menjadi persamaan untuk amplitudo A.

$$A = \frac{G}{\sigma} e^{kh} \left(k\beta_1(\eta) - k\beta(\eta) \frac{kA}{2} + \frac{1}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} \right)$$

Persamaan ini didiferensialkan terhadap ξ , dengan memperhatikan **Persamaan-persamaan (8)** s/d **(14)**,

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial G}{\partial \xi} e^{kh} \left(k\beta_1(\eta) - k\beta(\eta) \frac{kA}{2} + \frac{1}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} \right) + \frac{G}{\sigma} e^{kh} \left(\frac{\partial k}{\partial \xi} \beta_1(\eta) - \frac{\partial k}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} - \frac{1}{2h^2} \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial h}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} \right)$$

Substitusi **Persamaan (13)**, $\frac{\partial G}{\partial \xi} = \frac{G}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi}$, dan

dengan mengingat **Persamaan (14)**, $\frac{\partial kA}{\partial \xi} = 0$, maka

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{A}{2h} \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{G}{\sigma} e^{kh} \left(\frac{\partial k}{\partial \xi} \beta_1(\eta) - \frac{\partial k}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} - \frac{1}{2h^2} \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial h}{\partial \xi} \beta(\eta) \frac{kA}{2} \right) \quad (23)$$

Persamaan (23) ini adalah persamaan perubahan amplitudo gelombang, dimana dari **Persamaan (12)**,

$$\frac{\partial k}{\partial \xi} = -\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial \xi}$$

berupa persamaan diferensial parabolik yang dapat diselesaikan dengan metoda selisih hingga dengan skema diferensial kedepan.

a. Perubahan k

Dari kedalaman h_1 menuju kedalaman h_2 yang lebih dangkal, akan terjadi pengurangan panjang gelombang atau pembesaran bilangan gelombang k. **Persamaan (9)** yaitu

$$\frac{\partial k \left(h + \frac{A}{2} \right)}{\partial \xi} = 0, \text{ dapat ditulis menjadi, } \frac{\partial k}{k} = - \frac{\partial \left(h + \frac{A}{2} \right)}{\left(h + \frac{A}{2} \right)}$$

Persamaan ini diintegrasikan dari titik 1 ke titik 2, diperoleh

$$\ln k_2 - \ln k_1 = - \left(\ln \left(h_2 + \frac{A_2}{2} \right) - \ln \left(h_1 + \frac{A_1}{2} \right) \right)$$

atau

$$k_2 = e^{\left(\ln k_1 - \left(\ln \left(h_2 + \frac{A_2}{2} \right) - \ln \left(h_1 + \frac{A_1}{2} \right) \right) \right)} \quad (24)$$

b. Perubahan G

Untuk menghitung perubahan G ketika gelombang bergerak dari kedalaman h_1 menuju kedalaman h_2

digunakan **Persamaan(13)** $\frac{\partial G}{\partial \xi} = -\frac{G}{2k} \frac{\partial k}{\partial \xi}$. Persamaan

dapat ditulis menjadi, $\frac{\partial G}{G} = -\frac{1}{2} \frac{\partial k}{k}$.

Persamaan diintegrasikan dari titik 1 ke titik 2,

$$G_2 = e^{\left(\ln G_1 - \frac{1}{2}(\ln k_2 - \ln k_1) \right)} \quad (25)$$

4.3.2 Contoh hasil analisis shoaling dan breaking

Contoh hasil analisis shoaling dan breaking untuk perioda gelombang 6, 7 dan 8 detik, dengan amplitudo mula-mula 0.80 m, dimana model dikerjakan pada suatu perairan pantai dengan batimetri dasar perairan hasil model *shoaling* seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Pada perairan dangkal, profil gelombang berbentuk cnoidal dimana amplitudo gelombang merupakan tinggi gelombang, atau $H = A$. Adapun kedalaman breaking dan amplitudo breaking disajikan pada **Tabel (1)**.

Pada hasil perhitungan tersebut, terlihat bahwa gelombang dengan perioda 7 detik, mempunyai kondisi breaking yang cukup dekat dengan kriteria umum breaking, $A_{brk} / d_{brk} \geq 0.78$, dan kriteria Miche $A_{brk}^3 0.142 L \tanh kd$ (Sarpkaya, 1981). Kriteria breaking memang sangat bervariasi, dan memberikan kondisi *breaking* yang berbeda-beda. Selain itu kondisi *breaking* dipengaruhi juga oleh kemiringan batimetri

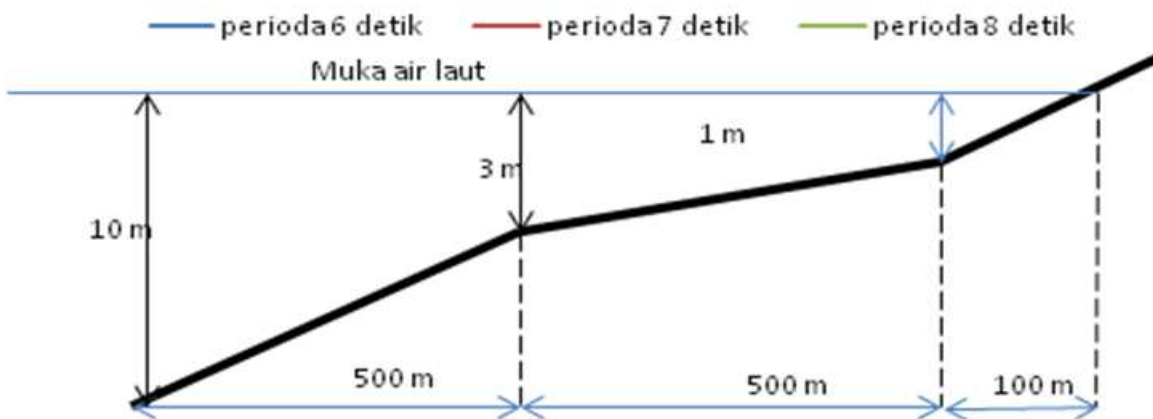
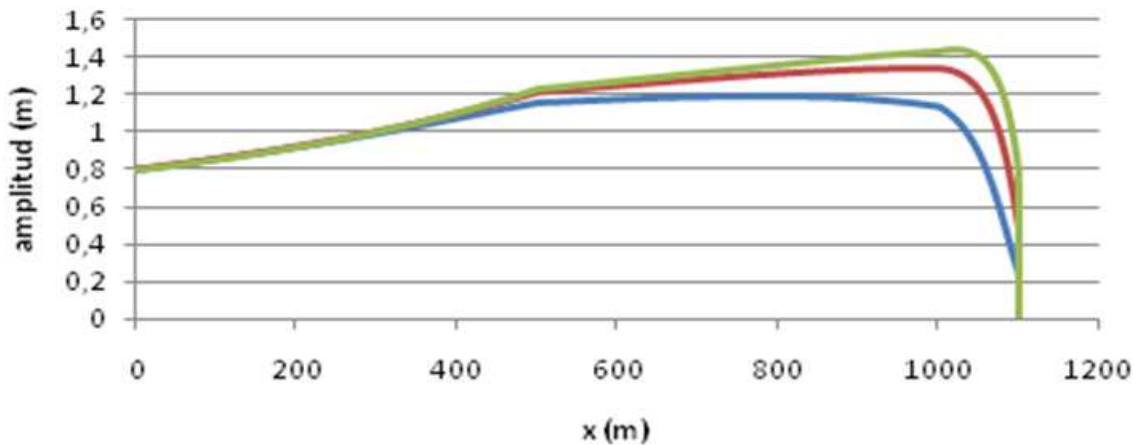
dimana peranan kemiringan batimetri tersebut tidak terdapat pada kriteria umum maupun kriteria Miche. Meskipun hasil model berbeda, namun terdapat kesamaan yaitu bahwa besar tinggi/amplitudo gelombang breaking ditentukan oleh perioda gelombang, dimana berdasarkan syarat batas kinematik permukaan Hutahaeen (2007a, 2008a), mendapatkan bahwa kriteria breaking adalah $H/L = 2/\pi \tanh k(h + A/2)$. *Breaking* terjadi pada perairan yang dangkal, dimana profil gelombang berbentuk cnoidal sempurna, maka kriteria breaking ini menjadi $A/L = 1/\pi \tanh k(h + A/2)$.

5. Contoh Hasil Perhitungan b dan Jarak Antar Headland

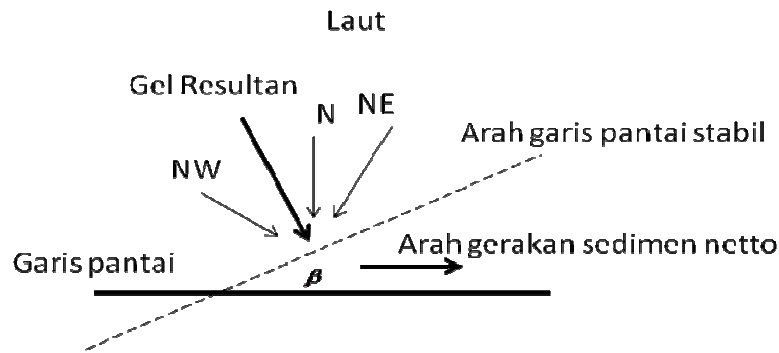
Pada suatu perairan pantai terdapat distribusi gelombang rata-rata tahunan seperti disajikan pada **Tabel 2**, dengan orientasi arah pantai seperti pada **Gambar (7)**.

Tabel 1. Amplitudo dan kedalaman breaking

Perioda Gelombang (detik)	Hasil model		Kriteria <i>breaking</i>	
	A_{brk} (m)	h_{brk} (m)	A_{brk} / h_{brk}	Miche A_{brk}
6	1.16	2.69	0.43	1.88
7	1.34	1.89	0.71	1.50
8	1.45	1.50	0.97	1.25



Gambar 6. Batimetri dan grafik amplitudo gelombang A akibat shoaling dan breaking



Gambar 7. Arah garis pantai existing dan arah garis pantai stabil

Tabel 2. Fraksi kejadian gelombang rata-rata tahunan (%)

Ting. Gel	Calm	20-40	40-60	60-70	70-80	80-120	120-160	>160	Total
Arah	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	%
N	.00	.03	.30	.70	.55	1.79	1.72	.17	5.25
NE	.00	.04	.39	.70	.50	1.63	1.23	.09	4.59
E	6.78	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	6.78
SE	11.73	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	11.73
S	10.81	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	10.81
SW	21.05	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	21.05
W	32.22	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	32.22
NW	.00	.03	.33	.87	.77	2.49	2.50	.58	7.56
Total	82.60	.10	1.02	2.26	1.82	5.90	5.45	.85	100.00

Perhitungan transportasi sedimen dengan metoda CERC, menghasilkan gerakan sedimen netto ke arah timur dengan debit 1481036m³ / tahun. Dengan kondisi gerakan sedimen ini, maka arah pantai stabil diperoleh dengan merotasikan garis pantai mula-mula berlawanan dengan arah jarum jam sebesar $\beta = 12.415^{\circ}$, dimana jarak antar headland dengan erosi yang terjadi adalah seperti pada Tabel (3).

Tabel 3. Jarak antar headland (b) dan besarnya erosinya (a)

No	Jarak antar headland (b) (m)	Erosi (a) (m)
1	100	16
2	200	31
3	300	47

6. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat diambil sejumlah kesimpulan, yaitu antara lain :

1. Pada perencanaan perlindungan pantai dengan berdasarkan gerakan sedimen littoral, memerlukan informasi mengenai tinggi gelombang breaking. Pada penelitian ini informasi kondisi gelombang breaking diperoleh dengan menggunakan model shoaling dan *breaking*.
2. Model transformasi gelombang 1-D yang dikembangkan, model shoaling dan breaking, dapat mengidentifikasi kedalaman breaking dan tinggi/

amplitudo gelombang pada saat *breaking* dan cukup praktis untuk digunakan analisis transportasi sedimen littoral atau transportasi sedimen akibat gelombang *breaking*.

3. Perlindungan pantai dengan metoda *Headland Control*, dapat direncanakan secara praktis dengan menggunakan profil pantai stabil dari Silverster dan Hsu (Gambar (4)). Dimana dengan metoda ini dapat sekaligus diperkirakan potensi erosi yang akan terjadi.
4. Pemodelan shoaling dan breaking, akan lebih tepat dengan menggunakan model 2-D, namun meskipun model tersebut dapat memodelkan gelombang breaking, masih cukup sulit mengekstrak informasi lokasi gelombang breaking dari model tersebut. Tetapi kesulitan tersebut hanyalah kesulitan pada pembuatan programnya, bukan pada pengembangan model transformasi gelombangnya.
5. Penelitian lebih lanjut yang perlu dilakukan adalah dengan melakukan analisis shoaling dan breaking dengan model 2-D.

Daftar Pustaka

- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984, *Waterwave Mechanics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall.
- Herbich, J.B., 2000, *Handbook of Coastal Engineering*. McGraw-Hill.
- Hutahaean, S., 2007a, Kajian Teoritis terhadap Persamaan Gelombang Nonlinier, *Jurnal Teknik Sipil*, Volume 14, No. 3, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB.
- Hutahaean, S., 2007b, Model Refraksi Gelombang dengan Menggunakan Persamaan Gelombang Nonlinier, *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan*, Volume III, No. 2, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB.
- Hutahaean, S., 2008a, 2008, Persamaan Gelombang Nonlinier Pada Dasar Perairan Miring, *Jurnal Teknik Sipil*, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB, Volume 15 No.1, April.
- Hutahaean, S., 2008b, Model Refraksi-Difraksi Gelombang Air Oleh Batimetri, *Jurnal Teknik Sipil*, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB, Volume 15 No.2, Agustus.
- Hutahaean, S., 2010, Pengerjaan Metoda Inversi Integral pada Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB, Volume 17 No.2, Agustus 2010.
- Sarpkaya T. and Iseacson, M., 1981, *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Company.
- Silverster, R., 1974, *Coastal Engineering, II*. Elsevier Scientefic Publishing Company, Amsterdam London New York.