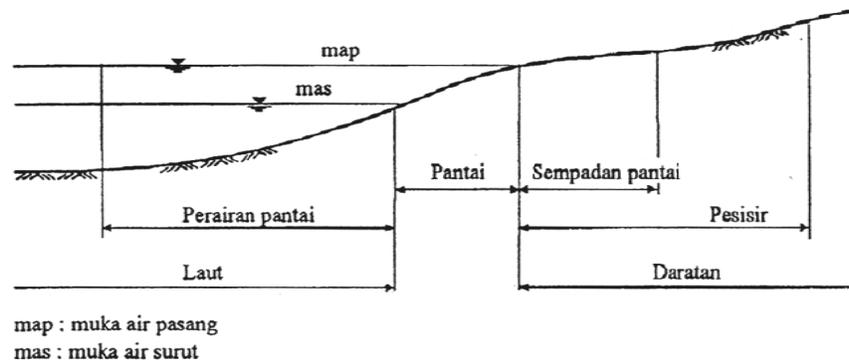


BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Pantai

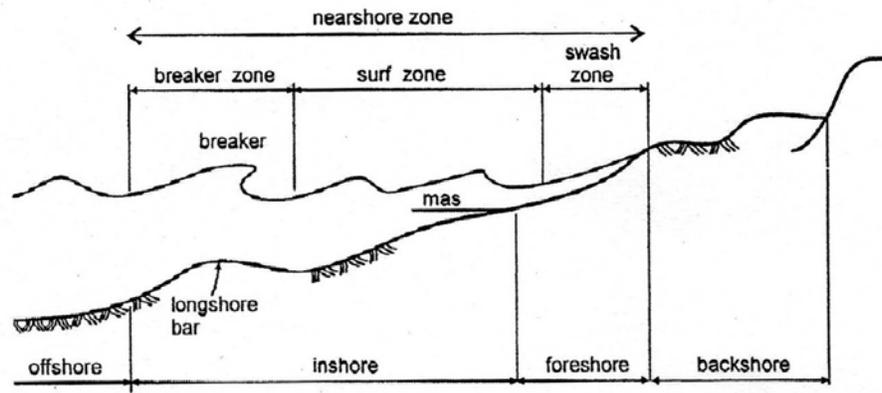
Ada dua istilah tentang kepantaian dalam bahasa Indonesia yang sering rancu pemakaiannya, yaitu pesisir (*coast*) dan pantai (*shore*). Penjelasan tentang hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Definisi dan batasan pantai (Triatmodjo, 1999)

Pesisir adalah daerah darat di tepi laut yang masih mendapat pengaruh laut seperti pasang surut, angin laut dan perembesan air laut. Sedangkan pantai adalah daerah di tepi perairan yang dipengaruhi oleh air pasang tertinggi dan air surut terendah. Daerah daratan adalah daerah yang terletak di atas dan di bawah permukaan tanah dimulai dari batas garis pasang tertinggi. Daerah lautan adalah daerah yang terletak di atas dan di bawah permukaan air laut dimulai dari sisi laut pada garis surut terendah, termasuk dasar laut dan bagian di bawahnya. Garis pantai adalah garis batas pertemuan antara daratan dan air laut, dimana posisinya tidak tetap dan dapat berpindah sesuai dengan pasang surut air laut dan erosi pantai yang terjadi. Sempadan pantai adalah kawasan tertentu sepanjang pantai yang mempunyai manfaat penting untuk mempertahankan kelestarian fungsi pantai. Kriteria sempadan pantai yaitu daratan sepanjang tepian yang lebarnya sesuai dengan bentuk dan kondisi fisik pantai, minimum 100 m dari titik pasang tertinggi ke arah daratan.

Selain beberapa definisi seperti yang disebutkan di atas, perlu juga mengetahui beberapa definisi yang berkaitan dengan karakteristik gelombang di daerah sekitar pantai, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Definisi dan karakteristik gelombang di daerah pantai
(Triatmodjo, 1999)

Ditinjau dari profil pantai, daerah ke arah pantai dari garis gelombang pecah dibagi menjadi tiga daerah yaitu *inshore*, *foreshore*, dan *backshore*. Perbatasan antara *inshore* dan *foreshore* adalah batas antara air laut pada saat muka air rendah dan permukaan pantai. Proses gelombang pecah di daerah *inshore* sering menyebabkan *longshore bar* yaitu gunduk pasir yang memanjang dan kira-kira sejajar dengan garis pantai. *Foreshore* adalah daerah yang terbentang dari garis pantai pada saat muka air rendah sampai batas atas dari *uprush* pada saat air pasang tinggi. Profil pantai di daerah ini memiliki kemiringan yang lebih curam daripada profil di daerah *inshore* dan *backshore*. *Backshore* adalah daerah yang dibatasi oleh *foreshore* dan garis pantai yang terbentuk pada saat terjadi gelombang badai bersamaan dengan muka air tinggi.

2.2 Gelombang

Gelombang di laut dibedakan menjadi beberapa macam tergantung pada gaya pembangkitnya. Gelombang tersebut adalah gelombang angin yang dibangkitkan oleh tiupan angin di permukaan laut, gelombang pasang surut dibangkitkan oleh gaya tarik benda-benda langit terutama matahari dan bulan terhadap bumi, gelombang tsunami terjadi

karena letusan gunung berapi atau gempa di laut, gelombang yang dibangkitkan oleh kapal yang bergerak, dan lain sebagainya.

Berdasarkan kedalaman relatif, yaitu perbandingan antara kedalaman air d dan panjang gelombang L , (d/L), gelombang dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu:

1. Gelombang di laut dangkal, jika $d/L \leq 1/20$
2. Gelombang di laut transisi, jika $1/20 \leq d/L \leq 1/2$
3. Gelombang di laut dalam, jika $d/L \geq 1/2$

Pada umumnya bentuk gelombang di alam adalah sangat kompleks dan sulit digambarkan secara matematis karena ketidak-linieran, tiga dimensi dan mempunyai bentuk yang *random* (suatu deret gelombang mempunyai tinggi dan periode berbeda). Ada beberapa teori dengan berbagai derajat kekompleksan dan ketelitian untuk menggambarkan gelombang di alam, diantaranya Teori Gelombang Airy, Amplitudo Hingga, Stokes, dan Knoidal.

2.2.1 Teori Gelombang Amplitudo Kecil (Airy)

Teori gelombang amplitudo kecil diperkenalkan pada tahun 1845 oleh Airy. Teori ini merupakan teori gelombang yang paling sederhana, yang diturunkan dari persamaan Laplace untuk aliran tak berotasi. Kondisi batas permukaan yang diambil menggunakan persamaan Bernoulli yang dilinierkan, sedangkan kondisi batas dasar laut diambil kecepatan arah vertikal sama dengan nol.

Persamaan Laplace :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

Kondisi aliran di dasar laut :

$$v = \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \text{ , di } y = -d \dots\dots\dots (2.2)$$

Kondisi batas aliran di permukaan :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} (v^2 + u^2) + g \cdot y + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan melakukan linierisasi, dan menganggap tekanan permukaan (p) sama dengan nol, maka elevasi permukaan air dapat diturunkan :

$$\eta = -\frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ pada } y = \eta \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan menganggap amplitudo gelombang relatif kecil maka persamaan permukaan air berlaku :

$$\eta = -\frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ pada } y = 0 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots (2.6)$$

Penyelesaian persamaan Laplace dengan mengambil kondisi batas permukaan dan dasar seperti tersebut di atas akan mendapatkan :

$$C = \frac{g.T}{2\pi} \tanh \left[\frac{2\pi d}{L} \right] \dots\dots\dots (2.7)$$

$$L = \frac{g.T^2}{2\pi} \tanh \left[\frac{2\pi d}{L} \right] \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{L} + \frac{t}{T} \right) \right] \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

- C = kecepatan rambat gelombang (cm/detik)
- H = tinggi gelombang (m)
- L = panjang gelombang (m)
- T = periode gelombang (detik)
- d = kedalaman dasar laut (m)
- p = tekanan di permukaan air (tf^2/m^2)
- u = kecepatan partikel air arah sumbu x, horisontal (m/detik)
- v = kecepatan partikel air arah sumbu y, vertikal (m/detik)
- g = percepatan gravitasi (m/det^2)
- η = elevasi muka air laut, dari SWL (m)
- ρ = rapat massa air (t/m^3)
- θ = potensial kecepatan

2.2.1 Teori Gelombang Amplitudo Hingga

Di dalam teori gelombang amplitudo kecil (Airy) dianggap bahwa tinggi gelombang adalah sangat kecil terhadap panjangnya atau kedalamannya. Persamaan gelombang diturunkan dengan mengabaikan (melinierkan) suku (u^2+v^2) dari persamaan Bernoulli (persamaan 2.3). Apabila tinggi gelombang relatif besar suku tidak linier tersebut tidak boleh diabaikan. Dalam keadaan ini digunakan teori gelombang amplitudo berhingga yang memperhitungkan besaran dengan orde yang lebih tinggi.

$$\eta = a \cos(kx - \sigma t) + a^2 B_2(L, d) \cos 2(kx - \sigma t) + a^3 B_3(L, d) \cos 3(kx - \sigma t) + a^n B_n(L, d) \cos n(kx - \sigma t) \dots\dots\dots(2.10)$$

2.2.2 Teori Gelombang Stokes

Stokes mengembangkan teori orde kedua untuk gelombang yang mempunyai tinggi gelombang kecil tetapi berhingga. Beberapa karakteristik gelombang Stokes antara lain:

1. Panjang dan kecepatan rambat gelombang

Panjang dan kecepatan rambat gelombang untuk teori gelombang Stokes sama dengan teori gelombang Airy, yaitu pada persamaan (2.7) dan (2.8).

2. Fluktuasi muka air

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} (2 + \cosh 2kd) \cos 2(kx - \sigma t) \dots\dots\dots(2.11)$$

3. Kecepatan partikel

Komponen kecepatan partikel arah x dan y mempunyai bentuk berikut :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 C \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh^4 kd} \cos 2(kd - \sigma t) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 C \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kd - \sigma t) \dots\dots\dots(2.13)$$

2.2.3 Teori Gelombang Knoidal

Teori gelombang amplitudo hingga dari Stokes berlaku apabila perbandingan antara kedalaman dan panjang gelombang d/L adalah lebih besar dari sekitar $1/8 - 1/10$. Untuk gelombang panjang dengan amplitudo berhingga di laut dangkal lebih sesuai apabila digunakan teori Knoidal. Gelombang Knoidal adalah gelombang periodik yang biasanya mempunyai puncak tajam yang dipisahkan oleh lembah yang cukup panjang. Teori ini berlaku apabila $d/L < 1/8$ dan parameter *Ursell* $U_R > 26$. Parameter *Ursell* didefinisikan sebagai $U_R = HL^2/d^3$.

Karakteristik gelombang dinyatakan dalam bentuk parameter yang merupakan fungsi dari k . Parameter k tidak mempunyai arti fisik, dan hanya digunakan untuk menyatakan hubungan antara berbagai parameter gelombang. Ordinat dari permukaan air y_s diukur terhadap dasar.

$$y_s = y_t + H cn^2 \left\{ 2K(k) \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right), k \right\} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\frac{y_t}{d} = \frac{y_c}{d} - \frac{H}{d} = \frac{16d^2}{3L^2} K(k) \{ K(k) - E(k) \} + 1 - \frac{H}{d} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$L = \sqrt{\frac{16d^2}{3H}} kK(k) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$T = \sqrt{\frac{g}{d}} = \sqrt{\frac{16y_t}{3H}} \frac{d}{t} \left[\frac{kH(k)}{1 + \frac{H}{y_t k^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{E(k)}{K(k)} \right)} \right] \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\rho = \rho g(y_s - y) \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan :

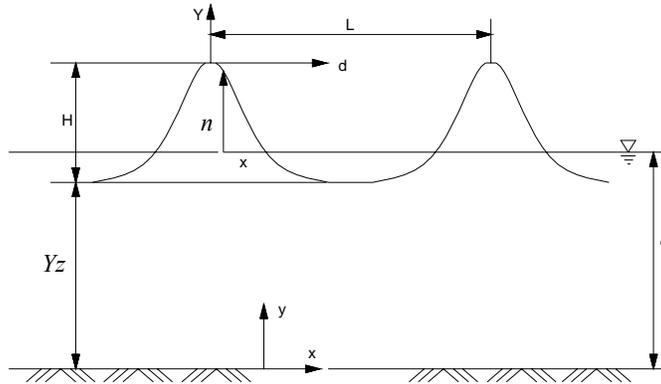
y_t = jarak dari dasar ke lembah gelombang (m)

y_c = jarak dari dasar ke puncak gelombang (m)

cn = fungsi cosines ellips

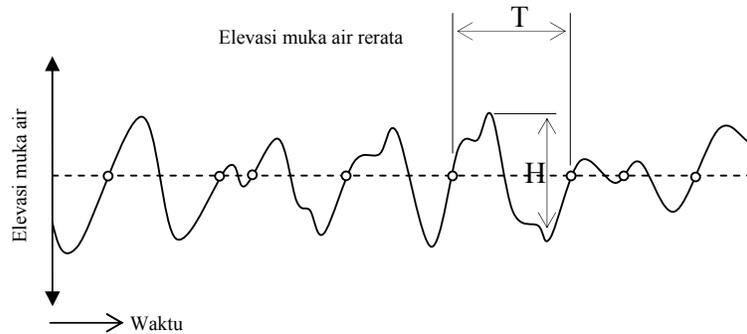
$K(k)$ = integral ellips

k = modulus dari integral ellips (berkisar antara 0 dan 1)



Gambar 2.3 Gelombang Knoidal (Triatmodjo, 1999)

2.2.4 Statistika Gelombang



Gambar 2.4 Pencatatan gelombang di suatu tempat (Triatmodjo,1999)

Gambar 2.4 adalah suatu pencatatan gelombang sebagai fungsi waktu di suatu tempat. Gambar tersebut menunjukkan bahwa gelombang mempunyai bentuk yang tidak teratur, dengan tinggi dan periode tidak konstan. Maka dari itu dalam peramalan tinggi gelombang untuk keperluan perencanaan digunakan beberapa metode, yaitu gelombang representatif dan gelombang dengan kala ulang (analisa frekuensi).

2.2.5 Gelombang Representatif

Untuk keperluan perencanaan bangunan-bangunan pantai perlu dipilih tinggi dan periode gelombang individu (*individual wave*) yang dapat mewakili suatu spektrum gelombang. Apabila tinggi gelombang dari suatu pencatatan diurutkan dari nilai tertinggi ke terendah atau sebaliknya, maka akan dapat ditentukan nilai H_n yang merupakan rerata dari n persen gelombang tertinggi. Dengan bentuk seperti itu akan dapat dinyatakan karakteristik gelombang alam dalam bentuk gelombang tunggal. Misal H_{10} adalah tinggi rerata dari 10% gelombang tertinggi dari pencatatan gelombang. Bentuk yang paling banyak digunakan adalah H_{33} atau tinggi rerata dari 33% nilai tertinggi dari pencatatan gelombang, yang juga disebut sebagai tinggi gelombang signifikan H_s . Cara yang sama dapat digunakan untuk periode gelombang. Tetapi biasanya periode signifikan didefinisikan sebagai periode rerata untuk sepertiga gelombang tertinggi.

Gelombang 10% (H_{10}) adalah :

$$n = 10\% \times \text{jumlah data dalam pencatatan}$$

$$H_{10} = \frac{\sum_1^n H_n}{n} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$T_{10} = \frac{\sum_1^n T_n}{n} \dots\dots\dots(2.20)$$

Gelombang 33% (gelombang signifikan, H_s) adalah :

$$n = 33\% \times \text{jumlah data dalam pencatatan}$$

$$H_{33} = \frac{\sum_1^n H_n}{n} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$T_{33} = \frac{\sum_1^n T_n}{n} \dots\dots\dots(2.22)$$

Gelombang 100% (gelombang rerata, H_{100}) adalah :

$$n = 100\% \times \text{jumlah data dalam pencatatan}$$

$$H_{100} = \frac{\sum_1^n H_n}{n} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$T_{100} = \frac{\sum_1^n T_n}{n} \dots\dots\dots(2.24)$$

2.2.6 Perkiraan gelombang Dengan Kala Ulang (Analisis Frekuensi)

Dari setiap tahun pencatatan dapat ditentukan gelombang representatif seperti H_s , H_{10} , H_1 , H_{maks} dan sebagainya. Berdasarkan dari representatif untuk beberapa tahun pengamatan dapat diperkirakan gelombang yang diharapkan disamai atau dilampaui satu kali dalam T tahun, dan gelombang tersebut dikenal dengan gelombang periode ulang T tahun atau gelombang T tahunan.

Apabila data yang tersedia adalah data angin maka analisis frekuensi dilakukan terhadap data angin tersebut yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi gelombang. Dalam hal ini gelombang hasil peramalan adalah gelombang signifikan.

Distribusi yang digunakan untuk prediksi gelombang dengan kala ulang tertentu, yaitu :

1. Distribusi *Fisher-Tippett Type I* :

$$P(H \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{-\frac{\hat{H}_s - B}{A}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$P(H_s \leq \hat{H}_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,44}{N_T + 0,22} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$H_m = A_{y_m} + B \dots\dots\dots (2.27)$$

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \dots\dots\dots (2.28)$$

$$H_m = A_{y_r} + B \dots\dots\dots (2.29)$$

$$y_r = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)\right], L = \frac{N_T}{K} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$A = \frac{n \sum H_{sm} y_m - \sum H_{sm} \sum y_m}{n \sum y_m^2 - (\sum y_m)^2} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$B = H_{sm} - A_{y_m} \dots\dots\dots (2.32)$$

2. Distribusi *Weibull* :

$$P(H \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^K} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$P(H_s \leq \hat{H}_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,2 - \frac{0,27}{\sqrt{K}}}{N_T + 0,2 + \frac{0,23}{\sqrt{K}}} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$H_m = A_{y_m} + B \dots\dots\dots (2.35)$$

$$y_m = -\ln[1 - F(H_s \leq H_{sm})]^K \dots\dots\dots (2.36)$$

$$H_m = A_{y_r} + B \dots\dots\dots (2.37)$$

$$y_r = [\ln(LT_r)], L = \frac{N_T}{K} \dots\dots\dots (2.38)$$

Dimana :

- $P(H \leq \hat{H}_s)$: probabilitas bahwa \hat{H}_s tidak dilampaui
- H : tinggi gelombang representatif (m)
- \hat{H} : tinggi gelombang dengan nilai tertentu (m)
- A : parameter skala
- B : parameter lokasi
- K : parameter bentuk (kolom pertama) (Tabel 2.1)
- $P(H_s \leq \hat{H}_{sm})$: probabilitas dari tinggi gelombang representatif ke m yang tidak dilampaui
- \hat{H}_{sm} : tinggi gelombang urutan ke m (m)
- m : nomor urut tinggi gelombang signifikan =1,2,.....,N
- N_T : jumlah kejadian gelombang selama pencatatan
- H_{sr} : tinggi gelombang signifikan dengan kala ulang T_r
- T_r : kala ulang (tahun)
- K : panjang data (tahun)
- L : rerata jumlah kejadian per tahun

Dalam analisis gelombang dibutuhkan perkiraan interval keyakinan. Hal ini mengingat bahwa biasanya periode pencatatan gelombang adalah pendek, dan tingkat ketidakpastian yang tinggi dalam perkiraan gelombang ekstrim. Batas keyakinan sangat dipengaruhi oleh penyebaran data, sehingga nilainya bergantung pada deviasi standar. Dalam pembahasan ini digunakan pendekatan yang dilakukan oleh Gumbel (1985) (Triatmodjo,1999) perkiraan deviasi standar dari nilai ulang. Deviasi standar yang dinormalkan dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma_{nr} = \frac{1}{\sqrt{N}} [1 + \alpha(y_r - c + \varepsilon \ln v)^2]^{1/2} \dots\dots\dots(2.39)$$

$$\alpha = \alpha_1 e^{\alpha_2 N^{-1.3} + K\sqrt{-\ln v}} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$v = \frac{N}{N_T} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\sigma_r = \sigma_{nr} \sigma H_s \dots\dots\dots(2.42)$$

α_1, α_2, e, K : koefisien empiris yang diberikan oleh (Tabel 2.1).

Keterangan :

σ_{nr} = standar deviasi yang dinormalkan tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang T_r

N = jumlah data

σ_r = kesalahan standar dari tinggi gelombang signifikan dengan kala ulang T_r

σH_s = deviasi standar dari data tinggi gelombang signifikan

Tabel 2.1 Koefisien untuk menghitung deviasi standar

Distribusi	k	α_1	α_2	K	c	ϵ
FT-1		0,64	9,0	0,93	0,0	1,33
Weibull	0,75	1,65	11,4	-0,63	0,0	1,15
Weibull	1,65	1,92	11,4	0,00	0,3	0,90
Weibull	1,92	2,05	11,4	0,69	0,4	0,72
Weibull	2,05	2,24	11,4	1,34	0,5	0,54

(Triatmodjo, 1999)

2.3 Deformasi Gelombang

Apabila suatu deretan gelombang bergerak menuju pantai, gelombang tersebut akan mengalami perubahan bentuk yang disebabkan oleh proses refraksi dan pendangkalan gelombang, difraksi, refleksi, serta gelombang pecah.

2.3.1 Refraksi dan *Wave Shoaling*

1. Koefisien Refraksi

Refraksi terjadi dikarenakan gelombang datang membentuk sudut terhadap garis pantai. Refraksi mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap tinggi dan arah datang gelombang serta distribusi energi gelombang sepanjang pantai. Refraksi dapat menentukan tinggi gelombang di suatu tempat berdasarkan karakteristik gelombang datang.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\alpha}} \dots\dots\dots (2.43)$$

Dimana pada hukum Snell (dalam Triatmodjo,1999) berlaku apabila ditinjau gelombang di laut dalam dan di suatu titik yang ditinjau yaitu :

$$\sin \alpha = \left(\frac{c}{c_0}\right) \sin \alpha_0 \dots\dots\dots (2.44)$$

Dengan,

K_r = koefisien refraksi

- α = sudut antara garis puncak gelombang dan garis kontur dasar laut di titik yang ditinjau.($^{\circ}$)
- α_0 = sudut antara puncak gelombang di laut dalam dan garis pantai
- C = kecepatan rambat gelombang (m/d)
- C_0 = kecepatan rambat gelombang di laut dalam (m/d)

2. *Wave Shoaling* (Pendangkalan Gelombang)

Wave shoaling terjadi dikarenakan adanya pengaruh perubahan dasar laut. *Wave shoaling* mempunyai fungsi yang sama dengan refraksi gelombang, yaitu untuk menentukan tinggi gelombang di suatu tempat berdasarkan karakteristik gelombang datang.

$$K_s = \sqrt{\frac{n_0 L_0}{nL}} \dots\dots\dots(2.45)$$

- Dengan, K_s = koefisien *shoaling* (pendangkalan)
- L = panjang gelombang (m)
- L_0 = panjang gelombang di laut dalam (m)

3. Tinggi Gelombang Laut Dangkal

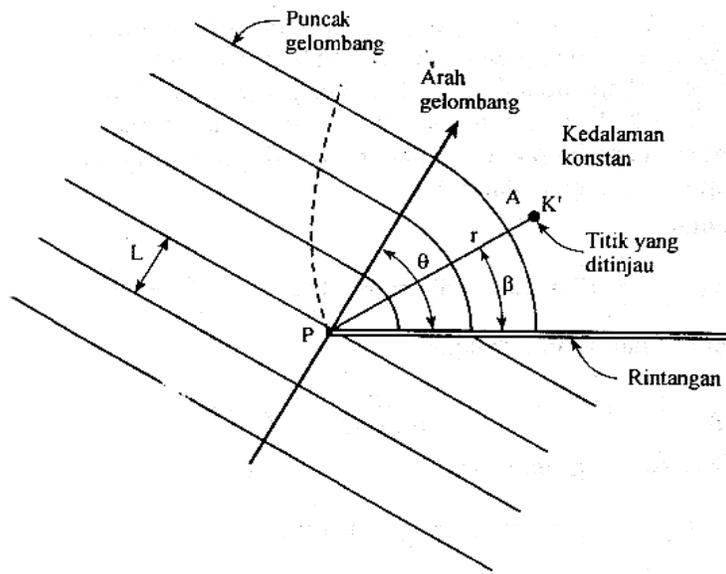
Tinggi gelombang di laut dangkal terjadi akibat pengaruh refraksi gelombang dan *wave shoaling* (pendangkalan sungai), diberikan oleh rumus tersebut :

$$H_1 = K_s \times K_r \times H_0 \dots\dots\dots(2.46)$$

- Dengan, H_1 = tinggi gelombang laut dalam (m)
- K_s = koefisien *shoaling* (pendangkalan)
- K_r = koefisien refraksi
- H_0 = tinggi gelombang laut dalam (m)

2.3.2 Difraksi Gelombang

Difraksi gelombang terjadi bila gelombang datang terhalang oleh suatu rintangan seperti pemecah gelombang atau pulau, maka gelombang tersebut akan membelok di sekitar ujung rintangan dan masuk di daerah terlindung di belakangnya. Difraksi terjadi apabila tinggi gelombang di suatu titik pada garis puncak gelombang lebih besar daripada titik di dekatnya, yang menyebabkan perpindahan energi sepanjang puncak gelombang ke arah tinggi gelombang yang lebih kecil.



Gambar 2.5 Difraksi gelombang dibelakang rintangan (Triatmodjo,1999)

Pada rintangan (pemecah gelombang) tunggal, tinggi gelombang di suatu tempat di daerah terlindung tergantung pada jarak titik tersebut terhadap ujung rintangan r , sudut antara rintangan dan garis-garis yang menghubungkan titik tersebut dengan ujung rintangan β dan sudut antara arah penjalaran gelombang dan rintangan θ . Perbandingan antara tinggi gelombang di titik yang terletak di daerah terlindung dan tinggi gelombang datang disebut koefisien difraksi K' .

$$HA = K' H_p \dots\dots\dots (2.47)$$

$$K' = f(\theta, \beta, r/L) \dots\dots\dots (2.48)$$

Dengan A adalah titik yang ditinjau di belakang rintangan dan P ujung pemecah gelombang. Nilai K' untuk $\theta, \beta, r/L$ tertentu diberikan dalam Tabel 2.2 yang didasarkan pada penyelesaian matematis untuk difraksi cahaya. Difraksi gelombang air ini analog dengan difraksi cahaya, sehingga Tabel 2.2 juga dapat digunakan untuk memperkirakan pola garis puncak gelombang dan variasi tinggi gelombang yang mengalami difraksi.

Tabel 2. 2 Koefisien difraksi gelombang

r/L	β (derajat)										r/L	β (derajat)															
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135		150	165	180	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\theta = 15^\circ$													$\theta = 105^\circ$														
1/2	0.49	0.79	0.83	0.90	0.97	1.01	1.03	1.02	1.01	0.99	0.99	1.00	1.00	1/2	0.28	0.28	0.29	0.32	0.35	0.41	0.49	0.59	0.72	0.85	0.97	1.01	1.00
1	0.38	0.73	0.83	0.95	1.04	1.04	0.99	0.98	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1	0.20	0.20	0.24	0.23	0.27	0.33	0.42	0.56	0.75	0.95	1.06	1.04	1.00
2	0.21	0.68	0.86	1.05	1.03	0.97	1.02	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2	0.14	0.14	0.13	0.17	0.20	0.25	0.35	0.54	0.83	1.08	1.03	0.97	1.00
5	0.13	0.63	0.99	1.04	1.03	1.02	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	5	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.17	0.27	0.52	1.02	1.04	1.04	1.02	1.00
10	0.35	0.58	1.10	1.05	0.98	0.99	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	10	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.12	0.20	0.52	1.14	1.07	0.97	0.99	1.00
$\theta = 30^\circ$													$\theta = 120^\circ$														
1/2	0.61	0.63	0.68	0.76	0.87	0.97	1.03	1.05	1.03	1.01	0.99	0.95	1.00	1/2	0.25	0.26	0.27	0.28	0.31	0.35	0.41	0.50	0.60	0.73	0.87	0.97	1.00
1	0.50	0.53	0.63	0.78	0.95	1.06	1.05	0.98	0.98	1.01	1.01	0.97	1.00	1	0.18	0.19	0.19	0.21	0.23	0.27	0.33	0.43	0.57	0.76	0.95	1.04	1.00
2	0.40	0.44	0.59	0.84	1.07	1.03	0.96	1.02	0.98	1.01	0.99	0.95	1.00	2	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.26	0.36	0.55	0.83	1.07	1.03	1.00
5	0.27	0.32	0.55	1.00	1.04	1.04	1.02	0.99	0.99	1.00	1.01	0.97	1.00	5	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.13	0.16	0.27	0.53	1.01	1.04	1.03	1.00
10	0.20	0.24	0.54	1.12	1.06	0.97	0.99	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	10	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.13	0.20	0.52	1.13	1.06	0.98	1.00
$\theta = 45^\circ$													$\theta = 135^\circ$														
1/2	0.49	0.50	0.55	0.63	0.73	0.85	0.96	1.04	1.06	1.04	1.00	0.99	1.00	1/2	0.24	0.24	0.25	0.25	0.26	0.28	0.32	0.36	0.42	0.52	0.63	0.76	1.00
1	0.38	0.40	0.47	0.59	0.76	0.95	1.07	1.06	0.98	0.97	1.01	1.01	1.00	1	0.18	0.17	0.18	0.18	0.19	0.21	0.23	0.28	0.34	0.44	0.59	0.78	1.00
2	0.29	0.31	0.39	0.56	0.83	1.08	1.04	0.96	1.03	0.98	1.01	1.00	1.00	2	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.26	0.37	0.56	0.84	1.00
5	0.18	0.20	0.29	0.54	1.01	1.04	1.05	1.03	1.00	0.99	1.01	1.00	1.00	5	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.13	0.17	0.28	0.54	1.00	1.00
10	0.13	0.15	0.22	0.53	1.13	1.07	0.96	0.98	1.02	0.99	1.00	1.00	1.00	10	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.13	0.21	0.53	1.12	1.00
$\theta = 60^\circ$													$\theta = 150^\circ$														
1/2	0.40	0.41	0.45	0.52	0.60	0.72	0.85	1.13	1.04	1.06	1.03	1.01	1.00	1/2	0.23	0.23	0.24	0.25	0.27	0.29	0.33	0.38	0.45	0.55	0.68	0.83	1.00
1	0.31	0.32	0.36	0.44	0.57	0.75	0.96	1.08	1.06	0.98	0.98	1.01	1.00	1	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.22	0.24	0.29	0.36	0.47	0.63	0.83	1.00
2	0.22	0.23	0.28	0.37	0.55	0.83	1.08	1.04	0.96	1.03	0.98	1.01	1.00	2	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.22	0.28	0.39	0.59	0.86	1.00
5	0.14	0.15	0.18	0.28	0.53	1.01	1.04	1.05	1.03	0.99	0.99	1.00	1.00	5	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.10	0.11	0.13	0.18	0.29	0.55	0.99	1.00
10	0.10	0.11	0.13	0.21	0.52	1.14	1.07	0.96	0.98	1.01	1.00	1.00	1.00	10	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.13	0.22	0.54	1.10	1.00
$\theta = 75^\circ$													$\theta = 165^\circ$														
1/2	0.34	0.35	0.38	0.42	0.50	0.59	0.71	0.85	0.97	1.04	1.05	1.02	1.00	1/2	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.28	0.31	0.35	0.41	0.50	0.63	0.79	1.00
1	0.25	0.26	0.29	0.34	0.43	0.56	0.75	0.95	1.02	1.06	0.98	0.98	1.00	1	0.16	0.16	0.17	0.17	0.19	0.20	0.23	0.26	0.32	0.40	0.53	0.73	1.00
2	0.18	0.19	0.22	0.26	0.36	0.54	0.83	1.09	1.04	0.96	1.03	0.99	1.00	2	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.19	0.23	0.31	0.44	0.68	1.00
5	0.12	0.12	0.13	0.17	0.27	0.52	1.01	1.04	1.05	1.03	0.99	0.99	1.00	5	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.15	0.20	0.32	0.63	1.00
10	0.08	0.08	0.10	0.13	0.20	0.52	1.14	1.07	0.96	0.98	1.01	1.00	1.00	10	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.11	0.21	0.58	1.00
$\theta = 90^\circ$													$\theta = 180^\circ$														
1/2	0.31	0.31	0.33	0.36	0.41	0.49	0.59	0.71	0.85	0.96	1.03	1.03	1.00	1/2	0.20	0.25	0.23	0.24	0.25	0.28	0.31	0.34	0.40	0.49	0.61	0.78	1.00
1	0.22	0.22	0.24	0.28	0.33	0.42	0.56	0.75	0.96	1.07	1.05	0.99	1.00	1	0.10	0.17	0.16	0.18	0.18	0.23	0.22	0.25	0.31	0.38	0.50	0.70	1.00
2	0.16	0.16	0.18	0.20	0.26	0.35	0.54	0.69	1.08	1.04	0.96	1.02	1.00	2	0.02	0.09	0.12	0.12	0.13	0.18	0.16	0.18	0.22	0.29	0.40	0.60	1.00
5	0.10	0.10	0.11	0.13	0.16	0.27	0.53	1.01	1.04	1.05	1.02	0.99	1.00	5	0.02	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.18	0.27	0.46	1.00
10	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.20	0.52	1.14	1.07	0.96	0.99	1.01	1.00	10	0.01	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.20	0.36	1.00

(Triatmodjo, 1999)

2.3.3 Refleksi Gelombang

Gelombang datang yang mengenai / membentur suatu rintangan akan dipantulkan sebagian atau seluruhnya. Tinjauan refleksi gelombang penting di dalam perencanaan bangunan pantai. Suatu bangunan mempunyai sisi miring dan terbuat dari tumpukan batu akan bisa menyerap energi gelombang lebih banyak dibandingkan dengan bangunan tegak dan masif. Pada bangunan vertikal, halus, dan dinding tidak permeabel, gelombang akan dipantulkan seluruhnya.

Besar kemampuan suatu bangunan memantulkan gelombang diberikan oleh koefisien refleksi, yaitu perbandingan antara tinggi gelombang refleksi H_r dan tinggi gelombang datang H_i .

$$X = \frac{H_r}{H_i} \dots\dots\dots(2.49)$$

Tabel 2.3 Koefisien refleksi

Tipe Bangunan	X
Dinding vertikal dengan puncak di atas air	0,7-1,0
Dinding vertikal dengan puncak terendam	0,5-0,7
Tumpukan batu sisi miring	0,3-0,6
Tumpukan blok beton	0,3-0,6
Bangunan vertikal dengan peredam energi (diberi lubang)	0,05-0,2

(Triatmodjo,1999)

2.3.4 Gelombang Pecah

Gelombang yang menjalar dari laut dalam menuju pantai mengalami perubahan bentuk karena adanya pengaruh perubahan kedalaman laut. Pengaruh kedalaman laut mulai terasa pada kedalaman lebih kecil dari setengah kali panjang gelombang. Profil gelombang di laut dalam adalah sinusoidal. Semakin menuju ke perairan yang lebih dangkal puncak gelombang semakin tajam dan lembah gelombang semakin datar. Selain itu kecepatan dan panjang gelombang berkurang secara berangsur-angsur, sementara tinggi gelombang bertambah.

Gelombang pecah dipengaruhi oleh kemiringannya, yaitu perbandingan antara tinggi dan panjang gelombang. Gelombang maksimum di laut dalam di mana gelombang mulai tidak stabil diberikan oleh persamaan berikut :

$$\frac{H_{o0}}{L_o} = \frac{1}{7} \dots\dots\dots(2.50)$$

Kedalaman gelombang pecah (d_b) dan tinggi gelombang pecah diberi notasi H_b , Munk (1946 dalam *SPM*,1984) memberikan persamaan untuk menentukan tinggi dan kedalaman gelombang pecah sebagai berikut :

$$\frac{H}{H'_{o}} = \frac{1}{3,3 \left[\frac{H'_{o}}{L_o} \right]^{2/3}} \dots\dots\dots(2.51)$$

Parameter H_b/H'_{o} disebut dengan indeks tinggi gelombang pecah. Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara H_b/H'_{o} dan H_o/gT^2 untuk berbagai kemiringan dasar laut. Gambar 2.7 menunjukkan hubungan antara d_b/H_b dan H_b/gT^2 untuk berbagai kemiringan

dasar. Grafik yang diberikan pada Gambar 2.6 dapat dituliskan dalam rumus sebagai berikut :

$$\frac{dB}{Hb} = \frac{1}{b - \left(\frac{aHb}{gT^2}\right)} \dots\dots\dots(2.52)$$

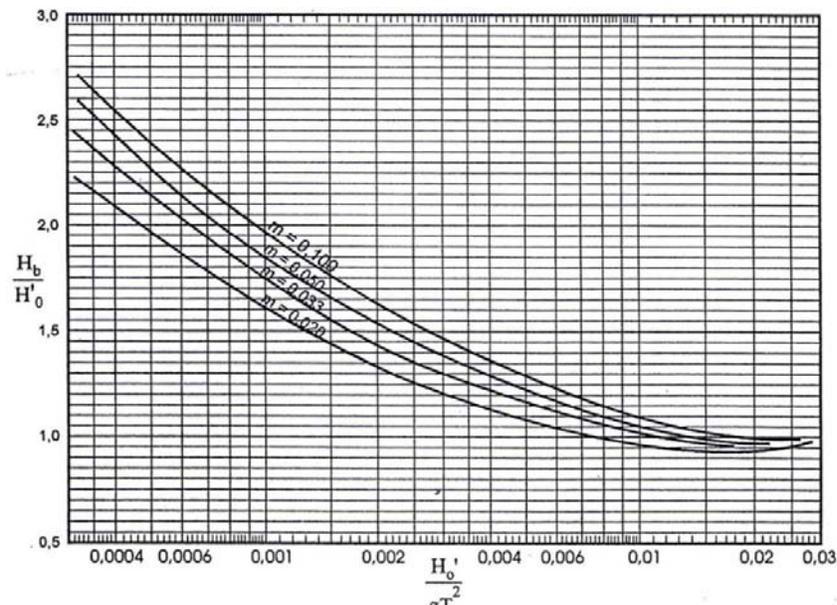
Dimana a dan b merupakan fungsi kemiringan pantai m dan diberikan oleh persamaan berikut :

$$a = 43,75 (1 - e^{-19m}) \dots\dots\dots(2.53)$$

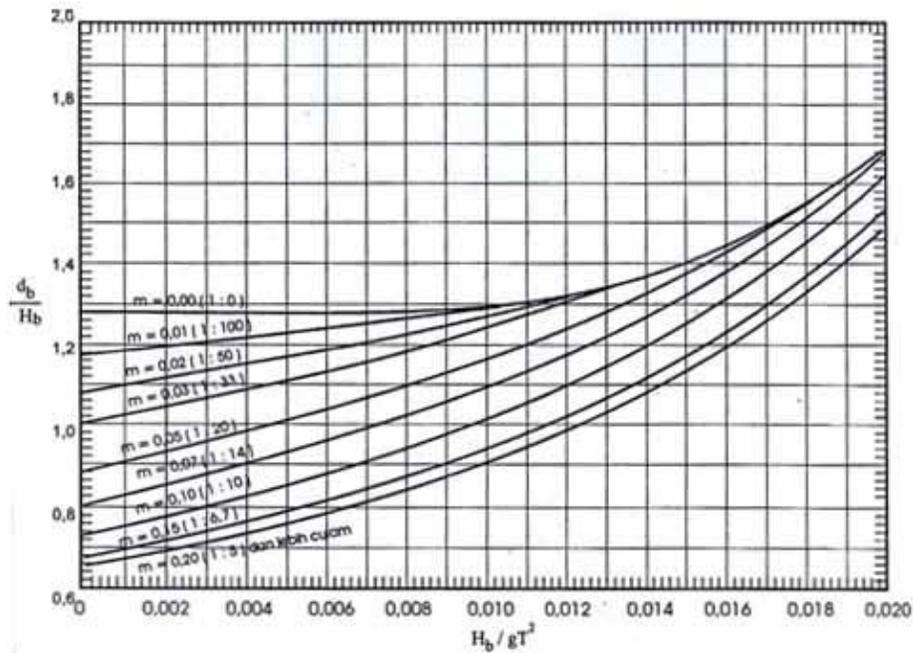
$$b = \frac{1,56}{1 + e^{-19,5m}} \dots\dots\dots(2.54)$$

Gelombang pecah dapat dibedakan menjadi :

1. *Spilling*, terjadi apabila gelombang dengan kemiringan yang kecil menuju ke pantai yang datar, gelombang mulai pecah pada jarak yang cukup jauh dari pantai dan pecahnya berangsur-angsur.
2. *Plunging*, terjadi apabila kemiringan gelombang dan dasar laut bertambah, gelombang akan pecah dan puncak gelombang akan memutar dengan massa air pada puncak gelombang akan terjun ke depan.
3. *Surging*, terjadi pada pantai dengan kemiringan yang cukup besar seperti yang terjadi pada pantai berkarang, daerah gelombang pecah sangat sempit dan energi dipantulkan kembali ke laut dalam.



Gambar 2.6 Penentuan tinggi gelombang pecah (Goda,1970 dalam CERC,1984)



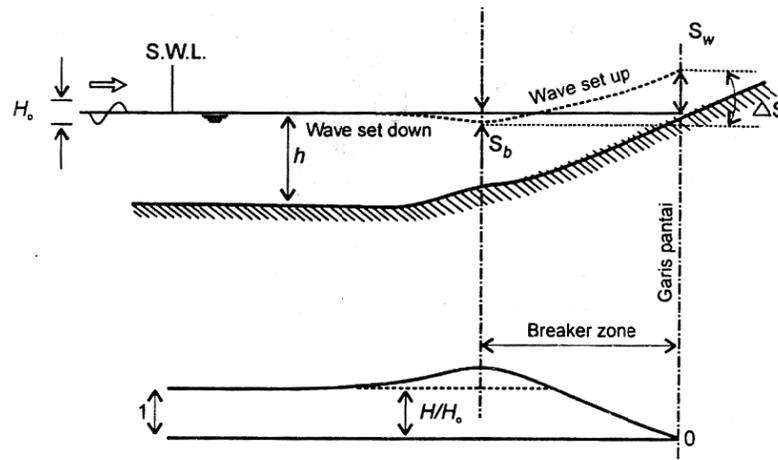
Gambar 2.7 Penentuan kedalaman gelombang pecah (CERC,1984)

2.4 Fluktuasi Muka Air Laut

Elevasi muka air laut merupakan parameter yang sangat penting dalam perencanaan bangunan pantai. Muka air laut berfluktuasi dengan periode yang lebih besar dari periode gelombang angin. Fluktuasi muka air laut dapat disebabkan oleh *wave set-up* (kenaikan muka air karena gelombang), *wind set-up* (kenaikan muka air karena angin), tsunami, *storm surge* (gelombang badai), pemanasan global, dan pasang surut.

2.4.1 Wave Set Up (Kenaikan Muka Air Karena Gelombang)

Gelombang yang datang dari laut menuju pantai menyebabkan fluktuasi muka air di daerah pantai terhadap muka air diam. Pada waktu gelombang pecah akan terjadi penurunan elevasi muka air rerata terhadap elevasi muka air diam di sekitar gelombang pecah. Kemudian dari titik dimana gelombang pecah permukaan air rerata miring ke atas ke arah pantai, turunnya muka air disebut *wave set down*, sedangkan naiknya muka air disebut *wave set up*, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Wave set-up dan wave set-down* (Triatmodjo,1999)

Wave set up dapat dihitung dengan menggunakan teori *Longuer-Higgins* dan *Stewart*. Besarnya *wave set down* di daerah gelombang pecah diberikan melalui persamaan berikut :

$$\dots\dots\dots(2.55)$$

Dengan,

S_b = *set-down* di daerah gelombang (m)

T = periode gelombang (detik)

H_o = tinggi gelombang laut dalam

D_b = kedalaman gelombang pecah (m)

g = percepatan gravitasi (m/dtk^2)

Wave set up di pantai diberikan oleh bentuk persamaan berikut :

$$\dots\dots\dots(2.56)$$

2.4.2 *Wind Set Up (Kenaikan Muka Air Karena Angin)*

Angin dengan kecepatan besar (badai) yang terjadi di atas permukaan laut bisa membangkitkan fluktuasi muka air laut yang besar di sepanjang pantai jika badai tersebut cukup kuat dan daerah pantai dangkal dan luas. Penentuan elevasi muka air rencana selama terjadinya badai adalah sangat kompleks yang melibatkan interaksi antara angin dan air, perbedaan tekanan atmosfer dan beberapa parameter lainnya. Perbedaan tekanan atmosfer

selalu berkaitan dengan perubahan arah dan kecepatan angin, dan angin tersebut yang menyebabkan fluktuasi muka air laut.

Untuk memprediksi kenaikan elevasi muka air karena badai dapat dilihat pada Gambar 2.9 yang memberikan keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada air selama selama badai. Angin yang bertiup menyebabkan terjadinya tegangan geser pada permukaan air laut, sehingga mengakibatkan kenaikan atau penurunan muka air laut.

Kenaikan elevasi muka air karena badai dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\dots\dots\dots (2.57)$$

$$\dots\dots\dots (2.58)$$

dengan, Δh = kenaikan elevasi muka air karena badai (m)

F = panjang fetch (m)

i = kemiringan muka air

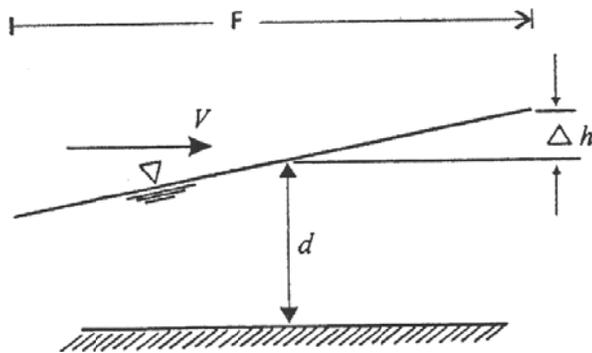
c = konstanta ($3,5 \times 10^{-6}$)

v = kecepatan angin (m/d)

d = kedalaman air (m)

g = percepatan gravitasi (m/d^2)

Di dalam memperhitungkan *wind set up* di daerah pantai dianggap bahwa laut dibatasi oleh sisi (pantai) yang *impermeable*, dan hitungan dilakukan untuk kondisi dalam arah tegak lurus pantai.



Gambar 2.9 Muka air laut karena badai (Triatmodjo, 1999)

2.4.3 Pasang Surut

Pasang surut adalah fluktuasi muka air laut karena adanya gaya tarik benda-benda di langit, terutama matahari dan bulan terhadap massa air laut di bumi. Elevasi muka air tertinggi (pasang) dan muka air terendah (surut) sangat penting untuk perencanaan bangunan pantai.

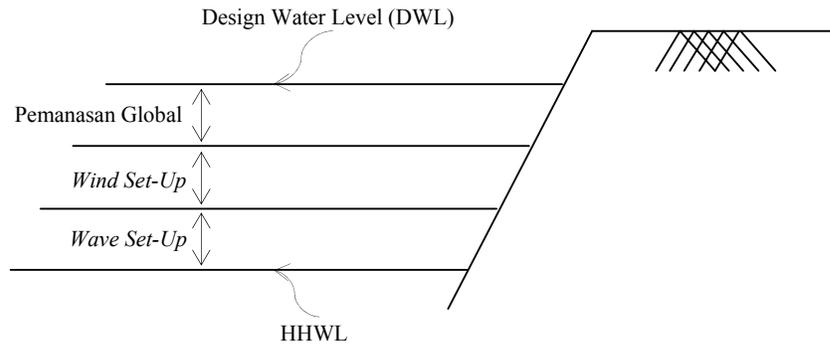
Data pasang surut didapatkan dari pengukuran selama minimal 15 hari. Dari data tersebut dibuat grafik pasang surut sehingga didapatkan *HHWL*, *MHWL*, *MSL*, *MLWL*, *LLWL*. Dalam pengamatan selama 15 hari tersebut, telah tercakup satu siklus pasang surut yang meliputi pasang surut purnama dan perbani. Saat akan terjadi pasang surut purnama akan terjadi pasang surut paling besar dibanding hari lainnya. Sedangkan saat pasang surut perbani akan terjadi tinggi pasang surut paling kecil dibandingkan hari lainnya.

Beberapa definisi elevasi muka air laut, yaitu :

1. *Mean High Water Level* (muka air tinggi rerata) adalah rerata dari muka air tinggi.
2. *Mean Low Water Level* (muka air rendah rerata) adalah rerata dari muka air rendah.
3. *Mean Sea Level* (muka air laut rerata) adalah muka air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata.
4. *Highest High Water Level* (muka air tinggi tertinggi) adalah air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.
5. *Lowest Low Water Level* (muka air rendah terendah) adalah air terendah pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.

2.4.4 *Design Water Level (DWL)*

Design water level (DWL) merupakan parameter sangat penting di dalam perencanaan bangunan pantai. Elevasi tersebut merupakan penjumlahan dari beberapa parameter yang dijelaskan di depan, yaitu pasang surut, tsunami, *wave set up*, dan kenaikan muka air karena perubahan suhu global. Untuk tsunami tidak digunakan karena kemungkinan terjadinya sangat kecil. Gambar 2.10 menunjukkan contoh penentuan *Design Water Level (DWL)* tanpa tsunami.



Gambar 2.10 Elevasi muka air laut rencana tanpa tsunami (Triatmodjo, 1999)

2.5 Angin

Angin yang berhembus di atas permukaan air laut akan memindahkan energinya ke air. Kecepatan angin menimbulkan tegangan pada permukaan air laut, sehingga permukaan air yang awalnya tenang akan terganggu dan timbul riak gelombang kecil di atas permukaan air. Apabila kecepatan angin bertambah, riak tersebut menjadi semakin besar dan apabila angin berhembus terus akhirnya akan terbentuk gelombang.

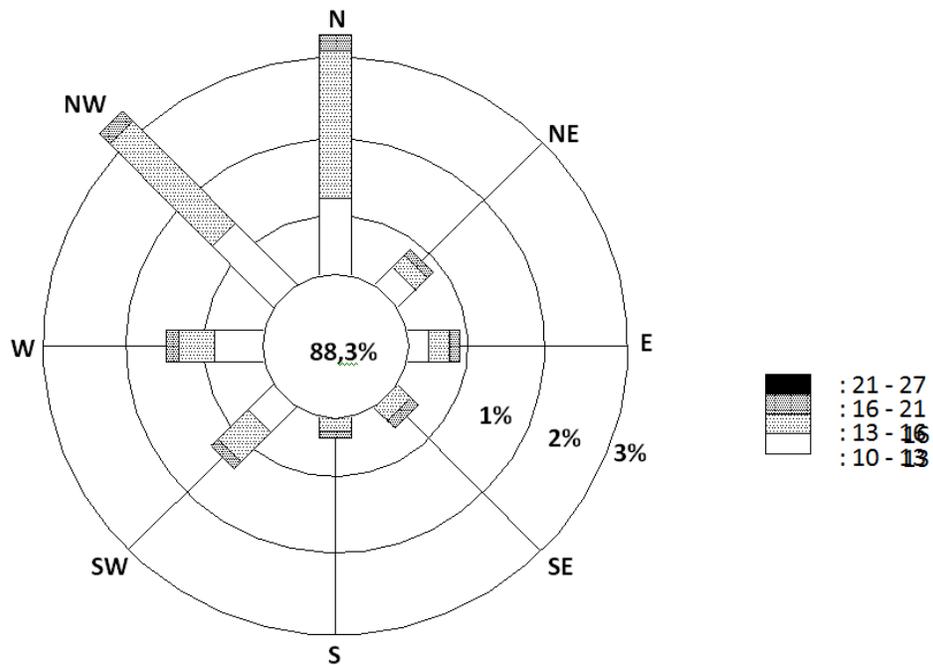
Tinggi dan periode gelombang yang dibangkitkan dipengaruhi oleh kecepatan angin (U), lama hembus angin (D), arah angin *Fetch* (F). *Fetch* adalah daerah dimana kecepatan angin adalah konstan. Arah angin masih bisa dianggap konstan apabila perubahan-perubahannya tidak lebih dari 15° . Sedangkan kecepatan angin masih dianggap konstan jika perubahannya tidak lebih dari 15 knot (2,5 m/det) terhadap kecepatan rerata.

2.5.1 Data Angin

Data angin yang digunakan untuk peramalan gelombang adalah data di permukaan laut pada lokasi pembangkitan. Data tersebut dapat diperoleh dari pengukuran langsung di atas permukaan laut (menggunakan kapal yang sedang berlayar) atau pengukuran di darat (di lapangan terbang) di dekat lokasi peramalan yang kemudian dikonversi menjadi data angin laut. Kecepatan angin diukur dengan *anemometer* dan biasanya dinyatakan dalam knot. Satu knot adalah panjang satu menit garis bujur melalui khatulistiwa yang ditempuh dalam satu jam atau $1 \text{ knot} = 1,852 \text{ km/jam} = 0,514 \text{ m/dt}$. Data angin dicatat tiap jam dan biasanya disajikan dalam bentuk tabel. Dengan pencatatan angin jam-jaman tersebut dapat

diketahui angin-angin dengan kecepatan tertentu dan durasinya, kecepatan angin maksimum, arah angin dan dapat pula dapat pula dihitung kecepatan angin rerata harian.

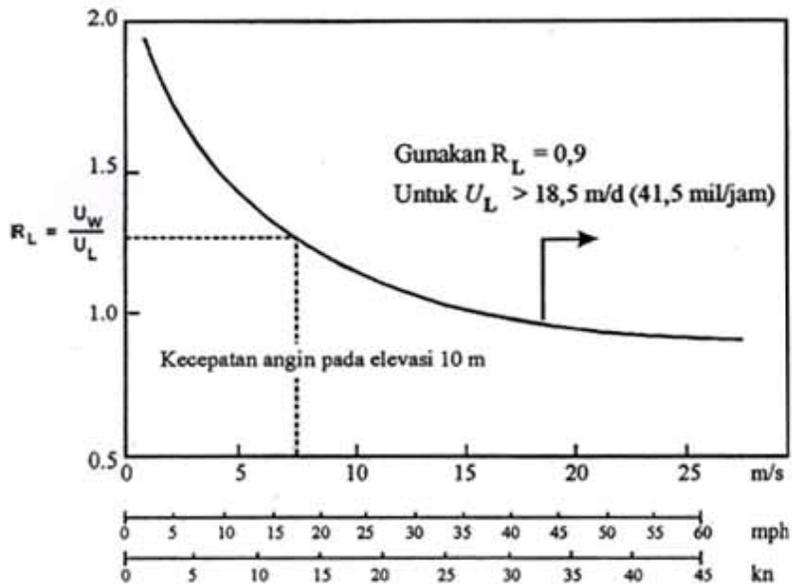
Data angin yang diperlukan merupakan hasil pengamatan beberapa tahun yang disajikan dalam bentuk tabel dengan jumlah data yang sangat besar kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk tabel (ringkasan) atau diagram yang disebut mawar angin (*windrose*).



Gambar 2.11 Contoh mawar angin (*windrose*)

2.5.2 Konversi Kecepatan Angin

Biasanya pengukuran angin dilakukan di daratan, padahal rumus-rumus pembangkitan gelombang data angin yang digunakan adalah yang ada di atas permukaan laut. Oleh karena itu diperlukan transformasi dari data angin di lokasi stasiun angin ke data angin di atas permukaan laut. Hubungan antara angin di atas laut dan angin di atas daratan terdekat diberikan oleh $P_L=U_w/U_L$, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Grafik hubungan antara kecepatan angin di laut dan di darat.
(Resio dan Vincent, 1977 dalam CERC, 1984)

Rumus-rumus dan grafik pembangkitan gelombang mengandung variabel U_A yaitu *wind-stress factor* (faktor tegangan angin) yang dapat dihitung dari kecepatan angin. Kecepatan angin dikonversi pada faktor tegangan angin dengan menggunakan rumus berikut :

$$U_A = 0,71 (U)^{1,23} \dots\dots\dots (2.59)$$

dimana, U = kecepatan angin (m/det)

2.5.3 Fetch

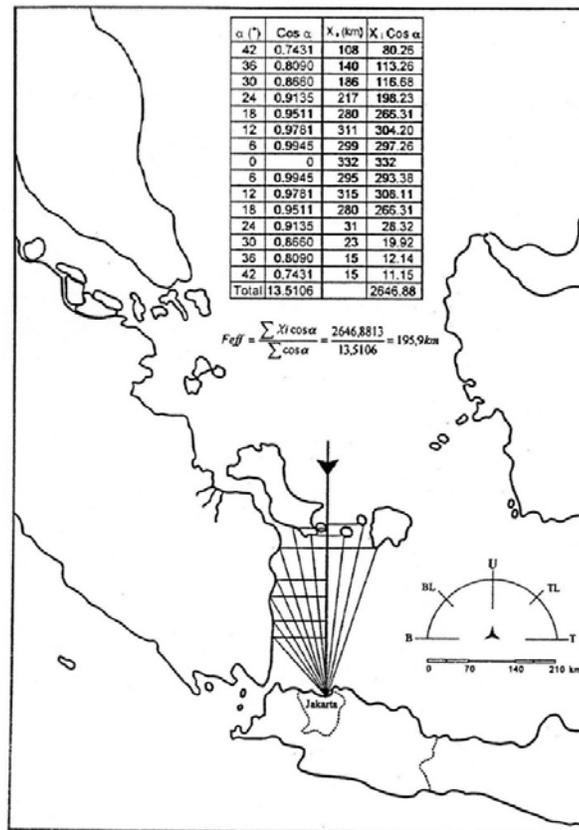
Dalam tinjauan pembangkitan gelombang di laut, *fetch* dibatasi oleh bentuk daratan yang mengelilingi laut. Gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin, tetapi juga dalam berbagai sudut terhadap arah angin. *Fetch* rerata efektif diberikan oleh persamaan berikut :

$$F_{eff} = \frac{\sum x_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} \dots\dots\dots (2.60)$$

dengan, F_{eff} = *fetch* rerata efektif (km)

X_i = panjang segmen *fetch* yang diukur dari titik observasi gelombang ke ujung akhir *fetch* (km)

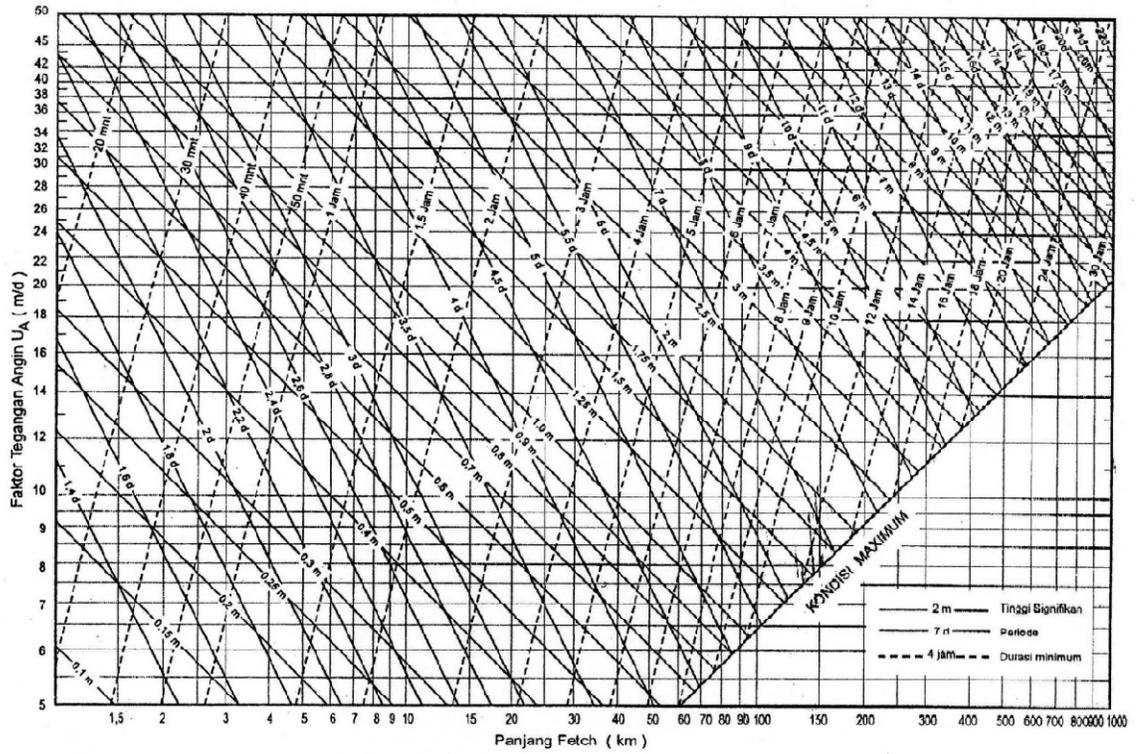
α = deviasi pada kedua sisi dari arah angin, dengan menggunakan pertambahan sudut 6° sampai 42° pada kedua sisi dari angin darat ($^\circ$).



Gambar 2.13 Fetch (Triatmodjo, 1999)

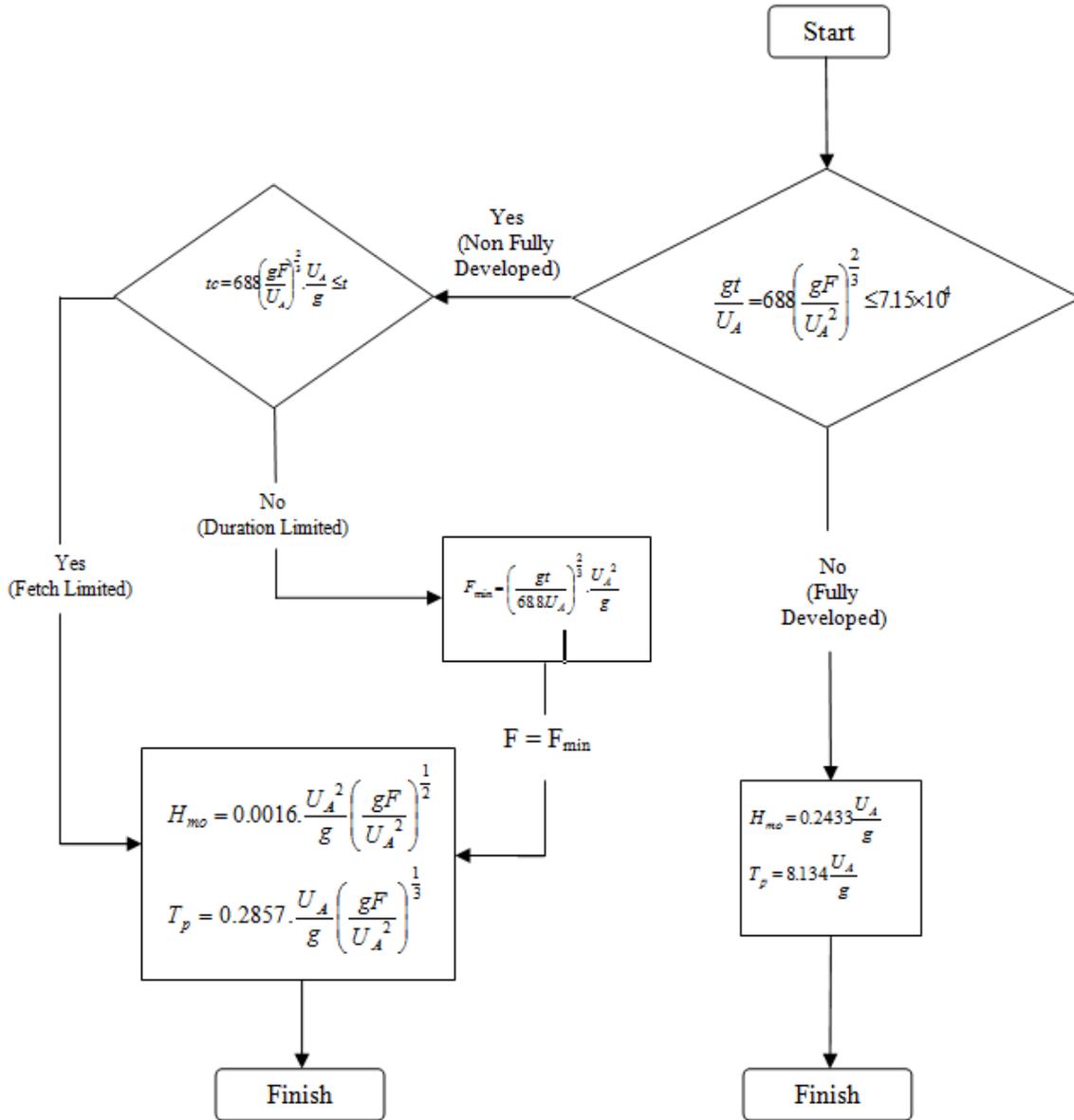
2.5.4 Peramalan Gelombang

Peramalan gelombang laut dalam dengan menggunakan grafik peramalan gelombang berdasarkan *wind-stress factor* dan panjang *fetch*. Dari grafik peramalan gelombang tinggi, durasi dan periode gelombang dapat diketahui. Gambar 2.14 menunjukkan Grafik peramalan gelombang.



Gambar 2.14 Grafik peramalan gelombang (CERC,1984)

Selain dengan menggunakan grafik, peramalan gelombang juga dapat dilakukan dengan cara matematis. Berikut ini merupakan *flowchart* langkah-langkah perhitungan peramalan tinggi gelombang secara matematis:



Gambar 2.15 Flow chart dan rumus peramalan gelombang (CERC, 1984)

Dimana :

H_{mo} = *Wave Height* (tinggi gelombang signifikan) adalah tinggi rerata dari 33% nilai tertinggi gelombang yang terjadi (meter)

T_{mo} = *Wave Period* (Periode Gelombang) dalam detik

F_{eff} = *Efective fetch length* (panjang *fetch* efektif) dalam Km

U_a = *Wind Stres Factor (Modified Wind Speed)* faktor tegangan angin (m/s)

g = Gravitasi (m/s²)

t = Waktu (detik)

2.6 Sedimentasi Pantai

Sedimen pantai biasanya berasal dari erosi garis pantai itu sendiri, dari daratan yang dibawa oleh sungai dan dari laut dalam yang terbawa arus ke daerah pantai. Transpor sedimen pantai adalah gerakan sedimen di daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus yang dibangkitkannya. Transpor sedimen sepanjang pantai banyak menyebabkan permasalahan seperti pendangkalan di pelabuhan, erosi pantai dan sebagainya.

Estimasi transpor menyusur pantai sulit dilakukan. Sulitnya estimasi transpor sedimen ini disebabkan selain rumus transpor sedimen yang akurasinya belum memadai, juga disebabkan karena sulitnya data yang valid atau memadai untuk keperluan tersebut. Data gelombang yang diperlukan untuk perhitungan sedimen minimum adalah satu tahun penuh, sehingga tercakup baik musim gelombang barat maupun musim gelombang timur termasuk ke dua musim peralihannya.

Rumus yang digunakan untuk menaksir jumlah angkutan sedimen menyusur pantai dalam program *GENESIS* yaitu :

$$S = (H^2 C_g)_b \left(a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_b \dots\dots\dots (2.61)$$

$$a_1 = \frac{K_1}{16(S-1)(1-p)(1,416)^{5/2}} \dots\dots\dots (2.62)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8(S-1)(1-p) \tan \beta (1,416)^{7/2}} \dots\dots\dots (2.63)$$

Keterangan :

S = jumlah angkutan pasir (m³/tahun)

H = tinggi gelombang signifikan di laut dalam, H_s (m)

C_g = kecepatan rambat gelombang di laut dalam (m/detik)

- θ_{bs} = sudut datang gelombang pecah ($^{\circ}$)
 b = koefisien refraksi di sisi luar *breaker zone*.
 K_1 = koefisien empiris (Komar dan Inman, 1970) ($K_1=0,77$)
 $K_2 = 0,5K_1-K_1$
 $S = p_s/p$
 p_s = berat jenis pasir (diambil $2,65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ untuk pasir kwarsa)
 p = porositas pasir (diambil 0,4)
 ρ = berat jenis air ($1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ untuk air laut)
 $\tan \beta$ = slope rata-rata dari *shoreline* sampai kedalaman aktif dari *longshore sand transport*

Transpor sedimen menyusur pantai ini sangat penting untuk keperluan :

1. Perhitungan kapasitas pompa pada kegiatan *sand by passing*.
2. Analisis pengaruh terhadap perubahan garis pantai bilamana dibuat proyek reklamasi.

Pada pantai yang mempunyai transpor sedimen menyusur pantai sangat besar, bila diganggu oleh bangunan pantai seperti reklamasi, *jetty*, pemecah gelombang, atau bangunan lainnya yang memotong daerah *surfzone* akan menyebabkan pengendapan di bagian *updrift* dan erosi yang serius di bagian *downdrift*. Oleh karena itu pada pantai yang mempunyai transpor sedimen cukup besar diusahakan tidak perlu diganggu.

2.6.1 Ukuran Partikel Sedimen

Berdasarkan ukuran butirannya sedimen pantai diklasifikasikan menjadi lempung, lumpur, pasir, kerikil, koral (*pebble*), *cobble*, dan batu (*boulder*). Tabel 2.4 menunjukkan klasifikasi menurut Wentworth yang banyak digunakan dalam bidang teknik pantai (CERC, 1984). Berdasarkan klasifikasi tersebut pasir mempunyai diameter antara 0,063 dan 2,0 mm yang selanjutnya dibedakan menjadi lima kelas. Material sangat halus seperti lumpur dan lempung berdiameter di bawah 0,063 mm yang merupakan sedimen kohesif.

Distribusi ukuran butiran biasanya dianalisis dengan saringan dan dipresentasikan dalam bentuk kurva persentase berat kumulatif seperti diberikan dalam Gambar 2.16. Pada umumnya distribusi ukuran butiran pasir mendekati distribusi log normal, sehingga sering digunakan pula skala satuan phi, yang didefinisikan sebagai :

$$\varphi = -\log 2D$$

dengan D adalah diameter butir dalam milimeter.

Ukuran butiran median D_{50} adalah paling banyak digunakan untuk ukuran butiran pasir. Berdasarkan distribusi log normal tersebut, ukuran butir rerata D_m dan standar deviasi σ_D dapat dihitung dengan cara berikut :

Tabel 2.4 Klasifikasi ukuran butir dan sedimen

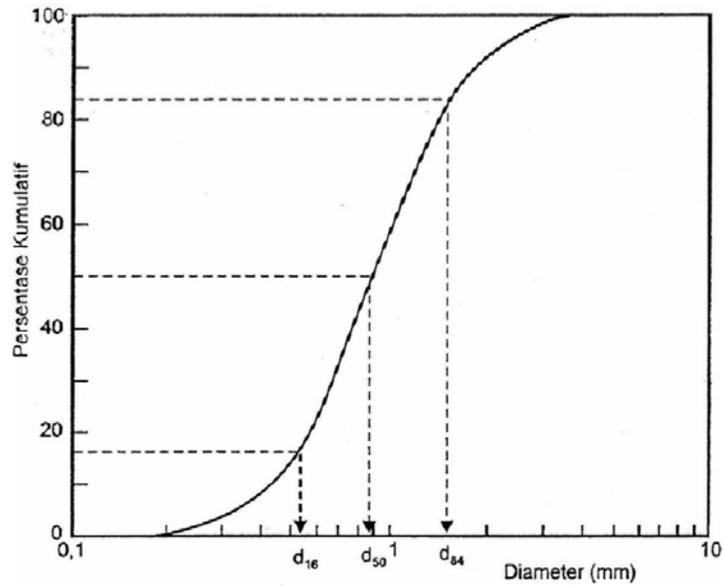
Klasifikasi		Diameter Partikel	
		mm	Satuan phi
Batu		256	-8
Cobble		128	-7
Koral (Pebble)	Besar	64	-6
	Sedang	32	-5
	Kecil	16	-4
	Sangat kecil	8	-3
Kerikil		4	-2
Pasir	Sangat kasar	2	-1
	Kasar	1	0
	Sedang	0,5	1
	Halus	0,25	2
	Sangat Halus	0,125	3
Lumpur	Sangat Halus	0,063	4
	Kasar	0,031	5
	Sedang	0,015	6
	Halus	0,0075	7
Lempung	Sangat Halus	0,0037	8
	Kasar	0,0018	9
	Sedang	0,0009	10
	Halus	0,0005	11
	Sangat Halus	0,0003	12

(dalam Triatmodjo, 1999)

$$\text{-----} \dots\dots\dots (2.64)$$

$$\text{-----} \dots\dots\dots (2.65)$$

Dengan notasi D_p adalah ukuran dimana $p\%$ dari berat sampel adalah lebih halus dari diameter butir tersebut. Untuk mengukur derajat penyebaran ukuran butir terhadap nilai rerata sering digunakan koefisien S_0 yang didefinisikan sebagai :



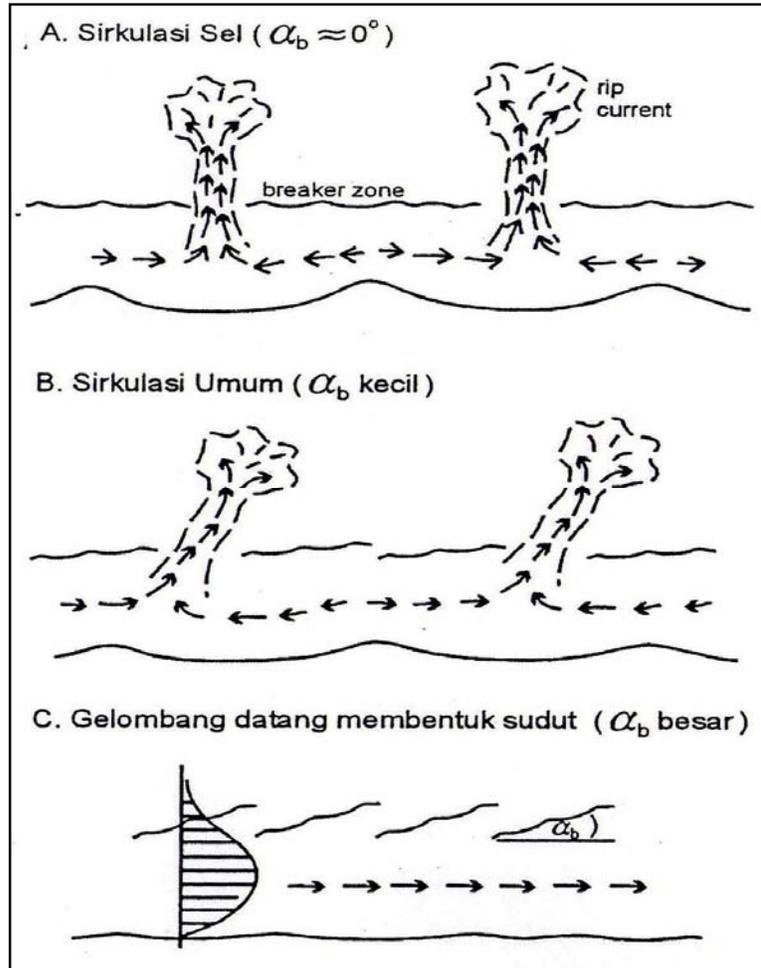
Gambar 2.16 Distribusi ukuran butir (dalam Triatmodjo, 1999)

Apabila $1,0 \leq S_{10} \leq 1,5$ ukuran butir seragam untuk $1,5 \leq S_{10} \leq 2,0$ penyebaran ukuran butir pasir sedang, sedang jika $2,0 \leq S_{10}$ gradasi pasir sangat bervariasi.

2.6.2 Pemodelan Arus di Dekat Pantai dengan Program *Surface Water Modeling System (SMS)*

Longshore current (arus sepanjang pantai) ditimbulkan oleh gelombang yang pecah dengan membentuk sudut terhadap garis pantai. Arus ini terjadi di daerah antara gelombang pecah dan garis pantai. Parameter terpenting dalam menentukan kecepatan arus sepanjang pantai adalah tinggi dan sudut datang gelombang pecah.

Apabila garis puncak gelombang sejajar dengan garis pantai, maka akan terjadi arus dominan di pantai berupa sirkulasi sel dengan *rip current* yang menuju laut (Gambar 2.17.a). Kejadian ekstrim lainnya terjadi apabila gelombang pecah dengan membentuk sudut terhadap garis pantai ($\alpha_b > 15^\circ$), yang akan menimbulkan arus sejajar pantai di sepanjang pantai (Gambar 2.17.c). Sedang yang biasanya terjadi adalah kombinasi dari kedua kondisi tersebut (Gambar 2.17.b.).



Gambar 2.17 Arus didekat pantai

Arus sepanjang pantai yang ditimbulkan oleh gelombang pecah dengan membentuk sudut terhadap garis pantai seperti yang terlihat pada Gambar 2.17.c, dibangkitkan oleh momentum yang dibawa oleh gelombang. Longuet-Higgins (dalam Triatmodjo,1999) menurunkan rumus untuk menghitung arus sepanjang pantai berikut ini :

$$V = 1,17(g \cdot H_b)^{1/2} \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \dots\dots\dots(2.66)$$

Dimana :

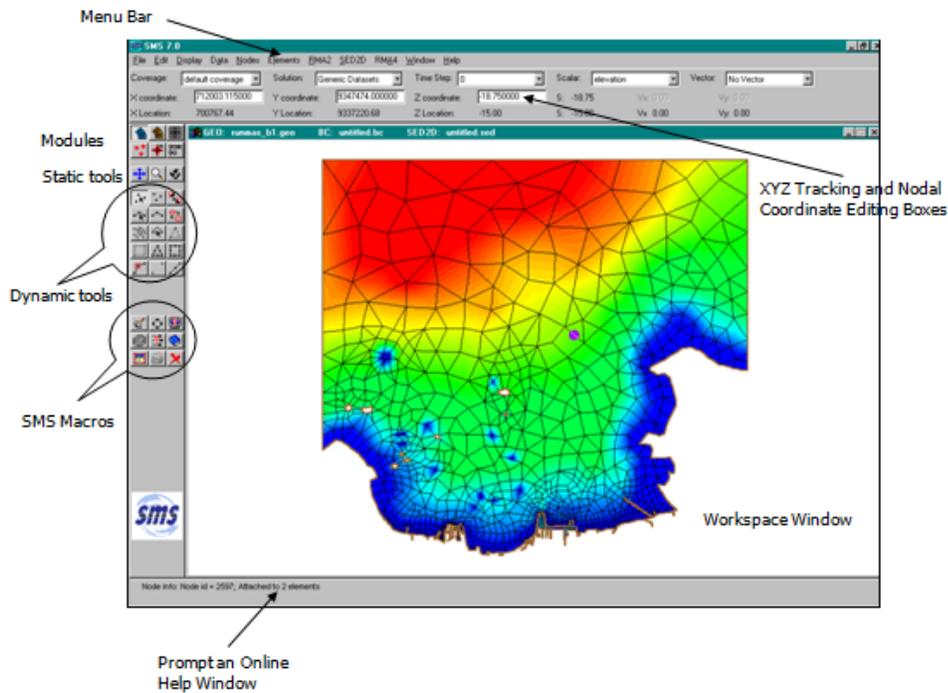
- V = kecepatan arus sepanjang pantai (m/dtk)
- g = percepatan gravitasi (m/dtk²)
- H_b = tinggi gelombang pecah (m)
- α_b = sudut datang gelombang pecah (°)

Distribusi kecepatan arus sepanjang pantai mempunyai bentuk seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.17.c. Di garis pantai kecepatan adalah nol, kemudian bertambah dengan jarak dari garis pantai, mencapai maksimum di sekitar titik tengah *surf zone* dan berkurang dengan cepat di luar daerah gelombang pecah.

Pemodelan arus laut di sekitar pantai disimulasikan dengan menggunakan program *Surface Water Modeling System (SMS)*. *SMS* merupakan *software* yang dirancang untuk mensimulasikan kondisi oceanografi yang terjadi di alam ke dalam sebuah model 2 dimensi dengan *finite element method* (metode elemen hingga).

Tampilan layar program *SMS* mempunyai beberapa bagian yaitu sebagai berikut :

1. Baris menu di bagian atas layar untuk mengakses perintah *SMS*.
2. Jendela grafis utama di bagian tengah layar untuk menayangkan jaringan yang sedang digunakan, dan dibagian atas jendela ini ditunjukkan judul jaringan yang sedang diedit.
3. Palet piranti terletak di bagian kiri layar terdiri dari *Modules*, *Static Tools*, *Dynamic Tool*, dan *Macros* dan digunakan untuk mengedit jaringan.
4. Makro *SMS* terletak di bagian kiri layar di bawah kelompok palet piranti untuk memberi akses langsung pada beberapa menu perintah.
5. Jendela informasi jaringan terletak di bagian atas layar menunjukkan identitas dan titik atau elemen serta posisi XYZ kursor bila berada di atas jendela utama. Jendela XYZ dapat pula digunakan untuk mengedit titik-titik yang dipilih.
6. Jendela penjelasan *on-line* terletak di bawah jendela informasi jaringan dan menayangkan pesan singkat dan peringatan-peringatan tertentu.
7. Tombol kendali (menu *display*) digunakan untuk menghidup-matikan jendela pelengkap.



Gambar 2.18 Tampilan utama program SMS

Pemodelan dalam program SMS ada beberapa macam, salah satunya adalah pemodelan yang digunakan untuk menampilkan simulasi pergerakan arus yang terjadi dengan menggunakan modul ADCIRC.

Untuk menjalankan model ADCIRC membutuhkan data berupa :

1. Peta *Bathimetri*

Kegunaan peta *bathimetri* ini adalah untuk mendapatkan posisi garis pantai dan kedalaman dasar laut di sekitar pantai yang ditinjau.

2. Data Pasang Surut

Data pasang surut yang digunakan berupa komponen-komponen pasang surut yang sudah disediakan di dalam program SMS itu sendiri.

2.7 Perubahan Garis Pantai

Garis pantai merupakan garis batasan pertemuan antara daratan dan air laut dimana posisinya tidak tetap dan dapat berpindah-pindah sesuai dengan kondisi pasang air laut dan abrasi atau akresi pantai yang terjadi.

Pada umumnya perubahan garis pantai yang terjadi adalah perubahan maju (akresi) dan perubahan mundur (abrasi). Garis pantai dikatakan mengalami akresi bila ada petunjuk mengenai adanya pengendapan atau deposisi secara kontinyu. Sedangkan garis pantai dikatakan mundur jika proses abrasi masih berlangsung (Triatmodjo,1999).

2.7.1 Prediksi Perubahan Garis Pantai Menggunakan Program GENESIS

Prediksi perubahan garis pantai tanpa dan dengan bangunan pelindung pantai dimaksudkan untuk mengetahui / memprediksi perubahan garis pantai selama beberapa tahun ke depan dengan perlakuan tanpa dan dengan bangunan pelindung pantai serta mengetahui jenis bangunan pelindung pantai apa yang efektif dalam penanganan masalah abrasi. Prediksi ini dilakukan dengan menggunakan program GENESIS. (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) dari *US Army Corps of Engineers (ASCE)* .

Program GENESIS merupakan program perubahan garis pantai *one line shoreline change model* (model perubahan garis pantai satu garis). Garis pantai yang digunakan yaitu garis pantai kontur ± 0 kondisi *Mean Sea Level (MSL)*. GENESIS tidak mensimulasikan perubahan profil pantai karena hanya menganggap bentuk profil pantai tetap dan perubahan garis pantai bergerak maju mundur tergantung pada sedimen yang masuk atau keluar.

GENESIS mengasumsikan pantai sebagai *equilibrium beach profile shape* (bentuk profil pantai seimbang). Bentuk kontur pantai dianggap sama dengan dengan kontur garis pantai. Parameter yang digunakan dalam pengasumsian bentuk profil pantai yaitu ukuran sedimen rata-rata (d_{50}), periode dan tinggi gelombang signifikan. Dalam pembahasan program GENESIS berikut akan banyak menggunakan referensi dari buku GENESIS : *Technical References*, Hanson Hans. Untuk menentukan kemiringan profil pantai digunakan rumus :

$$\tan \beta = \left[\frac{A^3}{D_{LTo}} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.67)$$

Dimana,

β = kemiringan profil pantai ($^{\circ}$)

A = parameter skala empiris

D_{Lto} = kedalaman maksimum terjadinya *longshore transport* (m)

Parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai A tergantung dari ukuran butiran sedimen rata-rata (d_{50}), rumusnya sebagai berikut :

$$A = 0,41(d_{50})^{0,94}, d_{50} < 0,4$$

$$A = 0,23(d_{50})^{0,32}, 0,4 < d_{50} < 10,0$$

$$A = 0,23(d_{50})^{0,28}, 10,0 < d_{50} < 40,0$$

$$A = 0,46(d_{50})^{0,11}, 40,0 \leq d_{50}$$

Sedangkan nilai D_{LTo} tergantung dari tinggi dan periode gelombang signifikan, rumus yang digunakan sebagai berikut :

$$D_{LTo} = (2,3 - 10,9H_{33}) \left[\frac{H_{33}}{L_{33}} \right] \dots\dots\dots (2.68)$$

Dimana,

H_{33} = tinggi gelombang signifikan (m)

L_{33} = panjang gelombang signifikan (m)

Panjang gelombang (L_{33}) dicari dengan rumus :

$$L_{33} = \frac{gT_{33}^2}{2\pi} \dots\dots\dots (2.69)$$

Dimana,

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/dtk}^2$)

T_{33} = periode gelombang signifikan (dtk)

Asumsi lain yang digunakan dalam perhitungan program *GENESIS* yaitu menganggap bahwa :

1. Profil pantai memiliki bentuk yang konstan.
2. Diasumsikan perubahan garis pantai terjadi pada DC (*offshore closure depth*) dan DB (*Berm Crest Elevation*).
3. Area di antara DC dan DB dianggap sebagai area terjadinya perubahan garis pantai.
4. Transpor sedimen di sepanjang pantai disebabkan oleh gelombang pecah.
5. Detail struktur di sekitar *nearshore* dapat diabaikan.
6. Ada *long term trend* dalam evolusi garis pantai.

Sebelum memulai simulasi dengan *GENESIS* perlu dijelaskan kelebihan dan kelemahan dari program *GENESIS*, kelebihan program *GENESIS* diantaranya sebagai berikut :

1. Dapat meramalkan *long term trend* garis pantai akibat proses alami maupun yang diakibatkan manusia.
2. Panjang garis pantai yang disimulasikan antara 1-35 km dengan resolusi grid antara 15-90 m.
3. Periode simulasi antara 6 bulan – 20 tahun.
4. Interval data gelombang yang digunakan 30 menit – 6 jam.

selain kelebihanannya, program *GENESIS* juga mempunyai kelemahan, yaitu :

1. Hanya dapat digunakan untuk meramalkan perubahan garis pantai yang diakibatkan oleh *Coastal Structure*, dan perubahan akibat gelombang.
2. *GENESIS* tidak memperhitungkan adanya refleksi gelombang.
3. Tidak dapat menghitung perubahan akibat terjadinya badai.
4. Tidak mensimulasikan adanya *cusplate* dan tombolo pada *breakwater*.
5. Efek pasang surut terhadap perubahan garis pantai tidak dapat diperhitungkan.

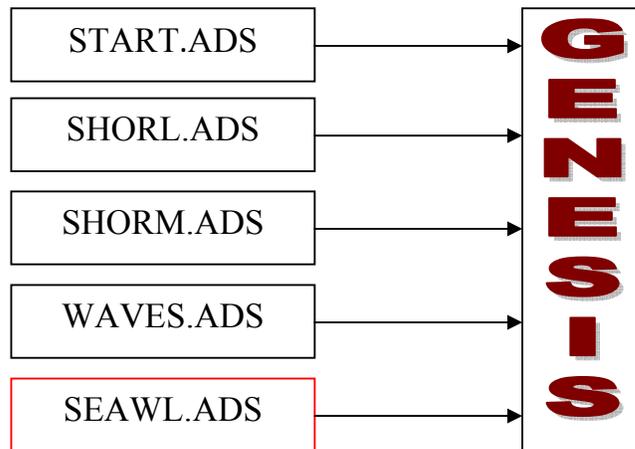
Proses kalkulasi pada program *GENESIS* dilakukan dengan memprediksi nilai *longshore transport* berdasarkan pada bentuk awal pantai. Sedangkan untuk peramalan garis pantai akan dilakukan kalkulasi dengan mempertimbangkan aspek-aspek *longshore transport* yang terjadi.

Longshore transport rate (Q) atau tingkat angkutan sedimen sejajar pantai lazim mempunyai satuan m³/tahun (dalam SI). Ada dua alternatif pergerakan sedimen sejajar pantai yang terjadi, yaitu ke arah kanan dan ke arah kiri relatif terhadap seorang pengamat yang berdiri di pantai menghadap ke laut. Pergerakan dari kanan ke kiri diberi notasi Q_{lt} dan pergerakan ke arah kanan diberi notasi Q_{rt}, sehingga didapatkan tingkat *gross sediment transport* (angkutan sedimen kotor) Q_g = Q_{lt} + Q_{rt} dan tingkat *net sediment transport* (angkutan sedimen bersih) Q_n = Q_{lt} – Q_{rt}. Nilai Q_g digunakan untuk meramalkan tingkat pendangkalan pada suatu alur pada perairan terbuka. Q_n digunakan untuk desain alur yang dilindungi dan perkiraan erosi pantai. Q_{lt} serta Q_{rt} untuk penumpukan sedimen di belakang sebuah struktur pantai yang menahan pergerakan sedimen. Dalam perhitungan program *GENESIS*, perhitungan *longshore transport* dilakukan dengan menggunakan persamaan hasil modifikasi dari persamaan berikut :

$$Q_{(+)} = \frac{1}{2} (Q_g + Q_n) \dots\dots\dots(2.70)$$

$$Q_{(+)} = \frac{1}{2} (Q_g + Q_n) \dots\dots\dots(2.71)$$

Skema file *input* dan *output* program *GENESIS* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Skema file *input* dan *output* program *GENESIS*

Untuk menjalankan program *GENESIS*, ada 4 jenis *file input* yang harus ada dalam bentuk dan jumlah data yang tepat seperti yang ditunjukkan pada gambar dengan border hitam (START.ads, SHORL.ads, SHORM.ads, WAVES.ads) di atas. Untuk file-file dengan border merah (SEAWL.ads) hanya dibutuhkan apabila ada bangunan pantai eksisting.

Penjelasan secara rinci isi file *input* dan *output* program *GENESIS* adalah sebagai berikut :

1. *File* START.ads berisi perintah-perintah yang mengontrol simulasi perubahan garis pantai pada program *GENESIS*. Beberapa data penting dalam file ini antara lain adalah data tanggal awal simulasi dilaksanakan, data tanggal simulasi akhir, nilai K1 dan K2 (koefisien kalibrasi *transport sediment*), diameter *grain size* efektif (d_{50}) dan posisi bangunan pelindung pantai eksisting dan rencana.
2. *File* SHORL.ads berisi ordinat dari grid garis pantai awal. Cara mendapatkan ordinat ini adalah dengan bantuan program *AutoCAD*, kemudian membuat grid dengan jarak tertentu pada daerah yang ditinjau. Cara penulisannya yaitu diurut dari kiri ke kanan dan setiap baris berisi 10 ordinat.
3. *File* SHORM.ads berisi ordinat grid garis pantai. *File* ini digunakan sebagai pembanding ordinat garis pantai hasil simulasi yang terdapat pada *file*

SHORC.ads. Cara penulisannya yaitu dari kiri ke kanan dan setiap baris berisi 10 ordinat.

4. *File WAVES.ads* terdiri dari data gelombang tiap jam selama satu tahun. Memasukkan data gelombang yang berupa tinggi gelombang, periode dan arah rambat gelombang.
5. *File SEAWL.ads* terdiri dari lokasi lokasi *seawall* yang dimodelkan. Jika tidak ada *seawall* pada *file* START, maka SEAWL tidak dibaca. Jadi, menggunakan *file* SEAWL ini apabila ada bangunan pantai *eksisting* yang akan dianalisa.
6. *File SETUP.ads* merupakan output yang berisi koordinat perubahan garis pantai dan jumlah angkutan sedimen yang terjadi, yang dalam proses *running* akan memberikan peringatan (*warning messages*) jika ada kesalahan selama simulasi.
7. *File OUTPT.ads* terdiri dari hasil umum simulasi, diantaranya grafik *Net Transport Rate*, *Shoreline Change* dan *Shoreline Positions*.
8. *File SHORC.ads* merupakan *output* berupa koordinat posisi garis pantai dalam jangka waktu tertentu yang telah ditetapkan sebelumnya.

2.8 Bangunan Pelindung Pantai

Bangunan pantai digunakan untuk melindungi pantai terhadap kerusakan karena serangan gelombang dan arus. Ada beberapa cara dapat dilakukan untuk melindungi pantai (Triatmodjo,1999), yaitu :

- a. Memperkuat / melindungi pantai agar mampu menahan serangan gelombang
- b. Mengubah laju transport sedimen sepanjang pantai.
- c. Mengurangi energi gelombang yang sampai ke pantai.
- d. Reklamasi dengan menambah suplai sedimen ke pantai atau dengan cara lain.

Sesuai dengan fungsinya seperti tersebut di atas, bangunan pelindung pantai dapat diklasifikasikan dalam tiga kelompok, yaitu:

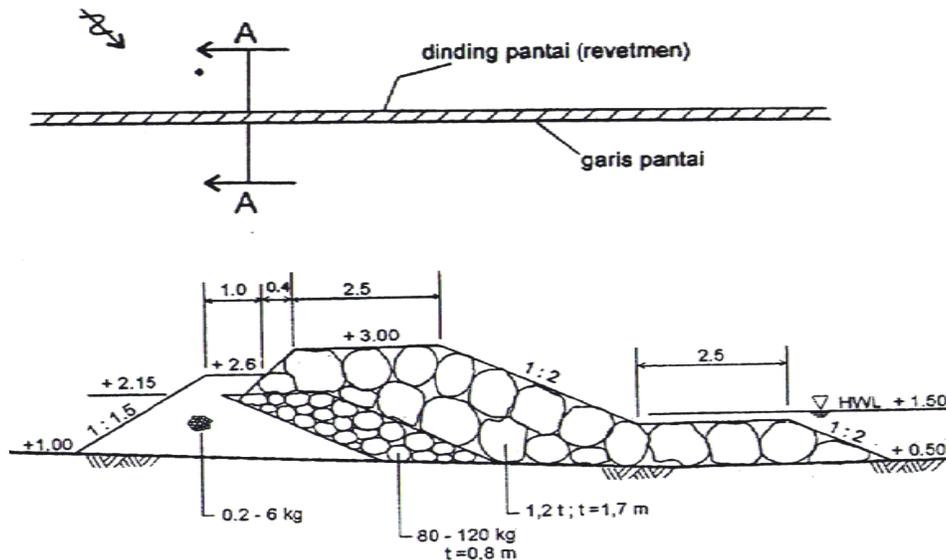
- a. Konstruksi yang dibangun di pantai dan sejajar dengan garis pantai.
- b. Konstruksi yang dibangun kira-kira tegak lurus pantai dan sambung ke pantai.
- c. Konstruksi yang dibangun di lepas pantai dan kira-kira sejajar dengan garis pantai.

2.8.1 Dinding Pantai / *Revetment*

Dinding pantai / *Revetment* adalah bangunan yang memisahkan daratan dan perairan pantai, yang berfungsi sebagai pelindung pantai terhadap erosi dan limpasan gelombang (*overtopping*) ke darat. Daerah yang dilindungi adalah daratan tepat di belakang bangunan. Permukaan bangunan yang menghadap arah datangnya gelombang dapat berupa sisi vertikal atau miring. Dinding pantai biasanya berbentuk dinding vertikal sedangkan *revetment* mempunyai sisi miring.

Bangunan ini ditempatkan sejajar atau hampir sejajar dengan garis pantai dan bisa terbuat dari pasangan batu, beton, tumpukan pipa (buis) beton, turap, kayu atau tumpukan batu.

Dalam perencanaan dinding pantai atau *revetment* perlu ditinjau fungsi dan bentuk bangunan, lokasi, panjang, tinggi, stabilitas bangunan dan tanah pondasi, elevasi muka air baik di depan maupun di belakang bangunan, ketersediaan bahan bangunan. Selain itu perlu juga diperhatikan kemungkinan terjadinya erosi di kaki bangunan. Kedalaman erosi yang terjadi tergantung pada bentuk sisi bangunan, kondisi gelombang dan sifat tanah dasar (Triatmodjo,1999).



Gambar 2.20 *Revetment* sebagai pelindung erosi pantai (Triatmodjo,1999)

Tabel 2.5 Penjelasan tentang susunan dan manfaat *Revetment* pada Gambar 2.21

Indek	Susunan dinding pantai	Manfaat atau kegunaan
a.	Blok beton atau pasangan batu	Untuk melindungi bangunan yang berada sangat dekat dengan garis pantai.
b.	Pondasi tiang dilengkapi dengan turap baja	Untuk mencegah erosi tanah pondasi oleh serangan gelombang dan <i>piping</i> oleh aliran air tanah.
c.	Sisi tegak dari turap baja, kayu atau bambu	Sebagai dermaga untuk merapat / bertambatnya perahu-perahu / kapal kecil pada saat laut tenang. Selain itu untuk menahan tekanan tanah dibelakangnya, turap tersebut diperkuat dengan angker.
d.	Tumpukan bronjong	Bisa menyerap energi gelombang, sehingga elevasi puncak bangunan bisa rendah (<i>run-up</i> kecil).
e -f	Tumpukan batu pecah yang dibuat dalam beberapa lapis. Lapis terluar merupakan lapis pelindung terbuat dari batu ukuran besar sedangkan lapisan di bawahnya terdiri dari tumpukan batu dengan ukuran lebih kecil	Untuk menahan serangan gelombang dan dapat mengikuti penurunan atau konsolidasi tanah dasar.
g-h	Tumpukan pipa (buis) beton	Untuk pelindung pantai hanya dilakukan pada perairan yang relatif dangkal dan tanah dasar dan tanah dasar perairan relatif keras.

(Hamdani,2008)

Antara daratan yang dilindungi (perumahan penduduk) dan *revetment* tersebut diberi ruang antara (*buffer zone*) selebar ± 15 m. *Buffer zone* ini mempunyai fungsi sebagai berikut (Triatmodjo,1999) :

- a. Untuk memberi jarak antara pemukiman dan bangunan sehingga apabila terjadi limpasan air (air pasang bersamaan dengan gelombang besar) tidak langsung mengenai pemukiman penduduk.
- b. Sebagai jalan inspeksi selama perawatan bangunan.
- c. Untuk menghilangkan kesan kumuh terhadap daerah yang dilindungi

Ada dua kelompok *revetment*, yaitu *permeable* dan *impermeable* (Hamdani,2008).

a. *Permeable Revetment*

1. *Open filter material (rip rap)*

Yaitu *revetment* yang terbuat dari batu alam atau batu buatan yang dilapisi *filter* pada bagian dasar bangunan.

2. *Stone pitching*

Yaitu *revetment* yang terbuat dari batu alam saja dengan lapisan *filter* pada bagian dasar bangunan.

3. *Concrete block revetment*

Yaitu *revetment* yang terbuat dari blok beton dengan ukuran tertentu dan lapisan *filter* pada bagian dasar bangunan.

b. *Impermeable Revetment*

1. *Asphalt revetment*

Yaitu *revetment* yang bahannya dari aspal pada tebing yang dilindungi.

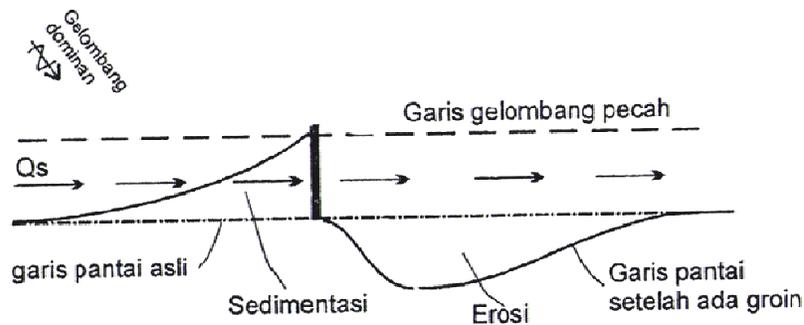
2. *Bitumen grouted stone*

Yaitu *revetment* yang terbuat dari blok beton yang diisi oleh aspal (spesi aspal).

2.8.2 Groin

Groin adalah bangunan pelindung pantai yang biasanya dibuat tegak lurus garis pantai, dan berfungsi untuk menahan transpor sedimen sepanjang pantai, sehingga bisa mengurangi atau menghentikan erosi yang terjadi. Bangunan ini juga bisa digunakan untuk menahan masuknya transpor sediment sepanjang pantai ke pelabuhan atau muara sungai.

Groin hanya bisa menahan transpor sedimen sepanjang pantai. Groin yang ditempatkan di pantai akan menahan gerak sedimen tersebut, sehingga sedimen mengendap di sisi sebelah hulu (terhadap arah transpor sedimen sepanjang pantai). Di sebelah hilir groin angkutan sedimen masih tetap terjadi, sementara suplai dari sebelah hulu terhalang oleh bangunan, akibatnya daerah di hilir groin mengalami defisit sedimen sehingga pantai mengalami erosi. Keadaan tersebut menyebabkan terjadinya perubahan garis pantai yang akan terus berlangsung sampai dicapai suatu keseimbangan baru. Keseimbangan baru tersebut tercapai pada saat sudut yang dibentuk oleh gelombang pecah terhadap garis pantai baru adalah nol ($\alpha_b = 0$), dimana tidak terjadi angkutan sedimen sepanjang pantai, (CERC,1984).



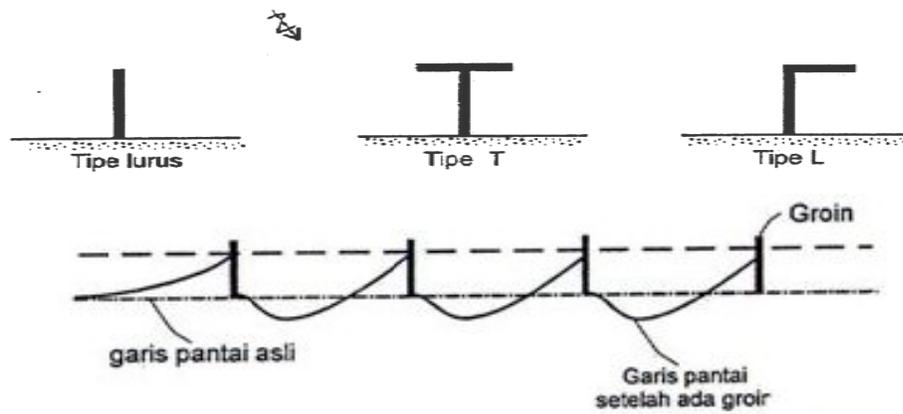
Gambar 2.22 Groin tunggal dan perubahan garis pantai yang diakibatkannya
(Triatmodjo,1999).

Perlindungan pantai dengan menggunakan satu buah groin tidak efektif. Biasanya perlindungan pantai dilakukan dengan membuat suatu seri bangunan yang terdiri atas beberapa groin yang ditempatkan dengan jarak tertentu. Dengan menggunakan satu sistem groin perubahan garis pantai yang terjadi tidak terlalu besar.

Mengingat transpor sedimen sepanjang pantai terjadi di *surf zone*, maka groin akan efektif menahan sedimen apabila bangunan tersebut menutup seluruh lebar *surf zone*, dengan kata lain panjang groin sama dengan lebar *surf zone*. Tetapi bangunan seperti itu dapat mengakibatkan suplai sedimen ke daerah hilir terhenti sehingga mengakibatkan erosi yang besar di daerah tersebut. Garis pantai disebelah hulu dan hilir bangunan berubah secara mendadak dengan perubahan yang sangat besar. Oleh karena itu sebaiknya masih dimungkinkan terjadinya suplai sedimen ke daerah hilir yaitu dengan membuat groin yang tidak terlalu panjang dan tinggi.

Kriteria perencanaan *groin*:

- Panjang *groin*, 40% - 60% dari lebar rerata *surfzone*.
- Jarak antara groin, 1 sampai 3 kali panjang *groin*.
- Tinggi groin, antara 50 cm – 60 cm di atas elevasi rencana.
- Elevasi puncak groin diambil dibawah *HWL*.

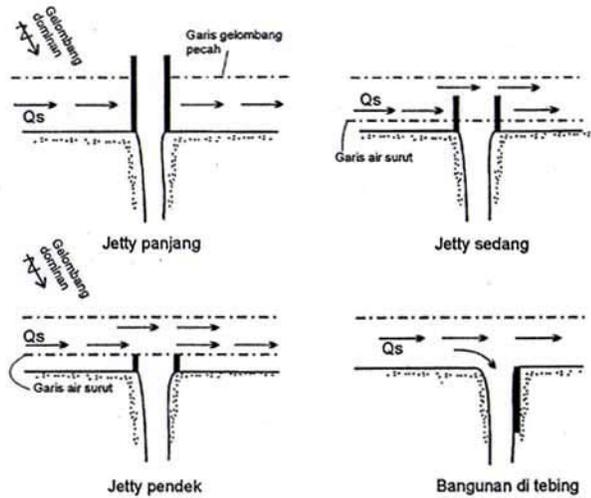


Gambar 2.23 Beberapa tipe groin dan perubahan garis pantai yang ditimbulkan
(Triatmodjo,1999)

2.8.3 Jetty

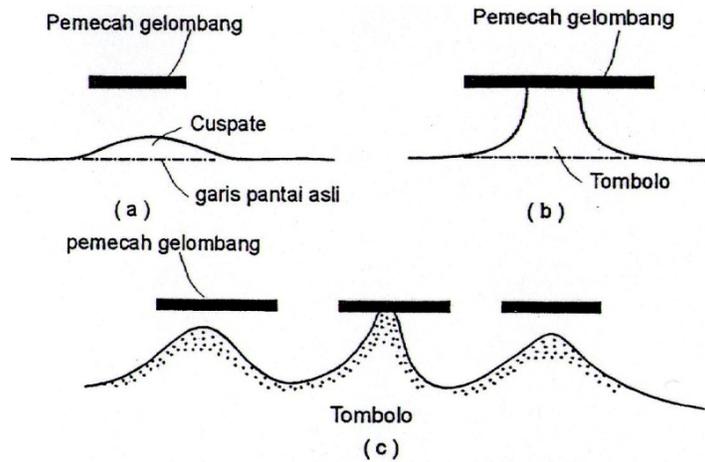
Jetty adalah bangunan tegak lurus pantai yang diletakkan pada kedua sisi muara sungai yang berfungsi untuk mengurangi pendangkalan alur oleh sedimen pantai. Selain untuk melindungi alur pelayaran, *jetty* juga dapat digunakan untuk mencegah pendangkalan di muara dalam kaitannya dengan pengendalian banjir. Berikut adalah jenis-jenis *jetty* dan karakteristiknya:

- Jetty* panjang, apabila ujungnya berada di luar gelombang pecah, tipe ini efektif untuk mencegah masuknya sedimen ke muara, tetapi biaya konstruksi sangat mahal, sehingga bila fungsinya hanya untuk penanggulangan banjir pemakaian *jetty* tersebut sangat tidak ekonomis, kecuali daerah yang harus dilindungi terhadap banjir sangatlah penting.
- Jetty* sedang, di mana ujungnya berada antara muka air surut dan gelombang pecah, dapat menahan sebagian transpor sedimen sepanjang pantai, alur di ujung *jetty* masih memungkinkan terjadinya endapan pasir.
- Jetty* pendek, di mana kaki ujung bangunan berada pada muka air surut, fungsi bangunan ini adalah menahan berbeloknya muara sungai dan mengkonsentrasikan aliran pada alur yang telah ditetapkan untuk bisa mengerosi endapan, sehingga pada awal musim penghujan (banjir) belum terjadi, muara sungai telah terbuka.



Gambar 2.24 Beberapa tipe *jetty* (Triatmodjo,1999)

2.8.4 Pemecah Gelombang / *Break Water*



Gambar 2.25 Pemecah gelombang lepas pantai (Triatmodjo, 1999)

Pemecah gelombang adalah bangunan yang digunakan untuk melindungi daerah perairan dari gangguan gelombang. Ada dua tipe yaitu pemecah gelombang sambung pantai untuk perlindungan perairan pelabuhan dan pemecah gelombang lepas pantai yang digunakan untuk perlindungan pantai terhadap erosi.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan pemecah gelombang adalah stabilitas batu lapis pelindung, dimensi, dan *run up* gelombang. Untuk pemecah gelombang sisi miring, berat butir pelindung dihitung dengan menggunakan rumus Hudson:

$$w = \frac{\gamma_r H^3}{K D (S_r - 1) 3 \cot \theta} \quad ; \quad S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_a} \dots\dots\dots (2.72)$$

Dimana :

- w : Berat butir batu pelindung (T)
- γ_r : Berat jenis batu (T/m³)
- γ_a : Berat jenis air laut (T/m³)
- H : Tinggi gelombang rencana (m)
- θ : Sudut kemiringan sisi pemecah gelombang (°)
- K_d : Koefisien Stabilitas, tergantung pada bentuk batu pelindung, kekasaran permukaan batu, ketajaman sisi-sisinya, ikatan antara butir dan keadaan pecahnya gelombang

Sedangkan dimensi pemecah gelombang meliputi :

a. Lebar puncak pemecah gelombang.

$$B = nk\Delta \left[\frac{w}{\lambda r} \right] \dots\dots\dots (2.73)$$

- Dimana : B = Lebar puncak (m).
- N = Jumlah butir batu (n minimum = 3).
- $k\Delta$ = Koefisien lapis.
- W = Berat butir batu pelindung (T).
- γ_r = Berat jenis batu pelindung (T/m³).

b. Tebal lapis pelindung dan jumlah butir batu setiap satu luasan diberikan oleh rumus berikut :

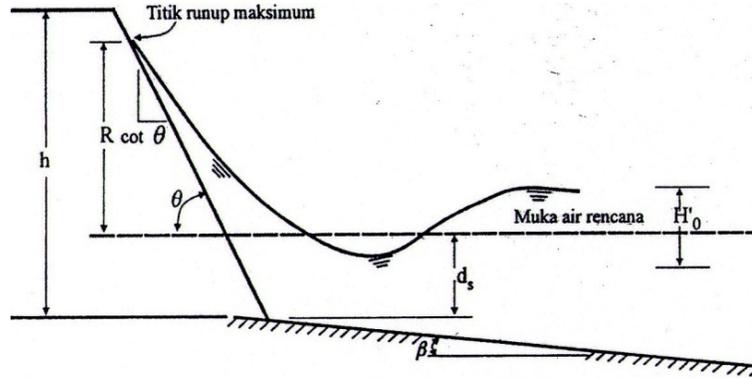
$$t = nk\Delta \left[\frac{w}{\lambda r} \right] \dots\dots\dots (2.74)$$

$$t = Ank\Delta \left[1 - \frac{P}{100} \right] \left[\frac{\gamma_r}{w} \right] \dots\dots\dots (2.75)$$

- Dimana : t = Tebal lapisan pelindung (m).
- n = Jumlah lapisan batu dalam lapis pelindung.
- $k\Delta$ = Koefisien lapis.
- A = Luas permukaan.
- P = Porositas rerata dari lapis pelindung (%).
- N = Jumlah butir batu untuk satu satuan luas permukaan A (1/m²).

c. *Run-up* Gelombang

Perencanaan elevasi bangunan tergantung pada *run-up* dan limpasan yang di izinkan. *Run-up* tergantung pada bentuk kekasaran bangunan, kedalaman air pada kaki bangunan, kemiringan dasar laut di depan bangunan dan karakteristik bangunan.



Gambar 2.26 *Run-up* gelombang (CERC,1984)

Nilai *run-up* dapat diketahui dari grafik *run-up* gelombang dengan terlebih dahulu menghitung bilangan Irribaren :

$$Ir = \frac{\tan \theta}{(H/L_0)^{0.5}} \dots\dots\dots (2.76)$$

Dimana : *Ir* = Bilangan *Irribaren*.

θ = Sudut kemiringan sisi pemecah gelombang ($^{\circ}$).

H = Tinggi gelombang dilokasi bangunan (m).

Lo= Panjang gelombang di laut dalam (m).

Grafik tersebut dapat digunakan untuk menghitung *run-down* (*Rd*) yaitu turunnya permukaan air karena gelombang pada sisi pemecah gelombang.

2.8.5 Tembok Laut / See Wall

Tembok laut digunakan untuk melindungi pantai atau tebing dari gempuran gelombang sehingga tidak terjadi erosi atau abrasi. Kriteria perencanaan tembok laut:

- a. Lebar mercu, tembok laut minimal 3 kali diameter ekuivalen batu lapis pelindung. Bila digunakan untuk jalan maka lebar mercu diambil 3,0 m sampai dengan 6,0 m.

b. Elevasi mercu

$$El_{\text{mercu}} = DWL + R_u + F_b \dots\dots\dots (2.77)$$

- Dengan : El_{mercu} = Elevasi mercu tembok laut (m).
 R_u = *Run-up* gelombang (m).
 F_b = Tinggi jagan (1,0 m sampai dengan 1,5 m).
 DWL = *Design Water Level*.

c. Berat lapis pelindung

$$w = \frac{y^b H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \dots\dots\dots (2.78)$$

$$\Delta = \frac{(y_b - y_a)}{y_a} \dots\dots\dots (2.79)$$

- Dimana : W = Berat minimum batu (tf).
 H = Tinggi Gelombang Rencana (m).
 K_D = Koefisien stabilitas batu lindung.
 θ = Sudut lereng tembok laut ($^{\circ}$).
 γ_b = Berat satuan batu lapis pelindung (tf/m³)
 γ_a = Berat satuan air laut (tf/m³)

d. Tebal lapis pelindung

$$t = 2d_e = 2 \left[\frac{w}{y_b} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (2.80)$$

- Dimana : t = Tebal lapis pelindung (m).
 d_e = Diameter ekuivalen (m).
 W = Koefisien stabilitas batu lindung (tf).
 y_b = Sudut lereng tembok laut (tf/m³).

e. *Toe protection*

Tebal *toe protection* = $lt-2t$, dan berat batu lapis lindung digunakan kira-kira ½ dari yang digunakan pada dinding tembok laut. (Yuwono,1992)

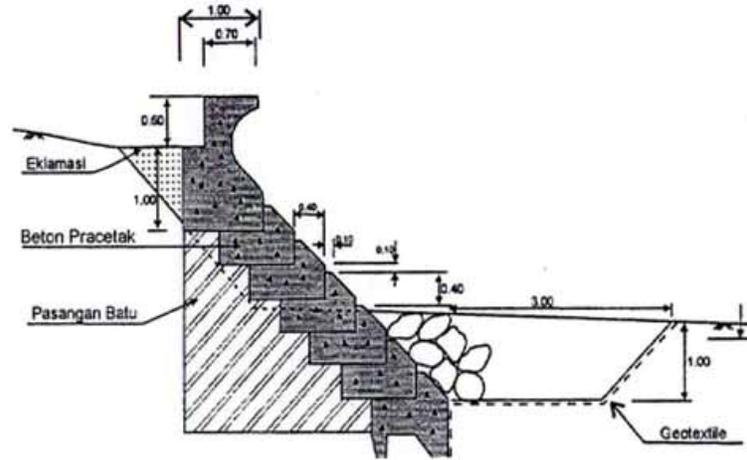
Berat butir untuk pondasi dan pelindung kaki bangunan dihitung dengan persamaan:

$$w = \frac{y_r H^3}{N_s \{S_r - 1\} N_s} \dots\dots\dots (2.81)$$

- Dimana: W = Berat rerata butir batu (ton).
 γ_r = Berat jenis batu (ton/m³).
 γ_a = Berat jenis air laut (1,025 sampai 1,03 ton/m³).

S_r = Perbandingan berat jenis batu dan berat jenis air laut = γ_r / γ_a

N_s = Angka stabilitas rencana untuk pondasi dan pelindung kaki bangunan.



Gambar 2.27 Seawall yang dilengkapi *toe protection* (Triatmodjo,1999)

2.9 Tinjauan Tanah

Untuk membangun di lahan reklamasi perlu diketahui dengan penyelidikan tanah untuk mendapat informasi kondisi lapisan tanah setelah pekerjaan reklamasi dinyatakan selesai. Lahan yang terbentuk dari hasil reklamasi dapat dianggap sebagai deposit baru dengan kondisi yang sangat bervariasi. Sebagaimana umumnya tanah timbunan baru, proses pemadatan alami masih berlangsung. Apabila tanah dasar asli (sebelum ditimbun) cukup baik dan timbunan berupa tanah pasir yang dipadatkan dengan baik, maka penurunan pasca reklamasi yang disebabkan oleh rayapan antar partikel tanah diperkirakan relatif kecil. Apabila kondisi tanah dasar atau tanah timbunan tidak baik/padat atau proses pemadatan belum selesai, permasalahan kapasitas dukung tanah dan penurunan akan lebih rumit.

2.9.1 Teori Mekanika Tanah

Tanah pada kondisi alami, terdiri dari campuran butiran-butiran mineral dengan atau tanpa kandungan bahan organik. Butiran-butiran tersebut dapat dengan mudah dipisahkan satu sama lainnya dengan kocokan air. Material ini berasal dari pelapukan batuan, baik secara fisik, biologi maupun kimia. Sifat-sifat teknis tanah, kecuali dipengaruhi oleh unsur-unsur luar yang menjadi penyebab terjadinya pelapukan batuan tersebut.

Tanah terdiri atas 3 komponen, yaitu udara, air dan bahan padat. Udara dianggap tidak memiliki pengaruh teknis, sedangkan air sangat mempengaruhi sifat-sifat teknis tanah. Ruang diantara butiran-butiran, sebagian atau seluruhnya dapat terisi oleh air atau udara. Bila rongga tersebut terisi seluruhnya oleh air, tanah dikatakan dalam kondisi jenuh. Bila rongga terisi oleh udara dan air, tanah kondisi jenuh sebagian (*partially saturated*). Tanah kering adalah tanah yang tidak mengandung air sama sekali atau kadar airnya nol.

Berdasarkan kandungan butiran-butirannya, tanah dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu tanah granular dan tanah kohesif. Tanah granular adalah tanah tanah berbutir kasar yang tidak mempunyai komponen kohesi, maka kuat geser hanya bergantung pada gesekan antar butir tanahnya, seperti pasir dan kerikil. Sementara tanah kohesif mempunyai kandungan butiran yang halus, seperti lempung dan lanau.

Tabel 2.6 Jenis tanah berdasarkan ukuran butiran

Jenis Tanah	Diameter Butir (mm)
Lempung (<i>clay</i>)	< 0,002
Lanau (<i>silt</i>)	0,002 – 0,074
Pasir (<i>sand</i>)	0,074 – 4,75
Kerikil (<i>gravel</i>)	4,75 – 75
Kerakal (<i>cobble</i>)	75 – 300
Batu / berangkal (<i>boulder</i>)	> 300

(sumber : *ASTM*)

a. Tanah Granular

Tanah-tanah granular, seperti kerikil, pasir, batuan dan campurannya, pada umumnya mempunyai sifat-sifat teknis yang sangat baik. Sifat-sifat teknis tersebut antara lain :

- Merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan dan jalan, karena mempunyai daya dukung yang tinggi dan penurunan yang kecil asalkan tanahnya relatif padat.
- Merupakan material yang baik untuk tanah urug pada dinding penahan tanah, struktur bawah tanah, dan lain-lain, karena menghasilkan tekanan lateral yang kecil. Mudah dipindahkan dan merupakan material drainase yang baik.
- Tanah yang baik untuk timbunan, karena mempunyai kuat geser yang tinggi.

- Bila tidak dicampur dengan material yang kohesif, tidak dapat digunakan sebagai material untuk tanggul, bendungan, kolam, karena permeabilitasnya yang besar.

Kuat geser dan kompresibilitas tanah granular tergantung dari kepadatan butiran yang biasanya dinyatakan dalam kerapatan relatif. Hal lain yang penting mengenai tanah granular adalah bentuk dan ukuran butirannya. Semakin besar dan kasar permukaan butiran, semakin besar kuat gesernya. Tanah granular juga mempunyai daya dukung yang tinggi.

b. Tanah Kohesif

Tanah kohesif umumnya memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- Kuat gesernya rendah.
- Bila basah bersifat plastis dan mudah mampat.
- Menyusut bila kering dan mengembang bila basah.
- Berkurang kuat gesernya bila kadar air bertambah, atau bila struktur tanahnya terganggu.
- Berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat rangkak (*creep*) pada beban konstan.
- Merupakan material kedap air.
- Material yang jelek untuk tanah urug karena menghasilkan tekanan lateral yang tinggi.

Salah satu karakteristik tanah berbutir halus yang kohesif adalah plastisitasnya, yaitu kemampuan butiran untuk tetap melekat satu sama lain. Batas-batas keplastisan tanah bergantung pada sejarah terjadinya dan komposisi mineral yang dikandungnya.

Kajian mekanika tanah dalam hal ini adalah kajian terhadap sifat-sifat tanah dan hubungannya dengan daya dukung tanah. Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban. Pengujian dilapangan untuk mengetahui kuat dukung tanah dapat dilakukan dengan cara pengambilan sampel (*boring*), *sondir* maupun *SPT* (*Standart Penetration Test*). Perlu juga dilakukan *vane shear test* untuk tanah lempung. Pengujian ini di laboratorium dapat dilaksanakan dengan pengujian terhadap contoh sampel tanah yang diambil saat pengeboran. Pengujian di laboratorium terhadap sampel tanah dapat digunakan

untuk mengetahui parameter tanah seperti berat jenis tanah, sudut gesek internal tanah, indeks plastisitas, koefisien konsolidasi dan yang lainnya.

Berdasarkan parameter tanah dapat dihitung daya dukung tanah (Q_{ult}) dengan menggunakan persamaan Terzaghi berikut ini :

$$Q_{ult} = C N_c + D_f \gamma N_q + 0,5 B \gamma N_\gamma \dots \dots \dots (2.82)$$

- dimana :
- Q_{ult} = kuat dukung batas tanah
 - N_c, N_q, N_γ = konstanta tanah tergantung pada ϕ
 - D_f = kedalaman pondasi (m)
 - B = lebar pondasi (m)
 - C = koefisien tanah
 - γ = berat jenis tanah (ton/m^3)

Selain menggunakan persamaan Terzaghi, dapat pula digunakan persamaan Meyerhoff dalam penentuan kapasitas dukung ijin (q_a) untuk tanah tak berkohesi (pasir).

- untuk pondasi bujur sangkar atau pondasi memanjang, dengan lebar $B \leq 1,20$ m,

$$q_a = \frac{q_c}{30} \dots \dots \dots (2.83)$$

- untuk pondasi bujur sangkar atau pondasi memanjang, dengan lebar $B > 1,20$ m,

$$q_a = \frac{q_c}{50} \left[1 + \frac{0.3}{B} \right]^2 \dots \dots \dots (2.84)$$

- dimana :
- q_a = kapasitas dukung ijin (kg/cm^2)
 - q_c = tahanan konus (kg/cm^2)
 - B = lebar pondasi (m)

2.9.2 Teori Geoteknik

Tanah yang ada di alam tidak semuanya pada kondisi ideal untuk dibangun suatu bangunan di atasnya. Maka dari itu diperlukan stabilisasi terhadap kondisi tanah tersebut. Stabilisasi tanah bertujuan untuk perbaikan mutu tanah yang tidak baik dan meningkatkan mutu dari tanah yang sebenarnya adalah golongan baik. Salah satu perbaikan tanah dapat dilakukan dengan menggunakan bahan perkuatan fleksibel diantaranya adalah *geotekstil*.

Geotekstil merupakan lembaran polimer fleksibel yang terbuat dari serat sintesis yang diaplikasikan di tanah. Rancangan aplikasi dan kinerja semua geotekstil, terlepas dari komposisi atau jenisnya, dapat ditentukan dengan cara mengidentifikasi fungsi-fungsi utama yang diperlukan dari geotekstil tersebut. Adapun fungsi geotekstil tersebut antara lain :

- separasi
- drainasi
- filtrasi
- perkuatan
- proteksi

Selanjutnya yang perlu diketahui adalah sifat-sifat geotekstil yang diperlukan agar dapat bertahan terhadap pengaruh lingkungan. Adapun sifat-sifat geotekstil yang perlu diketahui untuk perkuatan tanah antara lain :

a. Sifat-sifat fisik

- Tebal (10 – 300 uics → 1 uics = 0,001”).
- Berat per meter (gr/m^2) → (135-180 gr/cm^2).
- *Spesific grafity* → polimernya (0,91 – 1,38).

b. Sifat-sifat kimia

- Kompresibilitas → tebal berbagai tekanan normal (drainase).
- Kuat tarik (tekanan tarik maksimum, ϵ , e).
- Kemampuan memikul beban secara berulang-ulang.
- *Impact test*.
- *Soil (fabric friction test)*.

c. Sifat-sifat ketahanan

- Kuat rangkak (*creep test*).
- *Abration test*.

d. Sifat-sifat lingkungan

- Tahan terhadap suhu.
- Tahan terhadap iklim.
- Tahan terhadap cahaya.
- Tahan terhadap bakteri.
- Ketahanan terhadap pengrusakan dalam tanah (standart 12 tahun max. 30 %)

e. Sifat-sifat hidrolis → drainase, fibrasi, air tanah.

Pada sebuah lereng, untuk mencapai ketinggian yang diinginkan dibutuhkan lapisan geotekstil agar stabil, karena erosi dan keruntuhan permukaan dapat terjadi pada tepi lereng. Lapisan-lapisan geotekstil yang ditempatkan pada lereng saat konstruksi ataupun rekonstruksi akan memperkuat tanah dan akan meningkatkan stabilitas lereng tersebut. Perkuatan tanah yang memungkinkan konstruksi yang aman pada lereng yang curam, umumnya untuk lereng dengan perbandingan 1 horizontal 1 vertikal. Selain itu, geotekstil pada sisi lereng akan meningkatkan ketahanan lateral selama pemadatan dan dengan demikian meningkatkan kepadatan dibandingkan dengan yang bisa dicapai dalam keadaan normal. Material-material yang digunakan untuk perbaikan tanah antara lain :

a. Tanah sebagai bahan konstruksi

Syarat-syaratnya antara lain:

- Mempunyai kemampuan mengalirkan air yang tinggi.
- Mempunyai koefisien kemampatan (c_v) yang rendah.
- Mempunyai sudut geser dalam (ϕ) yang besar.
- Tidak mengandung bahan yang menyebabkan korosi.
- Mempunyai koefisien gesek (f) dengan bahan geosintesis yang cukup tinggi.

b. Bahan geosintesis sebagai elemen perkuatan

Peranan geosintesis dalam perkuatan tanah :

- Sebagai jangkar pengikat dinding muka dan menahan tekanan tanah aktif (p_a).
- Interaksi dengan tanah melalui gesekan antara tanah dengan geosintesis.

2.10 Muara Sungai

2.10.1 Pengertian

Muara sungai adalah bagian hilir dari sungai yang berhubungan dengan laut. Permasalahan di muara sungai dapat ditinjau di bagian mulut sungai (*river mouth*). Mulut sungai adalah bagian paling hilir dari muara sungai yang langsung bertemu dengan laut. Sedangkan estuari adalah bagian dari sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut. Pengaruh pasang surut terhadap sirkulasi aliran (kecepatan/debit, profil muka air, intrusi air asin) di estuari dapat sampai jauh ke hulu sungai, yang tergantung pada tinggi pasang surut, debit sungai dan karakteristik estuari (tampang aliran, kekasaran dinding, dan sebagainya).

Muara sungai berfungsi sebagai pembuangan debit sungai, terutama pada waktu banjir, ke laut. Karena letaknya yang berada di ujung hilir, maka debit aliran di muara lebih besar dibandingkan pada tampang sungai di sebelah hulu. Selain itu muara sungai juga harus melewati debit yang ditimbulkan oleh pasang surut, yang bisa lebih besar dari pada debit sungai. Sesuai dengan fungsinya tersebut muara sungai harus cukup lebar dan dalam. Permasalahan yang sering dijumpai adalah banyaknya endapan di muara sungai sehingga tampang alirannya kecil, yang dapat mengganggu pembuangan debit sungai ke laut. Ketidakterlancaran pembuangan tersebut dapat mengakibatkan banjir di daerah sebelah hulu muara.

Selain itu muara (estuari) mempunyai nilai ekonomis yang penting, karena dapat berfungsi sebagai alur penghubung antara laut dan daerah yang cukup dalam di daratan. Pengaruh pasang surut yang masuk ke estuari dapat mengakibatkan kenaikan muka air, baik pada waktu air pasang maupun air surut. Selama periode pasang air dari laut dan dari sungai masuk ke estuari dan terakumulasi dalam jumlah yang sangat besar, dan periode surut volume air tersebut akan kembali ke laut, sehingga karena besarnya volume air yang dialirkan ke laut maka kedalaman aliran akan cukup besar. Selain itu kecepatan arus juga besar yang dapat mengerosi dasar estuari sehingga dapat mempertahankan kedalaman aliran. Kondisi ini memungkinkan digunakannya estuari untuk alur pelayaran menuju ke daerah pedalaman. Dengan demikian keberadaan estuari akan mempercepat perkembangan daerah yang ada di sekitarnya karena memungkinkan dibukanya pelabuhan-pelabuhan di daerah tersebut.

2.10.2 Morfologi Muara Sungai

Muara sungai dapat dibedakan dalam tiga kelompok, yang tergantung pada faktor dominan yang mempengaruhinya. Ketiga faktor dominan tersebut adalah gelombang, debit sungai, dan pasang surut. Di muara sungai, ketiga faktor tersebut bekerja secara simultan, tetapi biasanya salah satu mempunyai pengaruh lebih dominan dari pada yang lainnya. Gelombang memberikan pengaruh paling dominan pada sungai kecil yang bermuara di laut terbuka (luas) sebaliknya sungai besar yang bermuara di laut tenang akan didominasi oleh debit sungai.

a. Muara sungai yang didominasi gelombang laut.

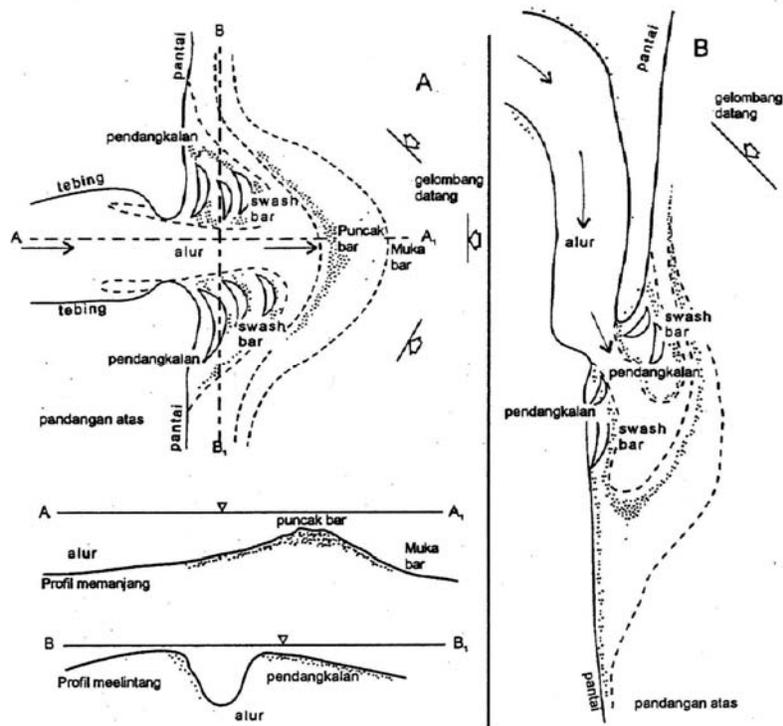
Gelombang besar yang terjadi pada pantai berpasir dapat menyebabkan transpor sedimen pasir, baik dalam arah tegak lurus maupun sejajar pantai. Dari kedua jenis transpor tersebut, transpor sedimen sepanjang pantai adalah yang paling dominan. Angkutan sedimen tersebut dapat bergerak masuk ke muara sungai dan karena di daerah tersebut kondisi gelombang sudah tenang maka sedimen akan mengendap. Banyaknya sedimen tergantung pada gelombang dan ketersediaan sedimen (pasir) di pantai. Semakin besar gelombang semakin besar angkutan sedimen dan semakin banyak sedimen yang mengendap di muara.

Apabila debit sungai kecil kecepatan arus tidak mampu mengerosi endapan tersebut sehingga muara sungai dapat benar-benar tertutup oleh sedimen. Kondisi ini banyak terjadi pada sungai-sungai di pantai selatan Jawa Tengah dan beberapa sungai kecil di pantai utara Jawa. Permasalahan timbul pada musim penghujan, dimana debit banjir tidak lancar dibuang ke laut karena ada penutupan muara. Akibatnya banjir dapat terjadi di daerah sebelah hulu muara. Jika debit air sepanjang tahun cukup besar, kecepatan arus dapat mengerosi endapan tersebut, sehingga mulut sungai selalu terbuka.

Gambar 2.28 menunjukkan pola sedimentasi muara sungai yang didominasi oleh gelombang. Apabila gelombang dominan relatif tegak lurus terhadap muara pola sedimentasi seperti diberikan oleh gambar 2.28.a. Sedangkan apabila arah gelombang dominan membentuk sudut terhadap pantai maka akan terjadi penutupan muara yang arah penutupannya sesuai arah gerak pasir sepanjang pantai (lihat gambar 2.28.b).

Pada muara sungai yang membelok, mulut sungai selalu bergerak. Perpindahan tersebut dipengaruhi oleh angkutan sedimen sepanjang pantai dan debit sungai, seperti dijelaskan dalam gambar 2.29. Gambar 2.29.a adalah mulut sungai awal ketika masih terbuka. Gelombang pecah yang membentuk sudut terhadap garis pantai menimbulkan limpasan energi yang dapat diuraikan dalam komponen tegak lurus dan sepanjang pantai. Limpasan energi tersebut mengakibatkan arus dan transpor sedimen sepanjang pantai. Transpor sedimen tersebut akan masuk ke dalam muara dan karena kondisi gelombang di muara telah tenang maka sedimen tersebut mengendap. Sesuai dengan arah transpor tersebut di tebing A lebih banyak (lebih dahulu) terjadi pengendapan. Dengan adanya pengendapan di A, tampang aliran di mulut sungai menjadi lebih kecil sehingga kecepatan arus meningkat. Kecepatan arus yang besar tersebut akan mengerosi

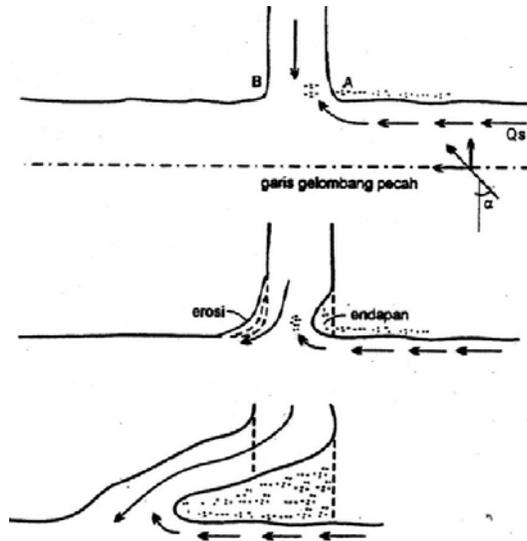
tebing B. Sebenarnya tebing A juga tererosi, tetapi karena suplai dari transpor sedimen sepanjang pantai yang diendapkan lebih besar, maka endapan di tebing A semakin banyak. Proses tersebut berlangsung terus menerus selama gelombang cukup besar, sehingga mulut sungai semakin bergeser dengan arah sesuai dengan arah transpor sedimen sepanjang pantai.



Gambar 2.28 Pola sedimentasi muara sungai yang didominasi gelombang (Triatmodjo, 1999).

Apabila debit sungai dari hulu kecil sehingga tidak mampu mengerosi endapan, maka mulut sungai dapat tertutup oleh endapan. Elevasi endapan bisa cukup tinggi, yang tergantung pada tinggi *run-up* gelombang pada tebing pantai di beberapa muara sungai di pantai selatan Jawa Tengah, elevasi endapan di muara sungai bisa sama dengan elevasi *sand dunes*, yaitu mencapai 3-4 meter di atas muka air laut rata. Dengan adanya rintangan tersebut maka akan terjadi genangan di hulu mulut sungai. Pada awal musim penghujan, dengan adanya aliran dari daerah aliran sungai menyebabkan genangan tersebut semakin tinggi sehingga dapat membanjiri daerah disebelah hulu yang bisa berupa daerah pemukiman atau persawahan. Apabila elevasi

genangan cukup tinggi, kecepatan aliran yang terjadi besar sehingga dapat mengerosi endapan, sehingga tampang aliran pada bukaan tersebut semakin besar.

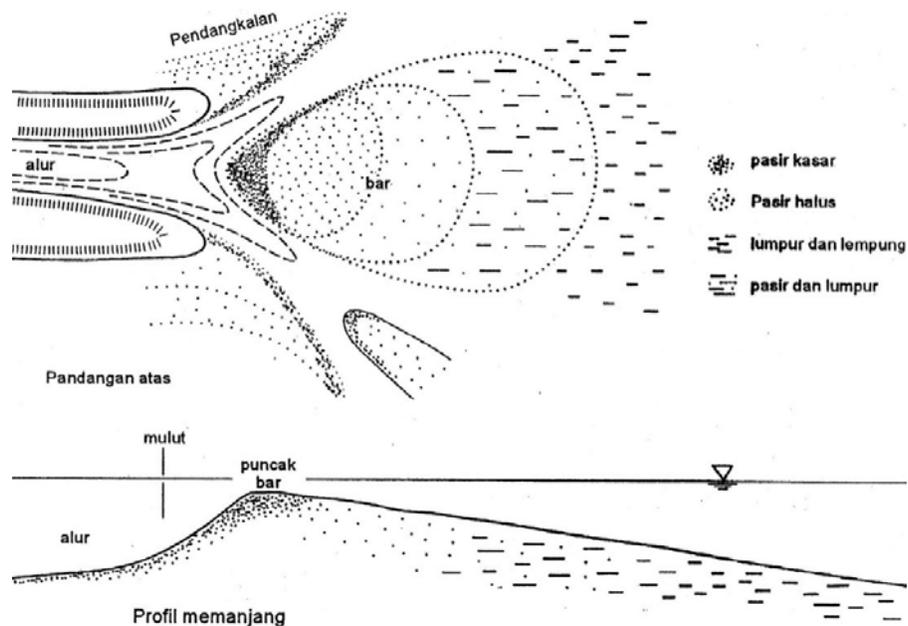


Gambar 2.29 Pola pembentukan endapan di mulut sungai (Triatmodjo,1999).

b. Muara sungai yang didominasi debit sungai

Muara ini terjadi pada sungai dengan debit sepanjang tahun cukup besar yang bermuara di laut dengan gelombang relatif kecil. Sungai tersebut membawa angkutan sedimen dari hulu yang cukup besar. Sedimen yang sampai dimuara sungai merupakan sedimen suspensi dengan diameter yang sangat kecil, yaitu dalam beberapa mikron. Sifat-sifat sedimen kohesif ini lebih bergantung pada gaya-gaya permukaan dari pada gaya berat, yang berupa gaya tarik menarik dan gaya tolak menolak. Mulai salinitas air sekitar 1 sampai 3⁰/₀₀, gaya tolak menolak antar partikel berkurang dan partikel-partikel tersebut akan bergabung membentuk flokon dengan diameter jauh lebih besar dari partikel individu. Demikian juga kecepatannya meningkat tajam. Pada waktu air surut, sedimen tersebut akan terdorong ke muara dan menyebar ke laut. Selama periode titik balik, dimana kecepatan aliran kecil, sebagian suspensi mengendap. Saat berikutnya dimana air mulai pasang, kecepatan aliran bertambah besar dan sebagian suspensi dari laut masuk kembali ke sungai bertemu sedimen yang berasal dari hulu. Selama periode dari titik balik ke air pasang maupun air surut kecepatan aliran bertambah sampai mencapai maksimum dan kemudian berkurang lagi. Di alur sungai, terutama pada waktu air surut kecepatan aliran besar, sehingga sebagian sedimen yang

telah diendapkan tererosi kembali. Tetapi di depan muara sungai dimana aliran telah menyebar, kecepatan aliran lebih kecil sehingga tidak mampu mengerosi semua sedimen yang telah diendapkan. Dengan demikian dalam satu siklus pasang surut jumlah sedimen yang mengendap lebih banyak dari pada yang tererosi sehingga terjadi pengendapan di depan mulut sungai. Proses tersebut terjadi secara terus menerus sehingga muara sungai akan maju ke arah laut membentuk delta.

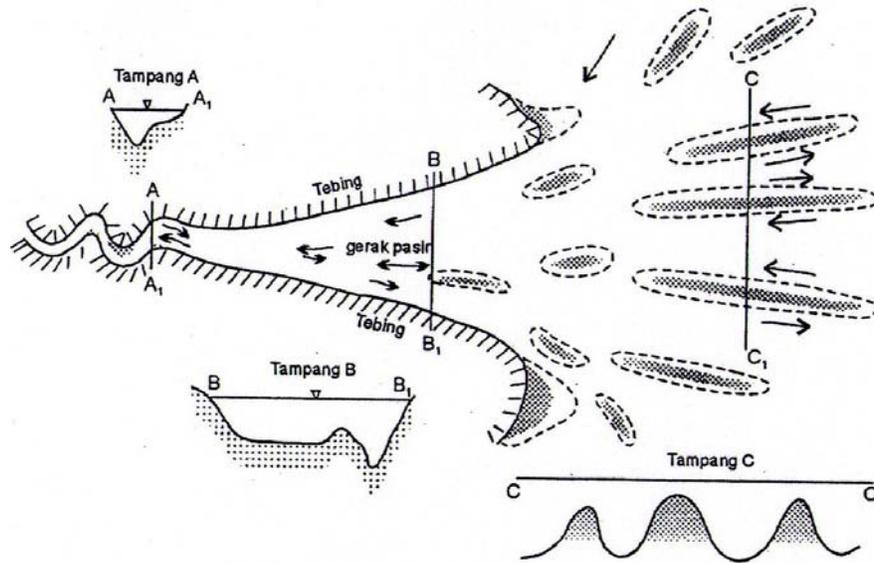


Gambar 2.30 Pola sedimentasi muara sungai yang didominasi debit sungai (Triatmodjo,1999).

c. Muara sungai yang didominasi pasang surut

Apabila tinggi pasang surut cukup besar, volume air pasang yang masuk ke sungai sangat besar. Air tersebut akan berakumulasi dengan air dari hulu sungai. Pada waktu air surut, volume air yang sangat besar tersebut mengalir keluar dalam periode waktu tertentu yang tergantung pada tipe pasang surut. Dengan demikian kecepatan arus selama air surut tersebut besar, yang cukup potensial untuk membentuk muara sungai. Angkutan sedimen berasal dari sungai dan laut. Beberapa endapan terjadi di muara

sungai. Di sebagian besar perairan di Indonesia tinggi pasang surutnya kecil, yaitu berkisar 1,0 dan 2,0 meter, sehingga tidak terbentuk muara sungai tipe ini.



Gambar 2.31 Pola sedimentasi muara sungai yang didominasi pasang surut (Triatmodjo,1999).

2.10.3 Prisma Pasang Surut

Dalam kaitannya dengan permasalahan di muara sungai dikenalkan suatu parameter yang disebut dengan prisma pasang surut (*tidal prism*). Prisma pasang surut dari suatu muara sungai didefinisikan sebagai volume air dari laut yang masuk ke atau keluar dari sungai melalui mulut sungai antar titik balik air surut (*low water slack*) dan titik balik air pasang (*high water slack*) berikutnya atau sebaliknya. Apabila tidak ada debit dari hulu sungai, maka volume air yang masuk ke sungai pada saat air pasang dan yang keluar pada saat air surut adalah sama. Prisma pasang surut dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$T_p \text{ atau } T_s$$

$$p = \int_0^t Q(t) \dots \dots \dots (2.85)$$

- dengan : P : prisma pasang surut
 T_p : periode air pasang
 T_s : periode air surut

$Q(t)$: debit yang lewat mulut sungai

T : periode pasang surut = $T_p + T_s$

Apabila kurva pasang surut di laut adalah sinusoidal, prisma pasang surut dapat didekati dengan rumus berikut :

$$P = \frac{t.Q_{\max}}{\pi C_k} \dots\dots\dots (2.87)$$

Dengan : q_{\max} : debit maksimum

C_k : faktor koreksi yang besarnya antara 0,811 dan 0,999

Gambar 2.32 memberikan penjelasan untuk menghitung prisma pasang surut. Dalam gambar tersebut, titik balik (*slack*) bergeser terhadap muka air tinggi dan rendah. Hal ini disebabkan karena adanya tanpungan air di sungai (pada bantaran atau daerah genangan) dan gesekan dengan dinding sungai. Pada saat titik balik tersebut kecepatan aliran adalah nol. Selama periode air pasang dan mulai dari titik balik air surut, kecepatan aliran meningkat dan air laut masuk ke sungai melalui mulut sungai. Setelah mencapai maksimum disekitar tengah-tengah antara dua titik balik bearturan, kecepatan aliran berkurang sampai menjadi nol pada titik balik air pasang. Pada saat air surut, air yang tertampung di sungai mengalir kembali ke laut. Dengan mengukur tampang lintang dan kecepatan aliran di mulut sungai dapat dihitung debit aliran. Gambar 2.32.a menunjukkan debit aliran melalui mulut sungai sebagai fungsi waktu. Prisma pasang surut dapat diketahui dengan menghitung luasan antara kurva debit air pasang atau air surut dan sumbu t . Apabila dari hulu sungai terdapat aliran, maka volume air surut lebih besar dari pada volume air pasang, seperti terlihat pada gambar 2.32.b.

Prisma pasang surut juga dapat dihitung secara analitis apabila distribusi kecepatan pada vertikal di mulut sungai diketahui. Dengan cara tersebut dapat diperoleh hubungan berikut ini :

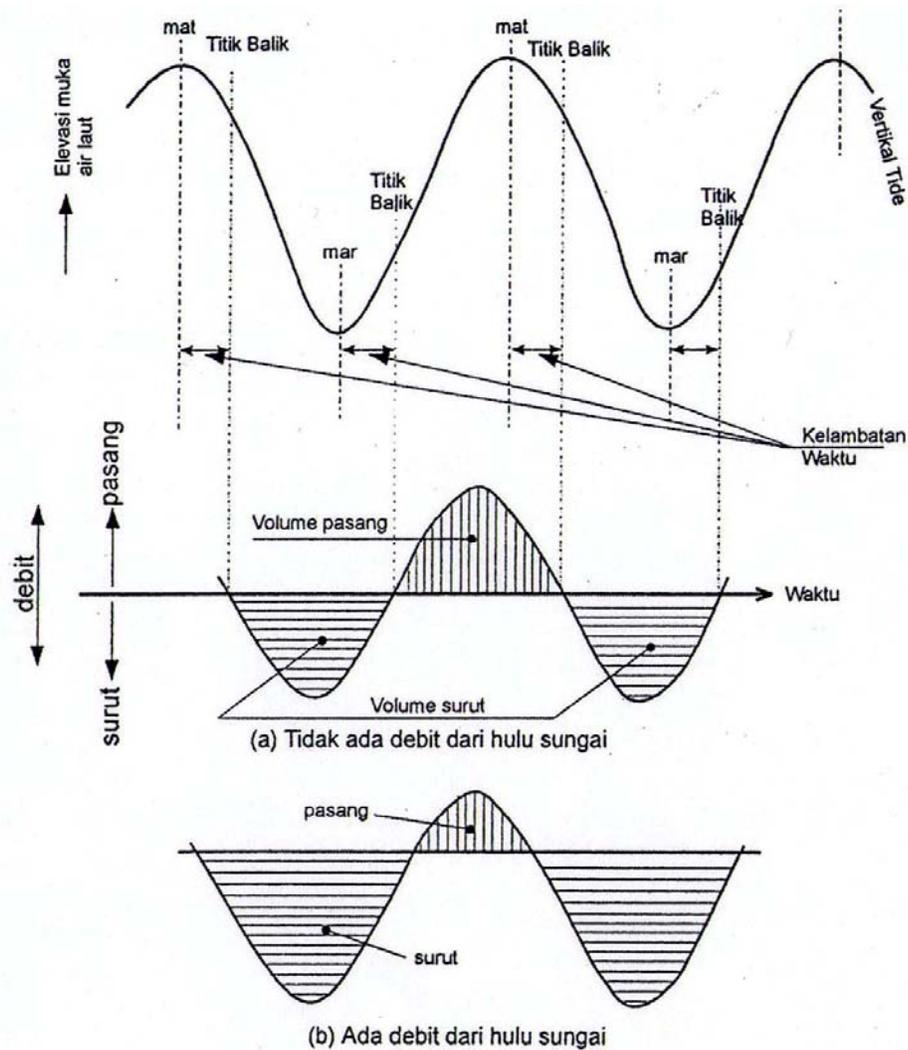
$$A = a_1 p^{m_1}$$

Dengan : a = luas tampang aliran pada muka air rerata untuk kondisi pasang purnama (m^2)

P = prisma pasang surut (m^3)

(Per Bruun,1978 dalam Triatmodjo,1999) telah menganalisa persamaan di atas berdasarkan sejumlah besar data untuk mendapatkan nilai a_1 dan m_1 , dan hasilnya adalah :

$$A = 1,58 \times 10^{-4} p^{0,95}$$



Gambar 2.32 Prisma Pasang Surut (Triatmodjo,1999).

2.10.4 Strategi Pengolahan Muara Sungai

Permasalahan yang banyak dijumpai di muara sungai adalah pendangkalan mulut sungai oleh sedimen (pasir) yang terutama berasal dari laut. Permasalahan tersebut banyak terjadi di sungai-sungai yang bermuara di pantai berpasir dengan gelombang besar, terutama jika variasi debit musimannya besar. Pendangkalan tersebut menyebabkan dua masalah pokok berikut ini :

- a. Ketidatlancaran pembuangan debit banjir ke laut sehingga terjadi luapan air di daerah hulu.

b. Terganggunya kapal-kapal yang memanfaatkan mulut sungai sebagai alur pelayaran.

Untuk menanggulangi masalah tersebut perlu dilakukan penanganan untuk menghalangi masuknya sedimen ke muara sungai.

Strategi pengelolaan muara sungai ditentukan berdasarkan beberapa pertimbangan, diantaranya adalah pemanfaatan muara sungai, biaya pemeliharaan, ketersediaan bahan bangunan, dan sebagainya. Gambar 2.33 menunjukkan beberapa cara penanganan muara sungai, yang meliputi beberapa alternatif penanganan. Pemilihan tersebut tergantung pada tujuan pemanfaatan muara sungai.

Ada dua pilihan yang paling dasar yang perlu ditinjau, yaitu apakah muara sungai harus selalu terbuka atau diperbolehkan tertutup pada waktu-waktu tertentu. Apabila muara sungai dimanfaatkan untuk lalu-lintas kapal maka muara sungai harus selalu terbuka. Untuk itu perlu dibuat *jetty* panjang yang menjorok ke laut sampai jauh di luar gelombang pecah. Apabila muara sungai hanya berfungsi untuk melawan debit banjir, ada beberapa alternatif penanggulangan yang bisa dilakukan. Berikut ini dijelaskan beberapa alternatif pengolahan muara sungai :

a. Mulut sungai selalu terbuka

Supaya mulut sungai selalu terbuka, diperlukan dua buah *jetty* panjang untuk menghindari sedimentasi didalam alur dan pembentukan *sand bar*. Sedimentasi ini disebabkan oleh gerakan sedimen dalam arah tegak lurus pantai dan angkutan sedimen sepanjang pantai. *Jetty* dibuat cukup panjang menjorok ke laut sampai ujungnya berada pada kedalaman dimana tidak terjadi gerakan sedimen. Kedalaman tersebut berada di luar gelombang pecah.

Lokasi gelombang pecah selalu berubah karena adanya pasang surut. Penentuan *jetty* panjang didasarkan pada muka air surut, sedang tinggi gelombang didasarkan pada tinggi gelombang rencana. Panjang *jetty* disebelah kiri dan kanan tidak harus sama, tetapi tergantung pada arah gelombang dominan. Karena transpor sedimen sepanjang pantai terhalang seluruhnya, maka akan terjadi perubahan garis pantai yang besar di sekitar bangunan. Di sebelah hulu akan terjadi sedimentasi (akresi) sedang di sebelah hilir akan terjadi erosi yang dapat merugikan. Untuk menanggulangi erosi yang terjadi di hilir *jetty*, perlu dibuat bangunan pengendali erosi yang dapat berupa *revetment*, groin, pemecah gelombang atau kombinasi dari ketiganya. Pengendapan pasir di muara sungai masih mungkin terjadi apabila perubahan garis pantai telah

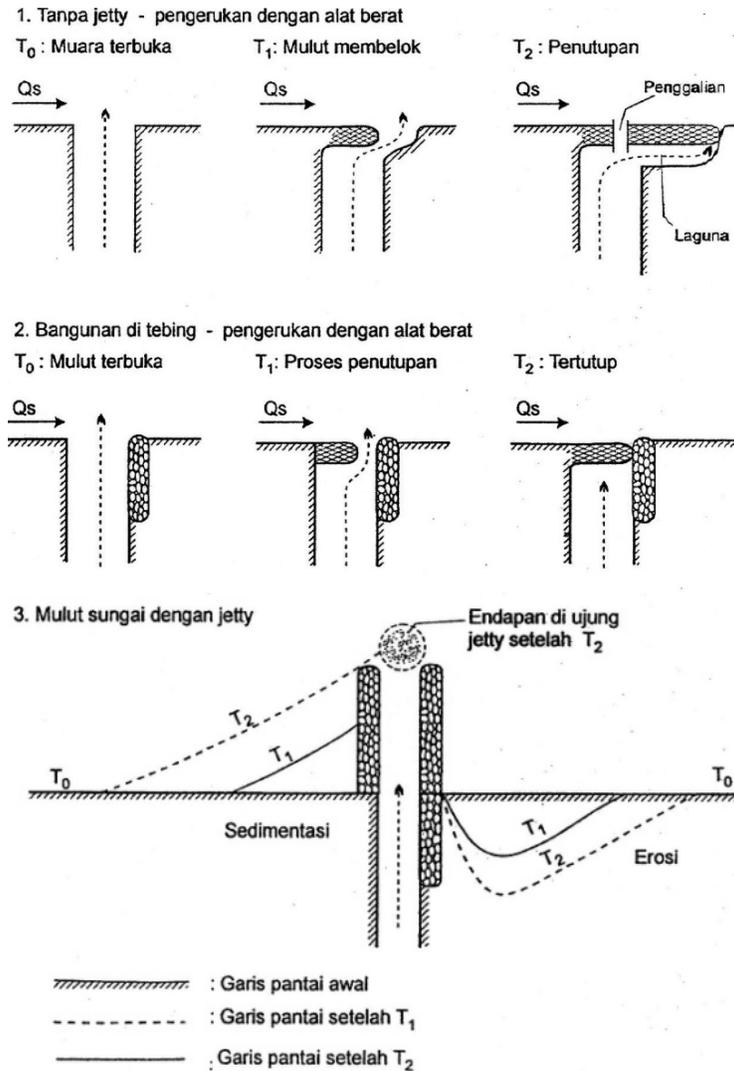
mencapai ujung *jetty*, sehingga transpor sedimen sepanjang pantai dapat melintasinya dan masuk ke mulut sungai.

b. Mulut sungai boleh tertutup

Untuk alternatif ini terdapat dua pilihan yaitu mulut sungai tetap (muara sungai tidak boleh berbelok) atau boleh berpindah. Pembelokan muara sungai dapat menyebabkan sungai bertambah panjang, yang secara hidrolis dapat mengurangi kemampuannya melewati debit. Selain itu, pembelokan tersebut dapat merusak daerah yang berada pada alur sungai yang berbelok tersebut. Untuk menahan pembelokan muara sungai, perlu dibuat bangunan berupa *jetty* sedang, *jetty* pendek, bangunan di tebing mulut sungai, atau pengerukan rutin endapan yang dilakukan dengan alat berat. Apabila muara sungai diijinkan untuk membelok, penanganan dapat dilakukan dengan pengerukan endapan di mulut sungai dengan menggunakan alat berat atau secara gotong royong oleh penduduk setempat.

Pengerukan endapan di mulut sungai merupakan alternatif penanganan paling sederhana dan murah. Pengerukan dilakukan pada awal musim penghujan. Untuk mendapatkan alur yang maksimum diperlukan volume pengerukan besar yang dapat dilakukan dengan alat berat. Bagian endapan yang dikeruk adalah yang searah dengan alur sungai sebelum belokan. Kesulitan dari alternatif ini adalah tertutupnya kembali alur yang baru selesai dikeruk, terutama apabila terjadi gelombang besar dan jika selang waktu antara selesainya pengerukan dengan datangnya banjir pertama masih cukup lama, sehingga alur yang sudah dikeruk akan tertutup kembali oleh endapan. Apabila pengerukan dilakukan secara gotong royong, biasanya penduduk memilih endapan yang paling sempit dan paling tipis untuk dikeruk, yaitu pada hilir belokan. Dengan demikian muara sungai tetap berbelok, sehingga kapasitas debit pengalirannya akan berkurang.

Gambar 2.33 adalah beberapa alternatif bangunan dalam rangka penanganan muara sungai.



Gambar 2.33 Alternatif kegiatan penanganan mulut sungai (Triatmodjo,1999).

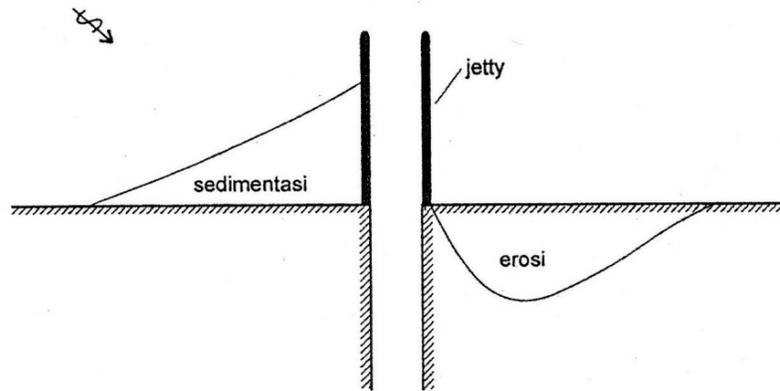
2.10.5 Tinjauan Dampak Lingkungan

Di dalam rencana pembuatan *jetty* perlu diperhatikan dampak negatif bangunan tersebut terhadap lingkungan di sekitarnya. Dampak negatif tersebut dapat terjadi pada pantai disekitar bangunan dan pada bagian hulu sungai.

- a. Pengaruh pembangunan *jetty* terhadap pantai di sekitarnya

Gambar 2.34 menunjukkan pengaruh pembuatan *jetty* terhadap pantai di sekitarnya. Di pantai berpasir pembuatan *jetty* yang menjorok cukup jauh ke laut dapat menyebabkan terhalangnya transpor sedimen sepanjang pantai. Akibatnya sedimen

(pasir) yang bergerak di sebelah kiri terhalang oleh *jetty*, sehingga pengendapan akan terjadi di daerah tersebut. Pada daerah di sebelah kanannya, gelombang yang datang dengan membentuk sudut terhadap garis pantai menyebabkan terjadinya arus sepanjang pantai. Arus tersebut dapat mengangkut sedimen. Tetapi daerah ini tidak mendapatkan suplai sedimen karena sedimen yang bergerak dari sebelah kiri terhalang oleh bangunan. Akibatnya pantai di sebelah kanan bangunan akan mengalami erosi. Dalam gambar tersebut garis yang diarsir adalah garis pantai asli, sedangkan garis penuh adalah keadaan pantai setelah adanya *jetty*. Untuk melindungi pantai di sebelah kanan terhadap erosi, perlu dibuat bangunan pelindung pantai yang dapat berupa *revetment*, *groin*, pemecah gelombang sejajar pantai seperti terlihat dalam gambar tersebut.

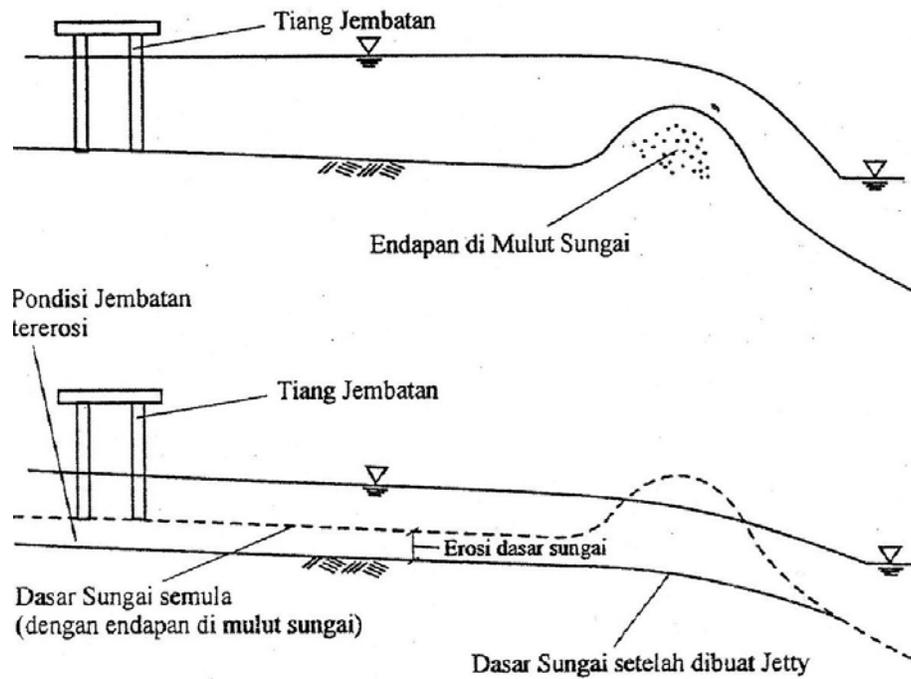


Gambar 2.34 Pengaruh pembuatan *jetty* terhadap pantai disekitarnya (Triatmodjo,1999).

b. Pengaruh pembangunan *jetty* terhadap hulu sungai

Pembuatan *jetty* dapat memperlancar aliran banjir ke laut. Sebelum dibangun *jetty*, pendangkalan yang menyebabkan penyempitan tampang aliran di mulut sungai berpengaruh terhadap kondisi aliran di sepanjang sungai. Terjadi garis pembendungan di sepanjang sungai di hulu mulut sungai, sehingga kecepatan aliran relatif kecil. Kondisi tersebut telah berlangsung cukup lama, dan morfologi sungai sudah terbentuk dengan aliran yang terjadi. Dengan dibangunnya *jetty*, mulut sungai terbebas dari endapan, sehingga aliran menjadi lancar. Kedalaman aliran di sepanjang sungai berkurang, sementara kecepatan aliran bertambah besar. Akibatnya morfologi sungai

menyesuaikan dengan kondisi yang baru tersebut yang bisa berupa terjadinya degradasi dasar sungai. Hal ini dapat membahayakan beberapa bangunan di sepanjang sungai, seperti pilar jembatan, bendung, dan bangunan-bangunan sungai lainnya. Untuk itu perlu dilakukan antisipasi terhadap masalah tersebut, yang bertujuan menstabilkan dasar sungai. Tindakan tersebut dapat berupa pembuatan *groundsill* di dasar sungai untuk mencegah erosi dasar.



Gambar 2.35 Pengaruh *jetty* terhadap hulu sungai (Triatmodjo,1999).