

## **BAB II.**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka**

##### **2.1.1. Penelitian Terdahulu**

Abrasi menjadi ancaman serius untuk keberlangsungan masyarakat pesisir karena dapat mempengaruhi profil pantai, sehingga perlu mengkaji karakteristik gelombang. Mulyabakti dkk, (2016) melakukan analisa karakteristik gelombang dan pasang surut secara teori dan analitis. Dengan memperhitungkan koefisien refraksi dan shoaling pada arah angin maksimum dominan diperoleh kedalaman gelombang pecah dan tinggi gelombang maksimum. Dengan analisis data pasang surut dengan metode *Admiralty* diperoleh tipe pasang surut, elevasi muka air laut tertinggi dan elevasi muka air laut terendah.

Setiap pantai memiliki karakteristik yang unik, beberapa teori tentang angin musim tidak sepenuhnya benar untuk keadaan pantai Indonesia karena terdiri dari banyak pulau kecil, sehingga perhitungan secara analitis menjadi sulit (Rabung dkk, 2015). Sharma dkk, (2014) mengembangkan persamaan kemiringan ellips ringan untuk pemodelan gelombang nonlinier. Rumus sebelumnya dikembangkan dengan memperhatikan interaksi-interaksi antar gelombang mengingat transfer energi gelombang di daerah *shoaling* cukup signifikan dan dapat menyebabkan gelombang memiliki amplitudo yang besar. Hasil validasi pada tiga kasus pelabuhan menunjukkan hasil yang relatif sama, selanjutnya Sharma dan Panchang, (2014) mengembangkan persamaan tersebut pada model elemen hingga dengan validasi data eksperimen.

CGWAVE merupakan salah satu modul dalam paket *software Surface Water Modeling System (SMS)* yang menggunakan model elemen hingga dalam pemodelan gelombang bentuk 2D. Beberapa penelitian untuk membandingkan hasil simulasi CGWAVE dilakukan. Perbandingan hasil tinggi gelombang dengan perhitungan analitis dan simulasi menggunakan model CGWAVE dikaji oleh Zulkifli dkk, (2017). Diperoleh nilai tinggi gelombang hasil simulasi CGWAVE rata-rata lebih kecil dari hasil analitis. Hal ini disebabkan pada perhitungan

dengan model CGWAVE mempertimbangkan kombinasi refraksi, difraksi, gelombang pecah, penyebaran amplitudo, alur bangunan pantai dan fungsi elevasi permukaan gelombang. Perbandingan simulasi transformasi gelombang 2D dengan model CGWAVE dan AWAVE 2-3 dikaji oleh Febri dkk, (2015). CGWAVE menghasilkan tinggi gelombang lebih rendah dari AWAVE 2-3 namun dari segi kebutuhan data dan hasil running model yang dinilai sesuai yaitu model CGWAVE.

Pemodelan gelombang dengan CGWAVE dilakukan pada beberapa studi kasus. Atkins dkk. (2015) mengkaji model agitasi gelombang periode panjang di pelabuhan dengan memvalidasi data pemodelan CGWAVE dengan model fisik berupa *wave flume*. Hasil simulasi dan model fisik menunjukkan koefisien transmisi gelombang relatif sama. Simulasi transformasi gelombang dengan mempertimbangkan adanya bangunan pelindung pantai banyak dikaji. Pratama dkk., (2019) melakukan pemodelan gelombang dengan input tinggi dan periode gelombang hasil peramalan data dengan rentang 6 tahun. Lanura dkk., (2017) melakukan pemodelan gelombang dengan CGWAVE akibat bangunan pelabuhan dengan data batimetri dari *website* NOAA. Umar (2011) juga melakukan pemodelan gelombang untuk mengetahui arah datang gelombang dominan penyebab abrasi pantai. Zidan dkk, (2012) memodelkan beberapa alternatif struktur pelindung pantai dan membandingkan masing-masing hasil disipasi energi gelombang relatif.

Simulasi dengan adanya *breakwater* dikaji oleh Ikhsanudin dkk, (2017), input gelombang menggunakan pemodelan spektrum gelombang dari beberapa musim dan diperoleh energi gelombang tertinggi. Refi, (2013) membandingkan material penyusun *breakwater* dengan menggunakan hasil simulasi pemodelan CGWAVE. Sasikumar dkk, (2018) mengkaji dimensi *breakwater* model terendam yang optimal terhadap transformasi gelombang akibat perubahan iklim. Simulasi CGWAVE divalidasi dengan koefisien transmisi gelombang dari pemodelan REEF3D. Dalam penelitian Elhakeem dkk, (2019) membandingkan efek transformasi gelombang kondisi eksiting pantai dan setelah dibangun *breakwater* dengan simulasi CGWAVE. Karima dan Sarwono (2017) melakukan analisis transformasi gelombang dengan peramalan tinggi gelombang signifikan periode

ulang 50 tahun untuk perencanaan *breakwater*. Setelah dimodelkan dengan *breakwater* tinggi gelombang berkurang dan dapat diterapkan.

Dari penelitian di atas, untuk menggambarkan suatu kondisi deformasi gelombang secara jelas tanpa melakukan pengujian di lapangan dapat dilakukan dengan sebuah simulasi. Pemodelan CGWAVE dianggap memadai untuk digunakan dalam perencanaan bangunan pantai. Dalam penelitian ini simulasi yang digunakan adalah program SMS 10.0 modul CGWAVE dengan melakukan pemodelan gelombang eksisting di perairan Teluk Tapian Nauli, Kota Sibolga untuk kemudian nilai ketinggian gelombang digunakan untuk pemodelan gelombang eksisting dan setelah dibangunnya *breakwater* pada perairan Pantai Ujung. Input periode dan tinggi gelombang signifikan menggunakan peramalan gelombang metode *Fisher Tippett Type I* periode ulang 50 tahun. Dilakukan trial lokasi *breakwater* yang tepat dan struktur direncanakan dengan memperhatikan tinggi gelombang hasil simulasi dan pasang surut. Kemudian dilakukan komparasi nilai elevasi muka air laut, tinggi, dan kecepatan gelombang pada garis Pantai Ujung kondisi eksisting dan setelah ditambahkan struktur *breakwater*.

## **2.2. Dasar Teori**

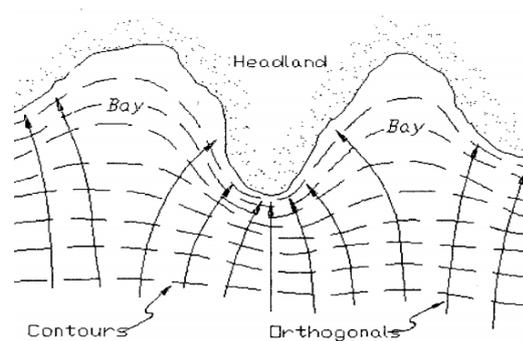
### **2.2.1. Transformasi Gelombang**

Transformasi gelombang adalah perubahan karakteristik gelombang seperti tinggi, panjang, periode, arah, dan sebagainya akibat pengaruh perubahan kedalaman dasar laut, adanya hambatan pulau-pulau atau tanah meninggi di dasar laut, kemiringan dasar laut yang tidak sejajar dengan arah datangnya gelombang dan lain-lain (Rabung, 2015). Gelombang yang sampai ke pantai setelah mengalami proses deformasi tersebut akan menimbulkan perubahan morfologi pantai (abrasi atau akresi) (Umar, 2011). Transformasi/deformasi gelombang sangat mempengaruhi perilaku gelombang dan perencanaan bangunan pantai, gelombang yang menjalar dari laut dalam menuju ke pantai mengalami berbagai perubahan bentuk sebagai berikut.

#### **1. Refraksi Gelombang dan Pendangkalan**

Di laut dalam, daerah dimana kedalaman air lebih besar dari setengah panjang gelombang, gelombang menjalar tanpa dipengaruhi dasar laut

(Mulyabakti, 2016). Pada daerah laut transisi, cepat rambat dan panjang gelombang berkurang seiring dengan berkurangnya kedalaman. Perbedaan berangsur-angsur cepat rambat gelombang di laut dalam dan daerah yang lebih dangkal menyebabkan gelombang membentuk sudut dan membelok berusaha tegak lurus garis pantai. Sudut belok gelombang ini membentuk garis *orthogonal*, pada beberapa kasus garis pantai tidak terstruktur garis orthogonal ini mengalami divergensi (penguncupan) dan konvergensi (penyebaran) seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Divergensi dan konvergensi garis *orthogonal* (USACE, 2015)

Dalam studi refraksi gelombang ini terdapat beberapa anggapan sebagai berikut :

- a. Antar dua garis *orthogonal* memiliki energi gelombang yang konstan
- b. Perubahan topografi dasar secara berangsur
- c. Arah penjalaran gelombang tegak lurus dengan puncak gelombang
- d. Apabila cepat rambat gelombang memiliki periode tertentu, hanya tergantung kedalaman lokasi tersebut.
- e. Gelombang merupakan monokromatik, amplitudo kecil, puncak yang panjang, dan periode konstan.
- f. Pengaruh perubahan topografi, arus, angin, dan refleksi diabaikan.

Adapun langkah-langkah perhitungan refraksi sebagai berikut :

- a. Menghitung cepat rambat gelombang dengan rumus :

$$C_0 = L_0/T \quad (2.1)$$

$$L_0 = 1,56T^2 \quad (2.2)$$

- b. Menentukan kedalaman di depan *breakwater* dengan menghitung nilai  $d/L_0$  dan dari tabel fungsi  $d/L$  sehingga didapat nilai  $L$  untuk menghitung cepat rambat dengan rumus :

$$C = L/T \quad (2.3)$$

- c. Menghitung besar sudut datang gelombang dengan rumus :

$$\sin \alpha = \left( \frac{C}{C_0} \right) \sin(\alpha_0) \quad (2.4)$$

- d. Menghitung koefisien refraksi ( $K_r$ ) dan koefisien pendangkalan ( $K_s$ ) dengan rumus :

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \quad (2.5)$$

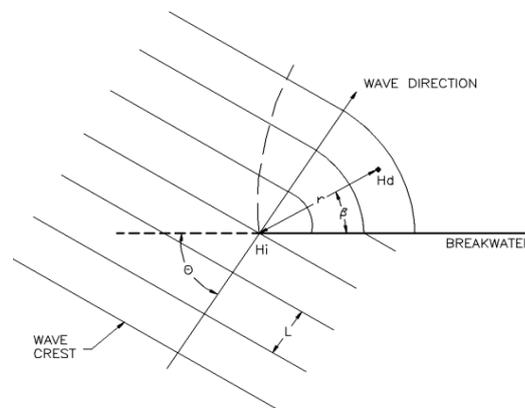
$$K_s = \sqrt{\frac{n_0 L_0}{n L}} \quad (2.6)$$

- e. Menghitung tinggi gelombang hasil refraksi dengan rumus :

$$H = K_r \times K_s \times H_0 \quad (2.7)$$

## 2. Difraksi Gelombang

Dalam penjalaran gelombang, apabila terhalang oleh suatu struktur atau pulau, gelombang akan membelok berbentuk busur dengan titik pusat di ujung rintangan dan masuk ke daerah terlindung di balik rintangan tersebut seperti pada Gambar 2.2. Transfer energi dapat direduksi oleh rintangan, namun gelombang yang masuk ke balik rintangan menyebabkan terbentuknya gelombang walau tidak sebesar di depan rintangan.



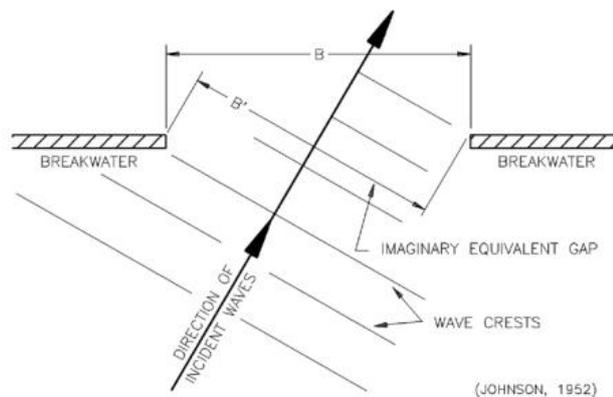
Gambar 2.2. Difraksi gelombang akibat rintangan *breakwater* tunggal  
(USACE, 2015)

Perhitungan difraksi dibagi menjadi dua, yaitu perhitungan pada rintangan tunggal dan ganda. Pada rintangan (pemecah gelombang) tunggal, tinggi gelombang gelombang di suatu titik daerah terlindung tergantung pada jarak titik tersebut terhadap ujung rintangan ( $r$ ), sudut antara rintangan dan garis penghubung titik dengan ujung rintangan ( $\beta$ ), dan sudut antara arah penjalaran gelombang dan rintangan ( $\theta$ ). Koefisien difraksi ( $K'$ ) merupakan perbandingan tinggi gelombang datang dan tinggi gelombang di titik daerah terlindung. Titik A adalah titik yang ditinjau di belakang rintangan dan P adalah ujung rintangan.

$$H_A = K' H_p \quad (2.8)$$

$$K' = f(\theta, \beta, r/L) \quad (2.9)$$

Perhitungan difraksi untuk rintangan (pemecah gelombang) ganda menggunakan grafik yang dikembangkan oleh Johnson dengan menggunakan proyeksi celah imajiner seperti pada gambar 2.3. apabila lebar celah lebih dari lima kali panjang gelombang, kedua ujungnya tidak saling mempengaruhi, maka digunakan rumus untuk rintangan tunggal.



Gambar 2.3. Difraksi gelombang akibat rintangan *breakwater* ganda  
(USACE, 2015)

### 3. Refleksi Gelombang

Gelombang datang dengan energi yang dibawanya membentur suatu rintangan (bangunan pantai) dan dipantulkan kembali sebagian atau seluruhnya. Pantulan gelombang ini harus dapat diserap oleh rintangan untuk meminimalisir pantulan, rintangan berbentuk miring dan terbuat dari batu akan lebih menyerap energi dibandingkan dengan rintangan vertikal, halus, dan dindingnya tidak permeabel. Besar kemampuan suatu bangunan memantulkan gelombang

didefinisikan oleh koefisien refleksi ( $X$ ), yaitu perbandingan tinggi gelombang refleksi ( $H_r$ ) dan tinggi gelombang datang ( $H_i$ ).

$$X = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.10)$$

Koefisien refleksi berbagai tipe bangunan berdasarkan tes model seperti pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1. Koefisien refleksi berbagai tipe bangunan (Triatmodjo, 1999)

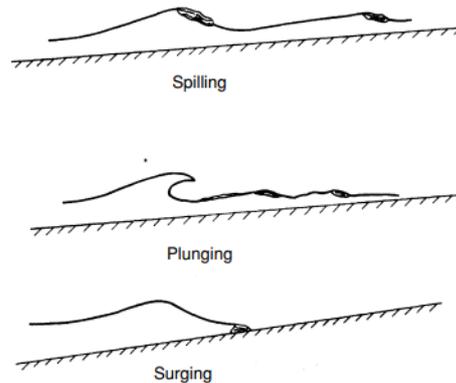
<b>Tipe Bangunan</b>	<b>X</b>
Dinding vertikal dengan puncak di atas air	0,7 – 1,0
Dinding vertikal dengan puncak terendam	0,5 – 0,7
Tumpukan batu sisi miring	0,3 – 0,6
Tumpukan blok beton	0,3 – 0,5
Bangunan vertikal dengan peredam energi (diberi lobang)	0,05 – 0,2

#### 4. Gelombang Pecah (*Wave Break*)

Gelombang pecah adalah bentuk deformasi gelombang yang paling ekstrem. Gelombang menjalar pada ketinggian tertentu pecah dan melepaskan energi gelombang, apabila terhalang, energi tersebut menghantam penghalang dan energi dapat diminimalisir. Setelah pecah sisa energi tersebut masih dapat menimbulkan arus yang kemudian diterima oleh penghalang-penghalang di depannya. Profil gelombang di laut dalam adalah sinusoidal, menuju laut dangkal puncak gelombang menjadi tajam dan lembah melandai, tinggi gelombang meningkat, sedangkan kecepatan dan panjang gelombang berangsur-angsur berkurang, pada kemiringan gelombang tertentu kecepatan partikel air di puncak gelombang lebih besar dari cepat rambat gelombang dan akhirnya pecah. Kedalaman air dan atau kecuraman gelombang masing-masing akan membatasi tinggi gelombang maksimum yang terjadi (Febri dkk., 2015).

Gelombang pecah dibagi menjadi tipe *Spilling*, *Plunging*, dan *Surging* seperti pada Gambar 2.4. *Spilling* terjadi ketika gelombang dengan kemiringan kecil menuju pantai yang datar, gelombang mulai pecah pada jarak yang cukup jauh dari pantai dan menimbulkan buih yang cukup panjang pula. *Plunging* terjadi ketika kemiringan gelombang dan dasar laut bertambah, puncak gelombang akan memutar akibat massa air di puncak terjun ke depan gelombang, energi

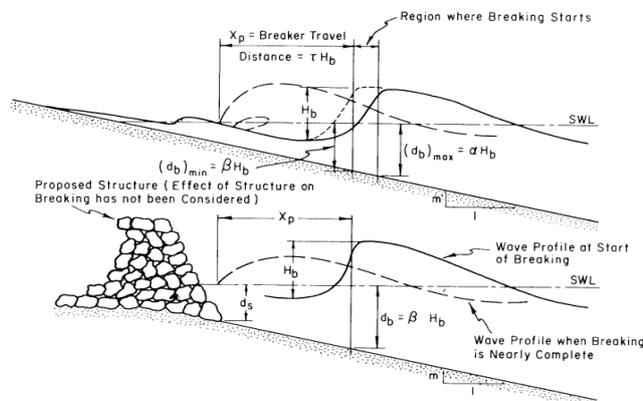
gelombang pecah dihancurkan dalam turbulensi dan sebagian kecil dipantulkan pantai. *Surging* mirip dengan tipe *Plunging*, namun gelombang sudah pecah sebelum puncak gelombang terjun, terjadi di pantai dengan kemiringan yang sangat besar yang menghasilkan daerah gelombang pecah sangat sempit dan dipantulkan kembali.



Gambar 2.4. Sketsa tipe gelombang pecah (Google, 2018)

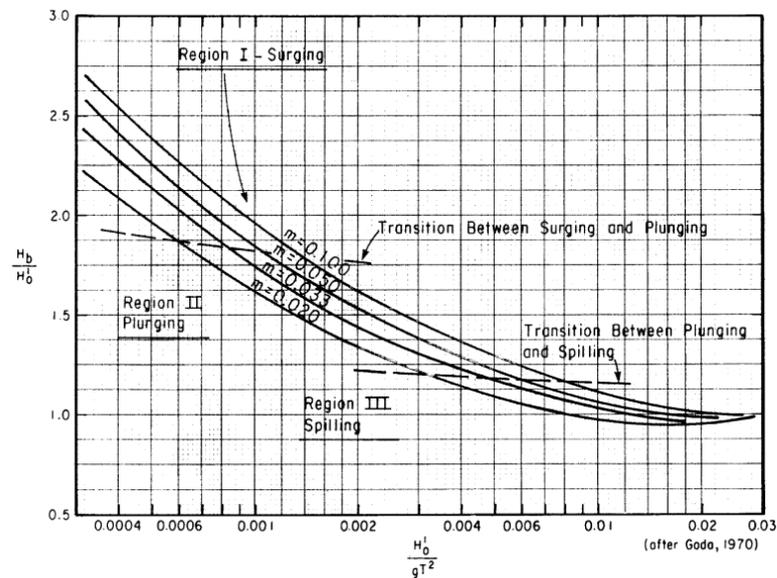
Gelombang pecah dipengaruhi oleh kemiringan pantai dan kemiringan gelombang datang (Iversen dkk, dalam CERC, 1984). Beberapa parameter geometri gelombang pecah pada Gambar 2.5 digunakan untuk perhitungan tinggi dan kedalaman gelombang pecah,  $H_b$  adalah tinggi gelombang pecah dari muka air di depan gelombang,  $d_b$  kedalaman gelombang pecah yang diukur dari kedalaman puncak gelombang ke elevasi muka air tenang dan  $H'_0$  adalah tinggi gelombang laut dalam ekuivalen yang diperoleh dengan rumus :

$$H'_0 = K' \cdot K_r \cdot H_0 \quad (2.11)$$

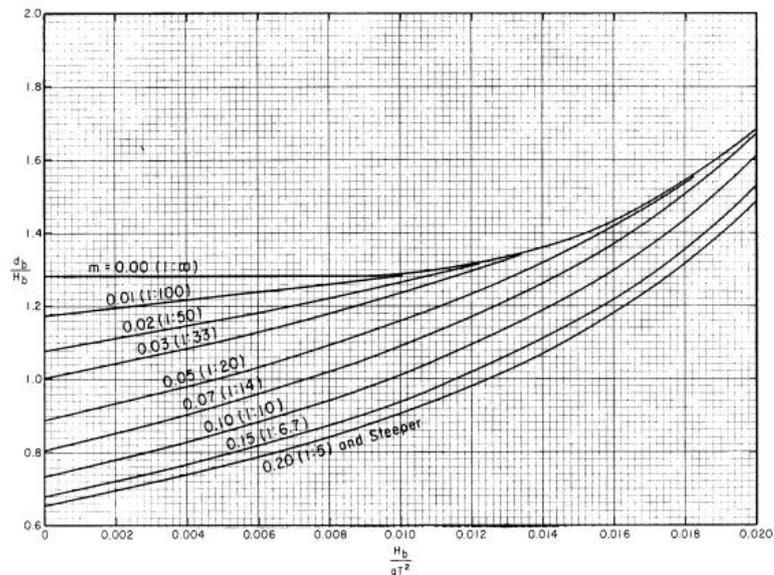


Gambar 2.5. Geometri gelombang pecah (CERC, 1984)

Dalam penelitian Iversen dkk. menghasilkan grafik hubungan indeks  $H_b/H'_0$  dan  $H'_0/gT^2$  pada Gambar 2.6 untuk menentukan tinggi gelombang pecah pada berbagai kemiringan dasar laut, sedangkan penentuan kedalaman dimana gelombang pecah pada berbagai kemiringan dasar laut menggunakan grafik hubungan indeks  $d_b/H_b$  dan  $H_b/gT^2$  pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6. Grafik penentuan tinggi gelombang pecah (CERC, 1984)



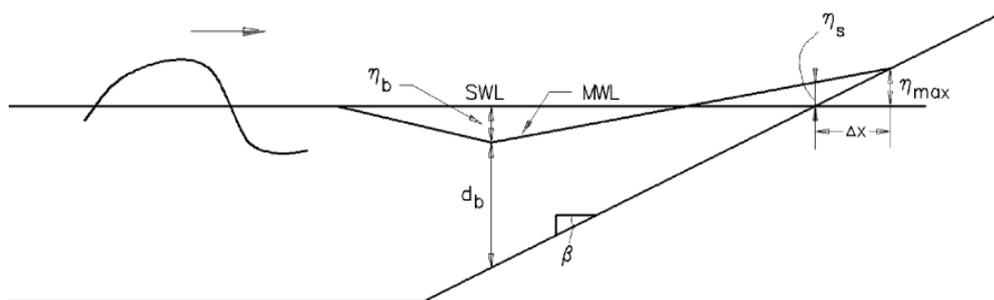
Gambar 2.7. Grafik penentuan kedalaman gelombang pecah (CERC, 1984)

### 2.2.2. Fluktuasi Muka Air Laut

Periode fluktuasi muka air laut lebih besar dari periode gelombang, sehingga pada perencanaan bangunan pantai elevasi muka air sangat penting untuk diperhitungkan. Fluktuasi terjadi karena proses alam seperti tsunami, gelombang badai (*wind set-up*), kenaikan muka air karena gelombang (*wave set-up*), perubahan suhu global, dan pasang surut. Dalam kasus perairan Pantai Ujung ini hanya memperhitungkan fluktuasi muka air laut akibat gelombang (*wave set-up*), akibat badai (*wind set-up*), pasang surut, dan perubahan suhu global, karena kemungkinan terjadi semua proses alam tersebut sangat kecil terjadi.

#### 1. Kenaikan Muka Air Laut karena Gelombang (*Wave Set-up*)

Gelombang yang datang dari laut dalam dengan ketinggian gelombang ( $H'_0$ ) pada kedalaman  $d_b$  gelombang pecah dan menyebabkan *wave set-down*, elevasi muka air rerata turun terhadap muka air diam setinggi  $S_b$ , kemudian muka air naik dan memotong garis pantai. Selisih elevasi *wave set-up* dan muka air rerata dinotasikan  $S_w$ , sedangkan selisih elevasi *wave set-up* dan *wave set-down* dinotasikan  $\Delta S$  seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Sketsa *wave set-up* dan *wave set-down* (USACE, 2015)

Nilai *wave set-up* dan *wave set-down* dihitung dengan rumus :

$$S_b = -\frac{0,536H_b^{2/3}}{g^{1/2}T} \quad (2.12)$$

$$S_w = 0,19 \left[ 1 - 2,82 \sqrt{\frac{H_b}{gT^2}} \right] H_b \quad (2.13)$$

dengan :

$S_b$  : *set-down* di daerah gelombang pecah (m)

$S_w$  : *set-up* di daerah gelombang pecah (m)

$H_b$  : tinggi gelombang pecah (m)

- $d_b$  : kedalaman gelombang pecah (m)  
 $T$  : periode gelombang (s)  
 $g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

## 2. Kenaikan Muka Air Laut karena Badai (*Wind Set-up*)

Perbedaan tekanan atmosfer berkaitan dengan perubahan arah dan kecepatan angin, angin dengan kecepatan besar (badai) menyebabkan fluktuasi permukaan air. Kenaikan muka air laut akan lebih besar pada daerah pantai berbentuk corong dibanding pantai lurus, dikarenakan massa air yang terdorong oleh angin akan terpusat pada ujung corong. Dalam perhitungan *wind set-up* dianggap pantai impermeabel, dan arah angin tegak lurus garis pantai, apabila membentuk sudut, direfleksikan tegak lurus garis pantai. Kenaikan muka air dihitung dengan rumus :

$$\Delta h = \frac{Fi}{2} \quad (2.15)$$

$$\Delta h = Fc \frac{V^2}{2gd} \quad (2.16)$$

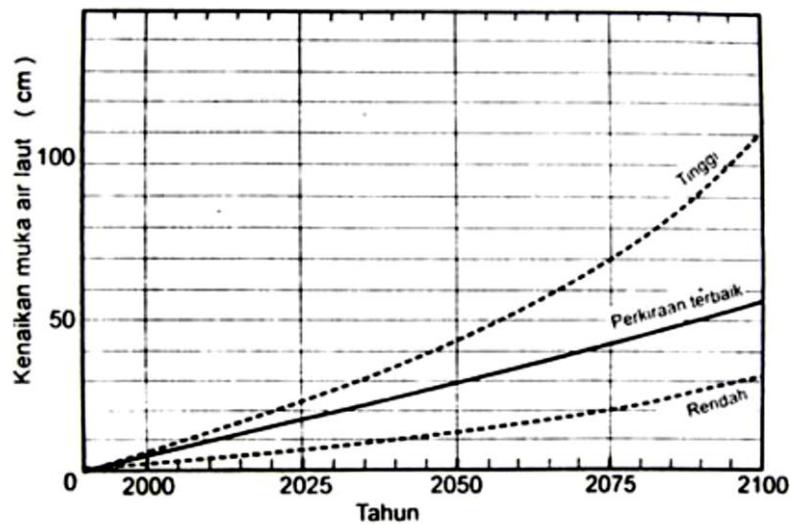
dengan :

- $\Delta h$  : 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/s)  
 $d$  : kedalaman air (m)  
 $g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

## 3. Kenaikan Muka Air Laut akibat Pemanasan Global

Pemanasan global menyebabkan suhu di permukaan bumi naik, dan suhu yang tinggi tersebut tertahan di permukaan bumi dalam waktu yang lama. Sinar matahari yang masuk terperangkap, suhu di permukaan bumi lebih tinggi daripada di luar atmosfer dan menyebabkan efek rumah kaca. Di permukaan bumi, efek rumah kaca dihasilkan oleh gas tertentu, selama 200 tahun terakhir mengalami peningkatan akibat kegiatan manusia. Peningkatan suhu ini menyebabkan gunung-gunung es di kutub mencair dan mempengaruhi elevasi muka air laut. Perkiraan

besar kenaikan muka air laut akibat pemanasan global dapat ditentukan dengan grafik pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Grafik kenaikan muka air laut akibat pemanasan global (Triatmodjo, 1999)

#### 4. Pasang Surut

Merupakan fluktuasi muka air laut yang disebabkan oleh gaya tarik benda-benda di langit, terutama bulan dan matahari terhadap massa air di bumi. Pasang surut dihasilkan dari gaya tarik gravitasi dan efek sentrifugal. Efek sentrifugal adalah dorongan ke arah luar pusat rotasi. Gravitasi bervariasi secara langsung dengan massa, tetapi berbanding terbalik dengan jarak (Priyana dalam Zulkifli, 2017). Walau matahari memiliki gaya tarik lebih besar, namun bulan memiliki jarak yang lebih dekat dari bumi dibanding matahari, sehingga gaya tariknya mencapai 2,2 kali gaya tarik matahari. Elevasi muka air pasang berguna untuk perencanaan puncak bangunan pemecah gelombang, dermaga, dan sebagainya, serta elevasi muka air surut untuk perencanaan kedalaman alur pelayaran/pelabuhan. Terdapat empat tipe pasang surut seperti pada gambar 2.10, empat tipe pasang surut yaitu.

##### a. Pasang surut harian tunggal (*diurnal tide*)

Pasang terjadi satu kali dan surut terjadi satu kali dalam sehari, periode pasang surut diurnal 24 jam 50 menit.

##### b. Pasang surut harian ganda (*semi diurnal tide*)

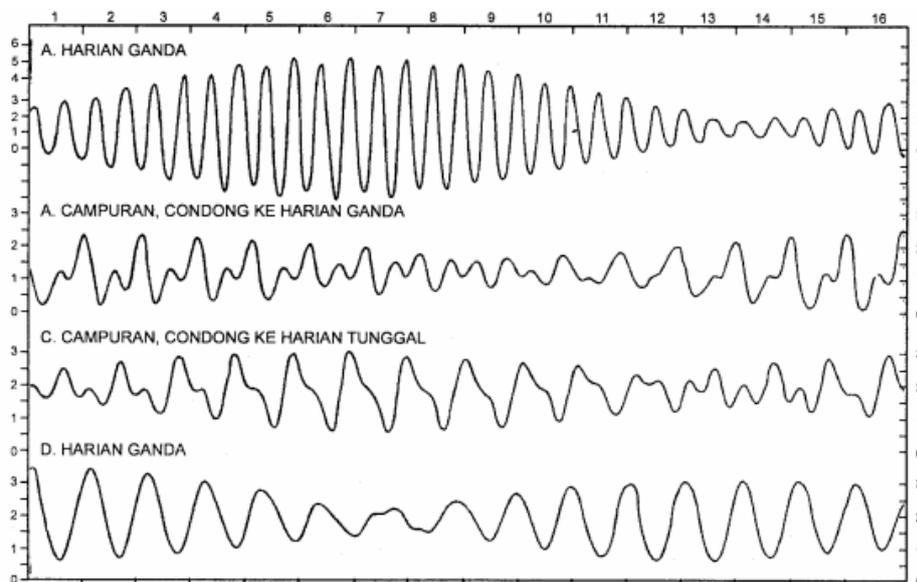
Pasang surut terjadi dua kali dalam sehari, berurutan dan memiliki tinggi gelombang yang hamper sama, periode pasang surut ini rata-rata 12 jam 24 menit.

- c. Pasang surut campuran cenderung ganda (*mixed tide prevailing semi diurnal*)

Pasang terjadi dua kali dan surut terjadi dua kali dalam sehari dengan tinggi dan periode gelombang yang berbeda

- d. Pasang surut campuran cenderung tunggal (*mixed tide prevailing diurnal*)

Pasang dan surut terjadi satu kali dalam sehari, terkadang terjadi dua kali dalam sehari dengan tinggi gelombang dan periode yang berbeda.



Gambar 2.10. Tipe pasang surut (Triatmodjo, 2009)

Dalam perencanaan bangunan pantai, penting untuk menetapkan elevasi rencana muka air laut. Berikut beberapa elevasi muka air laut.

- A. Muka air tinggi (*High Water Level*)

Elevasi muka air tertinggi yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut.

- B. Muka air rendah (*Low Water Level*)

Elevasi muka air terendah yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut.

- C. Muka air tinggi rerata (*Mean High Water Level*)

Elevasi rerata muka air tinggi selama periode 19 tahun.

D. Muka air rendah rerata (*Mean Low Water Level*)

Elevasi rerata muka air rendah selama periode 19 tahun.

E. Muka air laut rerata (*Mean Sea Level*)

Elevasi rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata, digunakan untuk referensi elevasi daratan.

F. Muka air tinggi tertinggi (*Highest High Water Level*)

Elevasi muka air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.

G. Muka air terendah (*Lowest Low Water Level*)

Elevasi muka air terendah pada saat pasang surut purnama atau bulan mati.

5. Elevasi Muka Air Rencana

Elevasi muka air rencana merupakan elevasi yang digunakan pada perencanaan bangunan dengan mengakumulasi elevasi muka air akibat gelombang, akibat angin, pasang surut, pemanasan global dan tsunami seperti pada gambar 2.11 (dalam kasus ini fluktuasi akibat tsunami diabaikan). Elevasi muka air rencana diperhitungkan dengan rumus :

$$HWS = S_w + \Delta h + SLR + HHWL \quad (2.17)$$

Dengan :

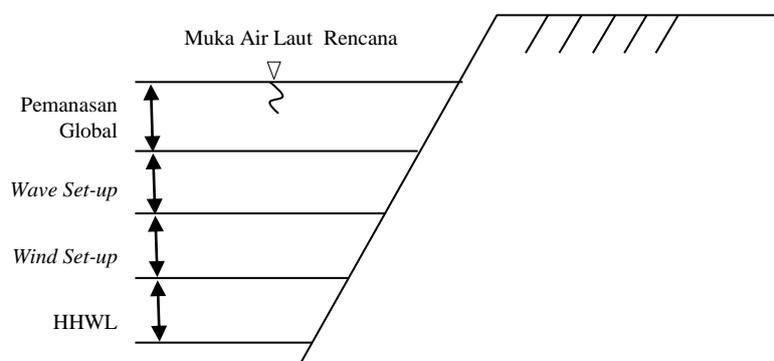
HWS : Elevasi Muka Air Rencana (m)

$S_w$  : *set-up* didaerah gelombang pecah (m)

$\Delta h$  : kenaikan muka air akibat badai (m)

SLR : kenaikan muka air akibat pemanasan global (m)

HHWL : muka air tinggi tertinggi pasang surut (m)



Gambar 2.11. Elevasi muka air rencana (Triatmodjo, 1999)

### 2.2.3. *Fetch* Rerata Efektif

*Fetch* adalah daerah bangkitan gelombang yang dibatasi oleh daratan yang mengelilingi laut. *Fetch* rerata efektif dipengaruhi oleh jarak rintangan/pulau di sekitar titik tinjauan. Nilai *fetch* diperhitungkan dengan rumus berikut :

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos a}{\sum \cos a} \quad (2.18)$$

dengan :

$F_{eff}$  : *fetch* rerata efektif

$a$  : deviasi pada kedua sisi dari arah angin dengan menggunakan pertambahan  $6^\circ$  sampai sudut sebesar  $42^\circ$  pada kedua sisi dari arah angin

$X_i$  : panjang segmen *fetch* yang diukur dari titik observasi gelombang ke ujung akhir *fetch*

### 2.2.4. Periode Ulang Distribusi *Fisher-Tippett Type I*

Perkiraan gelombang dapat dilakukan dengan menggunakan data angin dan data gelombang dalam jangka waktu yang cukup lama. Perkiraan gelombang distribusi *Fisher-Tippett Type I* menggunakan data gelombang tahunan. Dari data tersebut menghasilkan gelombang representatif untuk beberapa tahunnya dan dapat dipilih yang terbesar untuk mewakili satu tahun tersebut. Apabila data gelombang tidak mencukupi untuk perkiraan dapat dikombinasikan dengan peramalan gelombang menggunakan data angin. Hasil dari distribusi ini adalah periode ulang tinggi gelombang. Distribusi ini memperhitungkan beberapa fungsi, yaitu :

#### 1. Fungsi distribusi probabilitas

Tinggi gelombang representatif ( $H_s$ ) diketahui dari nilai maksimal rata-rata tinggi gelombang tiap tahun. Kemudian probabilitas dihitung menggunakan rumus :

$$P(H_s \leq \widehat{H}_s) = e^{-e^{-\left(\frac{\widehat{H}_s - B}{A}\right)}} \quad (2.19)$$

Data tinggi gelombang kemudian diurutkan dari terkecil hingga terbesar dan hitung probabilitas menggunakan rumus :

$$P(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m-0,44}{N_T+0,12} \quad (2.20)$$

Dengan :

$H_s$  : tinggi gelombang representatif

$\widehat{H}_s$  : tinggi gelombang representatif dengan nilai tertentu

A : parameter skala

B : parameter lokasi

$H_{sm}$  : tinggi gelombang urutan ke- m

m : nomer urut tinggi gelombang signifikan

$N_T$  : jumlah kejadian gelombang

Parameter A dan B diperhitungkan dengan persamaan regresi linier sebagai berikut :

$$H_m = \hat{A} ym + \hat{B} \quad (2.21)$$

$$ym = -\ln\{-\ln P(H_s \leq H_{sm})\} \quad (2.22)$$

## 2. Periode Ulang

Tinggi gelombang signifikan dihitung dari periode ulang berbagai kala ulang dengan rumus :

$$H_{sr} = \hat{A} yr + \hat{B} \quad (2.23)$$

$$yr = -\ln\left\{-\ln\left(1 - \frac{1}{L Tr}\right)\right\} \quad (2.24)$$

Dengan :

$H_{sr}$  : tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang Tr

Tr : periode ulang (tahun)

L : rerata jumlah kejadian pertahun,  $L = N_T/K$

K : panjang data (tahun)

## 3. Interval Keyakinan

Perkiraan interval keyakinan sangat penting dilakukan pada gelombang ekstrim dikarenakan pencatatan data pada periode yang pendek dan tingkat ketidakpastian yang tinggi. Maka dari itu diperhitungkan deviasi standar dengan rumus :

$$\sigma_{nr} = \frac{1}{\sqrt{N}} [1 + \alpha(yr - c + \varepsilon \ln v)^2]^{1/2} \quad (2.25)$$

$$\alpha = \alpha_1 e^{\alpha_2 N^{-1,3} + K\sqrt{-\ln v}} \quad (2.26)$$

$$v = N/N_T \quad (2.27)$$

Dengan :

$\sigma_{nr}$  : standar deviasi yang dinormalkan dari tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang  $T_r$

$N$  : jumlah data tinggi gelombang signifikan

$\alpha_1, \alpha_2, e, k, \varepsilon$  : koefisien empiris, untuk distribusi FT-1 nilai dari koefisien tersebut adalah  $\alpha_1 = 0,64$  ;  $\alpha_2 = 9,0$  ;  $k = 0,93$  ;  $e = 0$  ;  $\varepsilon = 1,33$

Besaran absolut dari deviasi standar tinggi gelombang signifikan dihitung menggunakan rumus :

$$\sigma_r = \sigma_{nr} \sigma_{H_s} \quad (2.28)$$

### 2.2.5. Perencanaan Pemecah Gelombang

Dalam Refi (2013), perencanaan pemecah gelombang dipertimbangkan beberapa faktor sebagai berikut:

1. Karakteristik material

Mempertimbangkan material berdasarkan kekuatannya, *specific gravity*, daya tahan terhadap gelombang yang berulang, tahan terhadap perkaratan (korosi) dan fleksibilitas terhadap tarik dan tekan.

2. Durabilitas dan adaptibilitas material

Yaitu kemampuan material terhadap relatif lamanya waktu dapat bertahan pada lingkungan struktur akan dibangun.

3. Ketersediaan material

Tipe *breakwater* menyesuaikan material terdekat sekitar untuk meminimalisir biaya.

4. Biaya material

Meliputi biaya satuan material, pengangkutan, dan biaya perawatan.

*Breakwater* direncanakan *layout breakwater* dengan mempertimbangkan tinggi gelombang di laut dalam (H), menentukan lokasi rencana, analisa kondisi gelombang di lokasi rencana, penentuan elevasi muka air rencana, penentuan tipe

*breakwater*. Pada penentuan kondisi gelombang di lokasi rencana dilakukan dengan menyelidiki tinggi dan kedalaman gelombang pecah menggunakan grafik indeks  $H_b/H'_0$  dan  $H'_0/gT^2$  serta grafik hubungan indeks  $d_b/H_b$  dan  $H_b/gT^2$ . Kemudian merencanakan dimensi *breakwater* dengan tahapan sebagai berikut :

#### 5. Penentuan elevasi puncak *breakwater*

Elevasi rencana dipertimbangkan berdasarkan tinggi *runup* ( $R_u$ ), tinggi *runup* adalah tinggi gelombang maksimal setelah gelombang menghantam *breakwater* seperti pada Gambar 2.12. *Runup* sangat bergantung pada kekasaran permukaan dan bentuk *breakwater*, sehingga sangat sulit apabila ditentukan secara analitis, maka dari itu digunakan grafik hubungan bilangan *Irribaren* dan  $R_u/H$  serta  $R_d/H$  untuk berbagai tipe *breakwater* seperti pada Gambar 2.8. fungsi bilangan *Irribaren* sebagai berikut :

$$I_r = \frac{tg\theta}{(H/L_0)^{0,5}} \quad (2.29)$$

$$L_0 = 1,56.T^2 \quad (2.30)$$

dengan :

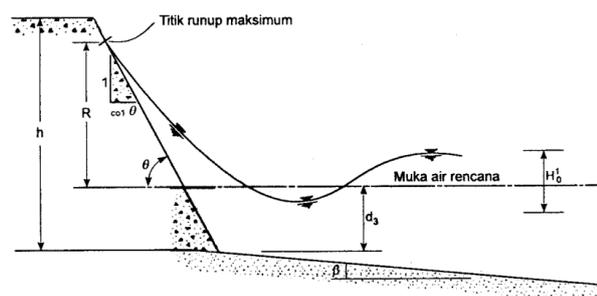
$I_r$  : bilangan *Irribaren*

$H$  : tinggi gelombang dilokasi bangunan (m)

$\theta_r$  : sudut kemiringan sisi pemecah gelombang ( $^{\circ}$ )

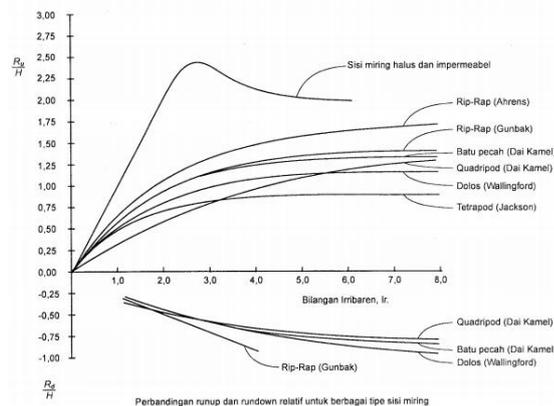
$L_0$  : panjang gelombang di laut dalam (m)

$T$  : periode gelombang (detik)



Gambar 2.12. Sketsa *runup* gelombang (Triatmodjo, 2009)

Bilangan tersebut kemudian diplotkan pada grafik sesuai tipe *breakwater* yang direncanakan, sehingga didapat nilai *runup* ( $R_u$ ). Grafik pada Gambar 2.13 juga dapat digunakan untuk menentukan nilai *rundown* ( $R_d$ ).



Gambar 2.13. Grafik penentuan *runup* dan *rundown* gelombang  
(Triatmodjo, 2009)

Elevasi puncak *breakwater* dihitung menggunakan rumus :

$$El_{BW} = HWL + R_u + H_{tb} \quad (2.31)$$

dengan :

$EL_{BW}$  : elevasi puncak *breakwater*

$HWL$  : muka air rencana

$R_u$  : nilai *runup*

$H_{tb}$  : tinggi kebebasan

#### 6. Berat butir lapis pelindung

Berat unit *armour*/batu pelindung ditentukan berdasar jenis lapis lindung, nilai koefisien stabilitas, jumlah lapis, penempatan, dan kemiringan seperti pada Tabel 2.2, serta nilai berat jenis air laut dan berat jenis *armour* yang diperoleh dari perencanaan *breakwater* yang berdekatan sebelumnya. Berat butir lapis indung diperhitungkan ( $W$ ) dengan rumus Hudson berikut :

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (2.32)$$

$$S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_a} \quad (2.33)$$

dengan :

$\gamma_r$  : berat jenis *armour*

$\gamma_a$  : berat jenis air laut

$H$  : tinggi gelombang rencana

$K_D$  : koefisien stabilitas

$\theta$  : sisi kemiringan *breakwater*

Tabel 2.2. Koefisien stabilitas (Triatmodjo, 2009)

Lapis lindung	n	Penem- patan	Lengan Bangunan K <sub>D</sub>		Kepala Bangunan K <sub>D</sub>		Kemi- ringan Cot $\theta$
			Gelom- -bang Pecah	Gelom- -bang Tidak Pecah	Gelom- -bang Pecah	Gelom- -bang Tidak Pecah	
<b>Batu Pecah</b>							
Bulat halus	2	Acak	1,2	2,4	1,1	1,9	1,5-3,0 *2
Bulat halus	>3	Acak	1,6	3,2	1,4	2,3	*2
Bersudut kasar		Acak	*1	2,9	*1	2,3	
<b>Bersudut kasar</b>	2	Acak	2,0	4,0	1,9 1,6 1,3	3,2 2,8 2,3	1,5 2,0 3,0
<b>Bersudut kasar</b>	>3	Acak	2,2	4,5	2,1	4,2	*2
Bersudut kasar	2	Khusus <sup>*3</sup>	5,8	7,0	5,3	6,4	*2
Paralel <i>epipedum</i>	2	Khusus	7,0-2,0	8,5-24,0	-	-	
<b>Tetrapod dan Quadripod</b>	2	Acak	7,0	8,0	5,0 4,5 3,5	6,0 5,5 4,0	1,5 2,0 3,0
<b>Tribar</b>	2	Acak	9,0	10,0	8,3 7,8 6,0	9,0 8,5 6,5	1,5 2,0 3,0
<b>Dolos</b>	2	Acak	15,8	31,8	8,0 7,0	16,0 14,0	2,0 3,0
<b>Kubus modifikasi</b>	2	Acak	6,5	7,5	-	5,0	*2
<b>Hexapod</b>	2	Acak	8,0	9,5	5,0	7,0	*2
<b>Tribar</b>	1	Seragam	12,0	15,0	7,5	9,5	*2

Keterangan :

n = jumlah lapis lindung

\*1 = penggunaan n=1 tidak disarankan kondisi gelombang pecah

- \*2 = sampai ada ketentuan  $K_D$  lebih lanjut, dibatasi pada kemiringan 1:1,5 – 1:3
- \*3 = batu ditepaatkan dengan sumbu panjang tegak lurus

### 7. Lebar Puncak *Breakwater*

Lebar puncak *breakwater* dipengaruhi oleh berat butir lapis pelindung, jumlah lapis pelindung, berat jenis *armour* dan koefisien lapis. Koefisien lapis ditentukan berdasarkan tabel 2.2. lebar puncak *breakwater* diperhitungkan dengan rumus :

$$B = nk_{\Delta} \left[ \frac{W}{\gamma_r} \right]^{1/3} \quad (2.34)$$

dengan :

- B : lebar puncak *breakwater*
- n : jumlah lapis *armour*
- $k_{\Delta}$  : koefisien lapis
- W : berat butir *armour*
- $\gamma_r$  : berat jenis *armour*

Tabel 2.3. Koefisien Lapis (Triatmodjo, 2009)

Batu Pelindung	n	Penempatan	Koef. Lapis ( $k_{\Delta}$ )	Porositas, P(%)
Batu alam (halus)	2	Random (acak)	1,02	38
Batu alam (kasar)	2	Random (acak)	1,15	37
Batu alam (kasar)	>3	Random (acak)	1,10	40
Kubus	2	Random (acak)	1,10	47
<i>Tetrapod</i>	2	Random (acak)	1,04	50
<i>Quadripod</i>	2	Random (acak)	0,95	49
<i>Hexapod</i>	2	Random (acak)	1,15	47
<i>Tribard</i>	2	Random (acak)	1,02	54
<i>Dolos</i>	2	Random (acak)	1,00	63
<i>Tribar</i>	1	Seragam	1,13	47
Batu alam		Random (acak)		37

### 8. Tebal Lapis Pelindung

Perhitungan Tebal lapis lindung dengan rumus berikut :

$$t = nk_{\Delta} \left[ \frac{W}{\gamma_r} \right]^{1/3} \quad (2.35)$$

dengan :

- t : tebal lapis pelindung  
 n : jumlah *armour* tiap lapis  
 $k_{\Delta}$  : koefisien lapis  
 W : berat butir *armour*  
 $\gamma_r$  : berat jenis *armour*

#### 9. Jumlah batu pelindung

Perhitungan jumlah batu pelindung dalam satuan luas  $10 \text{ m}^2$  dihitung

dengan rumus berikut :

$$N = Ank_{\Delta} \left[ 1 - \frac{P}{100} \right] \left[ \frac{\gamma_r}{W} \right]^{2/3} \quad (2.36)$$

dengan :

- N : jumlah batu pelindung  
 A : luas permukaan  
 n : jumlah *armour* tiap lapis  
 $k_{\Delta}$  : koefisien lapis  
 P : porositas rerata  
 $\gamma_r$  : berat jenis *armour*

#### 10. Dimensi *armour*

Bentuk batu *armour* dianggap berbentuk bulat, dimensi *armour* dihitung

menggunakan rumus :

$$r = \sqrt[3]{\frac{v_{batu} \times 3/4}{\pi}} \quad (2.37)$$

$$v_{batu} = m/\rho \quad (2.38)$$

dengan :

- r : jari-jari baru (m)  
 $v_{baru}$  : volume batu ( $\text{m}^3$ )  
 m : berat batu (kg)  
 $\rho$  : berat jenis batu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

#### 11. *Secondary layer, primary layer, dan toe berm*

Berat secondary layer dan toe berm adalah  $W_{primary}/10$ , sedangkan *core layer*  $W_{primary}/200$ , dengan  $W$  adalah berat batu lapis lindung yang dihitung dengan persamaan 2.23, lebar lapis lindung dihitung dengan menggunakan persamaan 2.x, menggunakan  $n=3$  untuk *secondary layer* dan *toe berm*, serta  $n=2$  untuk *primary layer*. Tebal lapis pelindung dihitung dengan persamaan 2.x. dengan  $n = 2$  untuk *primary layer* dan *toe berm*, serta  $n=3$  untuk *secondary layer*.

#### 2.2.6. Perangkat Lunak *Surface Water Modeling System (SMS 10.0)*

SMS 10.0 merupakan pendekatan numerik simulasi dua dimensi arus di pesisir dan sungai berdasarkan elemen hingga dan beda hingga. Pemodelan ini digunakan untuk mengetahui parameter-parameter terkait guna penyelesaian permasalahan di pantai dan sungai. Hasil output yang didapat tidak hanya berupa tabel dan grafik, namun juga berbentuk visual video.

CGWAVE (*Coastal Graphical Wave*) merupakan salah satu modul simulasi dalam paket software SMS 10.0 untuk mentransformasikan kondisi oseanografi. Input data berupa arah datang gelombang, amplitudo, dan periode yang kemudian disimulasikan menghasilkan output berupa tinggi gelombang, fase gelombang, kecepatan gelombang dan amplitudo gelombang dengan memanfaatkan jaringan elemen hasil formulasi dari panjang gelombang serta Model ini mensimulasikan efek gabungan dari refraksi-difraksi dalam persamaan kemiringan elips ringan, tinggi gelombang pecah dan penyebaran amplitudo gelombang nonlinier (Zidan dkk, 2012). rumus kemiringan elips ringan akurat untuk studi terkait desain pelabuhan dan bangunan pantai lain, model elemen hingga mumpuni pada persamaan *slope* yang digunakan untuk prediksi gelombang, persamaan tersebut tidak memperhitungkan interaksi antar gelombang (Sharma dan Panchang, 2014). Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\nabla \cdot (C \cdot C_g \cdot \nabla \eta) + \frac{C_g}{c} \sigma^2 \eta = 0 \quad (2.39)$$

dengan :

$\sigma$  : frekuensi gelombang (rad/s)

$C(x,y)$  : cepat rambat gelombang =  $\sigma/k$

$C_g(x,y)$  : cepat rambat kelompok gelombang =  $\partial\sigma/\partial k = nC$  dengan

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sin 2kd} \right)$$

$\eta(x,y)$  : fungsi elevasi permukaan gelombang yang diestimasi

$k(x,y)$  : jumlah gelombang (=  $2\pi/L$ ), dalam hubungannya dengan kedalaman  $d(x,y)$  melalui penyebaran linier :

$$\sigma^2 = gk \tanh(k)$$