



KERJA PRAKTEK—RC18-4802

**LAPORAN TUGAS PENGGANTI KERJA PRAKTEK
TUTORIAL PERENCANAAN PERLINDUNGAN PANTAI
ALAMIAH DAN MODERN**

JONATHAN WIDIRAGA

NRP. 03111740000059

ABEL KUSUMA TANDI

NRP. 03111740000097

Dosen Pembimbing

Dr. Anak Agung Ngurah Satria Damarnegara, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2021

**LAPORAN TUGAS PENGGANTI KERJA PRAKTEK
TUTORIAL PERENCANAAN PERLINDUNGAN PANTAI ALAMIAH DAN
MODERN**

JONATHAN WIDIRAGA

NRP.03111740000059

ABEL KUSUMA TANDI

NRP.03111740000097

Surabaya, Juli 2021

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Dr. Anak Agung Ngurah Satria Damarnegara, S.T., M.T.

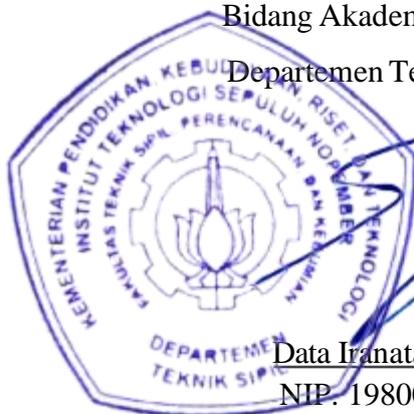
NIDN. 0026038802

Mengetahui,

Sekretaris Departemen I

Bidang Akademik dan Kemahasiswaan

Departemen Teknik Sipil FTSPK-ITS



Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19800430 200501 1 002

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas hikmat dan anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas pengganti kerja praktek yang berjudul Tutorial Perencanaan Perlindungan Pantai Alamiah dan Modern. Dalam penyusunan laporan tugas pengganti kerja praktek ini penulis banyak mendapat saran, dorongan, kritikan, dan bimbingan dari berbagai pihak yang merupakan pengalaman yang tidak dapat diukur secara materi, namun dapat membukakan mata penulis bahwa sesungguhnya pengalaman dan pengetahuan tersebut adalah guru yang terbaik bagi penulis. Oleh karena itu dengan segala hormat dan kerendahan hati perkenankanlah penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Anak Agung Ngurah Satria Damarnegara, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing tugas pengganti kerja praktik
2. Bapak dan ibu dosen serta staf pengajar Departemen Teknik Sipil FTSPK-ITS
3. Teman-teman S60 di Departemen Teknik Sipil ITS yang telah membantu dalam diskusi dan penyusunan laporan ini
4. Semua pihak yang turut membantu sehingga laporan kerja praktik ini dapat terselesaikan

Dalam penyusunan laporan kerja praktik ini, penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dikarenakan keterbatasan ilmu dan pengalaman yang penulis miliki. Untuk itu penulis mohon maaf atas segala kekurangan tersebut dan tidak menutup diri terhadap segala saran dan kritik serta masukan yang bersifat konstruktif bagi penulis.

Semoga laporan kerja praktik ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri, pembaca, institusi pendidikan dan masyarakat luas.

Surabaya, Juni 2021

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	1
1.3. Tujuan	1
BAB 2 KARAKTERISTIK WILAYAH PANTAI	2
2.1. Fenomena Pantai.....	2
2.2. Pembangkitan Gelombang	6
2.3. Fluktuasi Muka Air	8
2.4. Arus.....	18
BAB 3 PROSES PANTAI.....	22
3.1. Perubahan Garis Pantai	22
3.2. Angkutan Sedimen Tegak Lurus Pantai	23
3.3. Angkutan Sedimen Sejajar Pantai.....	27
3.4. Permasalahan di Wilayah Pantai.....	30
BAB 4 TIPE TIPE STRUKTUR BANGUNAN PANTAI	32
4.1. <i>Hard Structure</i>	32
4.2. <i>Soft Structure</i>	43
BAB 5 KONSEP PERENCANAAN STRUKTUR BUATAN.....	47
5.1. Analisis Data Gelombang	47
5.2. Elevasi Muka Air Laut.....	56
5.3. Deformasi Gelombang	61
5.4. Stabilitas Struktur Fleksibel.....	70
5.5. Stabilitas Struktur <i>Rigid</i>	78
5.6. Diagram Alir	81
BAB 6 KONSEP PERENCANAAN BANGUNAN PANTAI ALAMI.....	82
6.1. Vegetasi dan Reboisasi	82
6.2. <i>Sand Nourishment</i>	87
6.3. <i>Sand Motor</i>	97

BAB 7 CONTOH PROYEK PERLINDUNGAN PANTAI	102
7.1. Latar Belakang	102
7.2. Kondisi Eksisting Pelindung Pantai	102
7.3. <i>Outline</i> Proyek	103
7.4. Perencanaan <i>Breakwater</i>	104
BAB 8 PENUTUP	115
8.1. Kesimpulan	115
8.2. Saran	115
DAFTAR PUSTAKA	116

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Southern Shift	2
Gambar 2.2 Northern Shift	3
Gambar 2.3 Data Time Series Topan	3
Gambar 2.4 Klasifikasi Bentuk Pantai/Pesisir.....	5
Gambar 2.5 Tabel Klasifikasi Bentuk Pantai/Pesisir.....	6
Gambar 2.6 Wind Rose Jakarta tanggal 30 Juni 2021–14 Juli 2021	7
Gambar 2.7 Posisi Bumi, Bulan, dan Matahari Saat Terjadinya Pasang Surut.....	10
Gambar 2.8 Grafik Pasang Surut.....	12
Gambar 2.9 Storm Surge	14
Gambar 2.10 Proses Terjadinya Badai	15
Gambar 2.11 Storm Surge pada Pantai Berlantai Landai	15
Gambar 2.12 Storm Surge pada Pantai Berlantai Curam	15
Gambar 2.13 Staggered Grid	17
Gambar 2.14 Triangular Grid	18
Gambar 2.15 Pengukuran Pola Arus Laut Saat Surut	21
Gambar 3.1 Pergerakan Sedimen di Zona Litoral.....	22
Gambar 3.2 Masalah Keteknikpantaian yang Diakibatkan Cross Shore Trasnport	25
Gambar 3.3 Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dan Diameter Sedimen, D, dengan Kecepatan Jatuh, wf	26
Gambar 3.4 Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dengan Diameter Sedimen, D, untuk Jenis Pasir Pantai	27
Gambar 3.5 Tabulasi Nilai Grafik Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dengan Diameter Sedimen, D, untuk Jenis Pasir Pantai	27
Gambar 3.6 Transpor Sedimen Sepanjang Pantai	28
Gambar 3.7 Hasil Pengukuran Transpore Sedimen Sepanjang Pantai	29
Gambar 4.1 Pemceah Gelombang Lepas Pantai.....	32
Gambar 4.2 Rubble Mound Breakwater.....	34
Gambar 4.3 Stone Asphalt Breawater	34
Gambar 4.4 Cellular–Steel Sheet–Pile Breakwaters	35
Gambar 4.5 Concrete Caisson Breakwater.....	35
Gambar 4.6 Contoh Pengaplikasian Groin.....	36
Gambar 4.7 Groin di Sitges, Catalunya, Barcelona.....	36

Gambar 4.8 Potongan Melintang Tipikal Revetment.....	38
Gambar 4.9 Revetment Beton	38
Gambar 4.10 Revetment Beton Fleksibel.....	39
Gambar 4.11 Revetment Batu	39
Gambar 4.12 Contoh Struktur Seawall.....	39
Gambar 4.13 Seawall.....	40
Gambar 4.14 Sheet Piles Bulkhead	40
Gambar 4.15 Bulkhead Beton	41
Gambar 4.16 Bulkhead Kayu	41
Gambar 4.17 Timber Crib Bulkhead	42
Gambar 4.18 Gabion Bulkhead	42
Gambar 4.19 Indian River Inlet, United States	43
Gambar 4.20 Tiga Metode Sand Nourishment.....	44
Gambar 4.21 Reboisasi Pantai di Sulawesi Selatan	45
Gambar 4.22 Tanaman Mangrove	46
Gambar 4.23 Persebaran Mangrove di Indonesia.....	46
Gambar 5.1 Diagram Alir Perhitungan Tinggi Gelombang.....	47
Gambar 5.2 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin di Darat dan di Laut	48
Gambar 5.3 Fetch	49
Gambar 5.4 Diagram Alir Perhitungan Peramalan Gelombang Laut Dalam	51
Gambar 5.5 Pencatatan Gelombang di Suatu Tempat.....	52
Gambar 5.6 Hubungan Umur Rencana, Periode Ulang, dan Probabilitas Kejadian Terlampaui.....	54
Gambar 5.7 Diagram Alir Perhitungan Elevasi Muka Air Rencana	56
Gambar 5.8 Wave Set-Up dan Wave Set-Down	58
Gambar 5.9 Elevasi Muka Air Rencana	61
Gambar 5.10 Diagram Alir Perhitungan Deformasi Gelombang.....	61
Gambar 5.11 Refraksi Gelombang	62
Gambar 5.12 Hukum Snell untuk Refraksi Gelombang.....	63
Gambar 5.13 Gelombang Sebelum Terdifraksi.....	64
Gambar 5.14 Gelombang Sesudah Terdifraksi	64
Gambar 5.15 Difraksi Gelombang di Belakang Rintangan.....	65
Gambar 5.16 Tabel Koefisien Difraksi Gelombang, K' , Dari Gelombang Datang Dengan Sudut θ Sebagai Fungsi r/L dan β (Bagian I)	66

Gambar 5.17 Tabel Koefisien Difraksi Gelombang, K' , Dari Gelombang Datang Dengan Sudut θ Sebagai Fungsi r/L dan β (Bagian II).....	67
Gambar 5.18 Tipe Gelombang Pecah.....	69
Gambar 5.19 Penentuan Tinggi Gelombang Pecah.....	70
Gambar 5.20 Penentuan Kedalaman Gelombang Pecah	70
Gambar 5.21 Beberapa Jenis Batu Pelindung pada Pemecah Gelombang.....	71
Gambar 5.22 Breakwater Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Dua Sisi	72
Gambar 5.23 Breakwater Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Dua Sisi	73
Gambar 5.24 Fondasi (a) dan Pelindung Kaki (b) Dari Tumpukan Batu.....	77
Gambar 5.25 Angka Stabilitas N_s Untuk Fondasi dan Pelindung Kaki	77
Gambar 5.26 Tekanan Gelombang Pada Pemecah Gelombang Rigid	79
Gambar 5.27 Perencanaan Struktur Pelindung Pantai Buatan	81
Gambar 6.1 Persebaran Zona Pada Pantai.....	82
Gambar 6.2 Matriks Penentuan Jenis Tanaman	84
Gambar 6.3 Jenis Tanaman Untuk Zona 4	85
Gambar 6.4 Tahapan Pemodelan Transpor Sedimen	86
Gambar 6.5 Lokasi Proyek	87
Gambar 6.6 Periode Ulang Storm Surge	89
Gambar 6.7 Grafik Proyeksi Kenaikan Muka Air Laut USACE	89
Gambar 6.8 Kenaikan Muka Air Laut Ketiga Kondisi.....	90
Gambar 6.9 Resesi Pantai Dade, Florida Menggunakan Metode Bruun.....	90
Gambar 6.10 Volume Pasir Resesi Pantai Dade, Florida Menggunakan Metode Bruun....	91
Gambar 6.11 Wind Rose	91
Gambar 6.12 Wave Rose	92
Gambar 6.13 Hasil Perhitungan Sediment Budget di Sisi Utara Dade	93
Gambar 6.14 Hasil Perhitungan Sediment Budget di Sisi Selatan Dade.....	94
Gambar 6.15 Timeline dan Lokasi Penambahan Pasir Pantai Dade	96
Gambar 6.16 Tahapan Pemodelan Transpor Sedimen	97
Gambar 6.17 Alternatif Desain Sand Motor.....	99
Gambar 6.18 Perkembangan Morfologi Alternatif Sand Motor Berbentuk Kait	99
Gambar 6.19 Penambahan Luasan Pantai Pada Setiap Alternatif.....	100
Gambar 6.20 Estimasi Volume Penambahan Pasir Setiap 5 Tahun Pada Setiap Alternatif	100
Gambar 7.1 Peta Pulau Male'	102

Gambar 7.2 Flowchart Perhitungan Datum.....	104
Gambar 7.3 Elevasi.....	105
Gambar 7.4 Grafik Koefisien Transmisi, K_t , Karena Karang Buatan	108
Gambar 7.5 Penyusunan Breakwater Berdasarkan Tiga Skenario	110
Gambar 7.6 Penyusunan Breakwater Pada Setiap Zona.....	112
Gambar 7.7 Penampang Melintang Breakwater Pada Zona I dan Zona III	113
Gambar 7.8 Penampang Melintang Breakwater Pada Zona II	114
Gambar 7.9 Tampak Atas Pembangunan Breakwater Pada Pantai Selatan Pulau Male, Maladewa.....	114

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta Harmonik Pasang Surut.....	11
Tabel 5.1 Penentuan Jenis dan Nilai Gelombang Representatif.....	53
Tabel 5.2 Persamaan Untuk Menghitung Elevasi Muka Air Laut	60
Tabel 5.3 Koefisien K_D untuk Berbagai Jenis Butiran	74
Tabel 5.4 Koefisien Lapis.....	76
Tabel 6.1 Elevasi Muka Air Laut.....	88
Tabel 6.2 Erosi Tahunan.....	95
Tabel 6.3 Volume Pasir Merestorasi Proyek Sebelumnya	95
Tabel 6.4 Timeline Penambahan Volume Pasir Pantai Dade	96
Tabel 7.1 Hasil Trace Survey.....	106
Tabel 7.2 Perbedaan Skenario Pada Zona I.....	111

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kerja Praktik, KP, merupakan mata kuliah wajib yang diambil saat mahasiswa memasuki Semester 7 dan telah menempuh 110 sks. KP seharusnya dilakukan dalam bentuk keikutsertaan dalam proyek di lapangan. Namun, KP digantikan dengan pembuatan tutorial perencanaan karena kondisi yang tidak memungkinkan untuk melakukan proyek di lapangan. Pembuatan tutorial ini ditujukan agar mahasiswa yang tidak dapat/tidak diizinkan untuk mengikuti KP secara lapangan dapat mendapat nilai KP yang setara dengan KP di lapangan.

Penulis melakukan kegiatan KP dengan membuat tutorial mengenai “Perencanaan Bangunan Pengaman Pantai Alamiah dan Buatan”. Tutorial tersebut dibuat dengan tujuan sebagai panduan dalam sebuah perencanaan bangunan pengaman pantai juga sebagai tambahan ilmu bagi mahasiswa. Pencarian sumber untuk perencanaan melalui *website* atau buku sangatlah banyak tersedia. Tutorial “Perencanaan Bangunan Pengaman Pantai Alamiah dan Buatan” ini ditujukan untuk merangkum berbagai sumber yang digunakan untuk merencanakan bangunan pantai. Hal ini diharapkan dapat mempermudah perencana dalam merencanakan bangunan pantai.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik dari wilayah pantai?
2. Bagaimana proses yang terjadi di pantai?
3. Bagaimana jenis dan karakteristik struktur bangunan pantai?
4. Bagaimana konsep perencanaan struktur buatan?
5. Bagaimana konsep perencanaan bangunan pantai alami?

1.3. Tujuan

1. Memahami karakteristik dari wilayah pantai
2. Memahami proses-proses yang terjadi di pantai
3. Memahami jenis dan karakteristik struktur bangunan pantai
4. Memahami konsep perencanaan struktur bangunan pantai
5. Memahami konsep perencanaan bangunan pantai alami

BAB 2

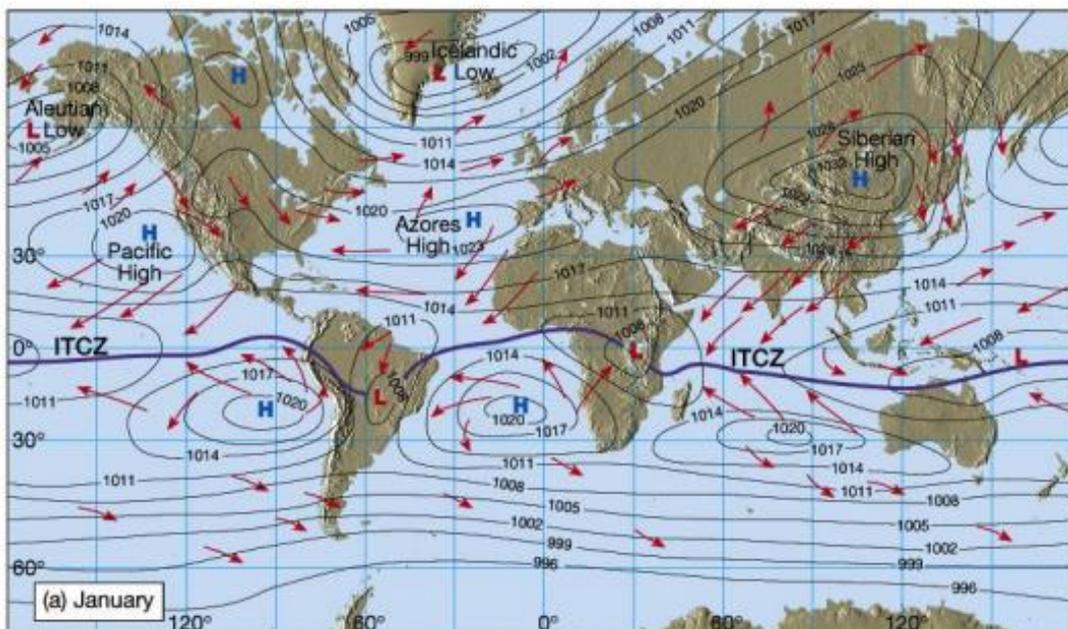
KARAKTERISTIK WILAYAH PANTAI

2.1. Fenomena Pantai

Fenomena-fenomena yang terjadi antara satu pantai dengan pantai lain sangatlah beragam. Hal tersebut membuat kondisi profil pantai-pantai berbeda satu sama lain. Berikut ini akan dibahas beberapa fenomena yang dapat mempengaruhi kondisi pantai.

2.1.1. Angin

Gelombang yang terjadi di suatu pantai terjadi karena adanya hembusan angin. Tentunya setiap daerah memiliki kecepatan dan tekanan angin yang berbeda-beda. Tekanan angin yang berbeda-beda dapat mempengaruhi perpindahan sedimen yang terdapat di pantai. Dalam hal ini, pengelompokan angin terbagi menjadi 2 jenis yaitu: *low pressure* dan *high pressure*. Daerah yang memiliki tekanan angin yang rendah (*low-pressure*) cenderung sering terjadi *tropical cyclones*. *Tropical cyclones*, atau biasa dikenal sebagai angin puting beliung dan angin topan, hanya terjadi jika suhu permukaan air di atas 26.5°C , kecepatan angin kencang, dan terjadi hujan yang lebat. Persebaran tekanan angin di bumi dapat dilihat di Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Southern Shift
Sumber: (Lutgens, et al., 2013)

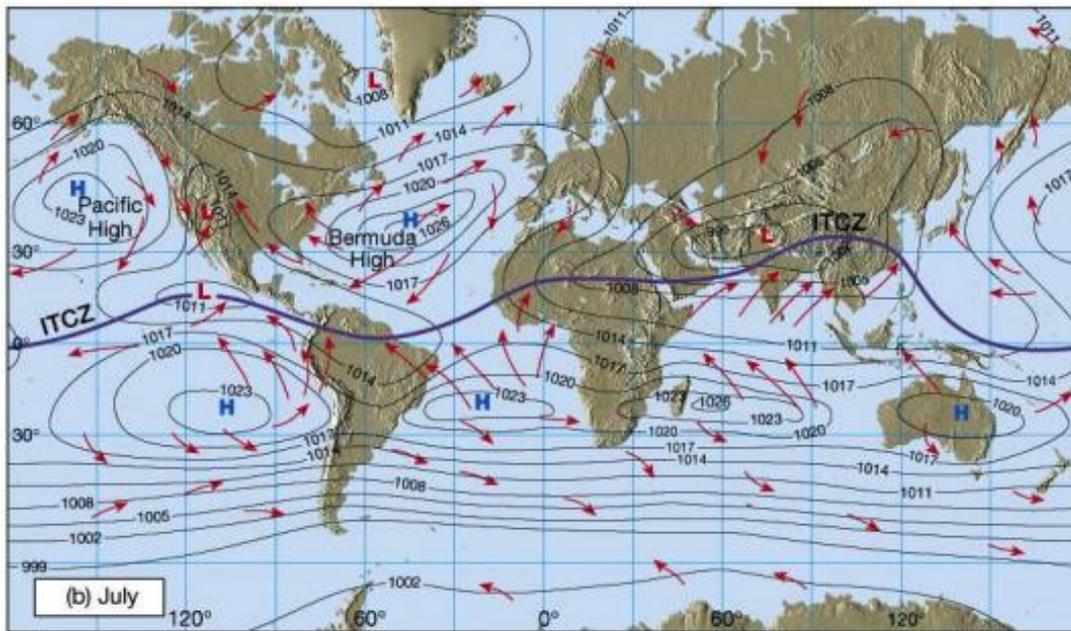
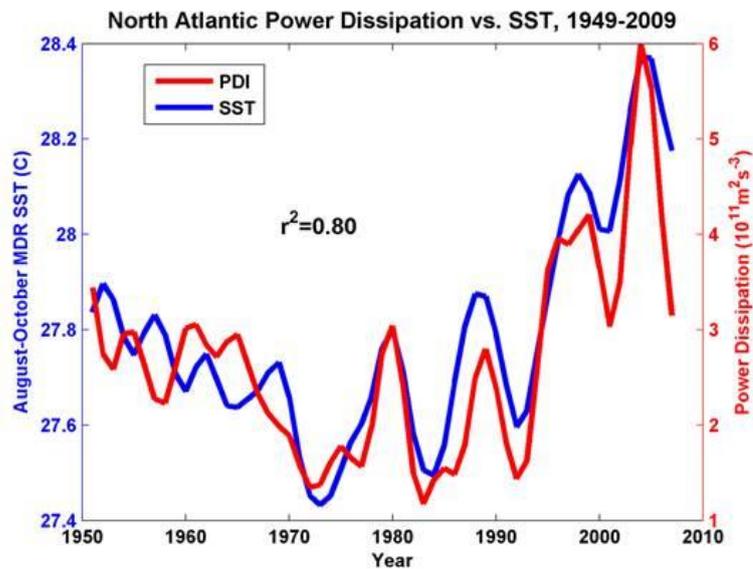


Figure 5.4 A) Southern shift of ITCZ in January.
 B) Northern shift of ITCZ in July. (Lutgens and Tarbuck, 2001).

Gambar 2.2 Northern Shift
 Sumber: (Lutgens, et al., 2013)

Data informasi angin biasanya dijumpai dalam bentuk *time-series data* seperti di Gambar 2.3. Contohnya seperti periode ulang topan/badai. Data-data ini sangatlah penting dalam mendesain perlindungan pantai sehingga disarankan untuk digunakan dalam perhitungannya.



Gambar 2.3 Data Time Series Topan
 Sumber: (Emanuel, t.thn.)

2.1.2. Gelombang

Dari faktor penyebabnya, gelombang dibagi menjadi 2 jenis yaitu: gelombang laut (*sea*) dan gelombang besar (*swell*). Pembagian ini didasarkan pada kecepatan angin lokal. Gelombang laut merupakan gelombang yang datang lebih lambat kecepataannya daripada kecepatan angin lokal, sedangkan gelombang besar kecepataannya lebih cepat dari kecepatan angin lokal. Pada ilmu teknik pantai, gelombang besar ini diartikan sebagai gelombang yang tidak berhubungan dengan kecepatan angin lokal pada suatu tempat terkait karena timbulannya berasal angin yang jauh dari tempat tersebut.

Dari faktor periode gelombang, gelombang terbagi menjadi 2 yaitu: gelombang pendek (*short wave*) dan gelombang panjang (*long wave*). Gelombang pendek adalah gelombang yang periodenya kurang dari 20 detik. Untuk gelombang panjang, periode gelombangnya antara 20 – 30 detik dan 40 menit. Gelombang laut (*sea*) dan gelombang besar (*swell*) ini termasuk ke dalam gelombang pendek (*short wave*). Tsunami dan gelombang yang biasa digunakan berselancar termasuk ke dalam gelombang panjang (*long wave*).

2.1.3. Perubahan Iklim

Perubahan iklim memiliki bagian besar dalam perubahan bentuk pantai. Hal tersebut dikarenakan dapat memicu berbagai macam hal, diantaranya:

- Kenaikan suhu air laut
- Kenaikan tinggi muka air laut
- Perubahan arah angin
- Perubahan presipitasi
- Perubahan *acidification* (pengurangan pH air laut)

Namun, yang terpenting dari beberapa hal tersebut adalah kenaikan tinggi muka air laut. Kenaikan ini dapat menimbulkan pergerakan muka air di darat dan laut, kenaikan muka air tanah di pantai, mengurangi gradasi antara sungai dengan pesisir sungai, dan pembesaran bentuk pada zona tidal (pasang-surut) di daerah sungai dan pesisir sungai. Timbulnya berbagai perubahan itu dapat memicu:

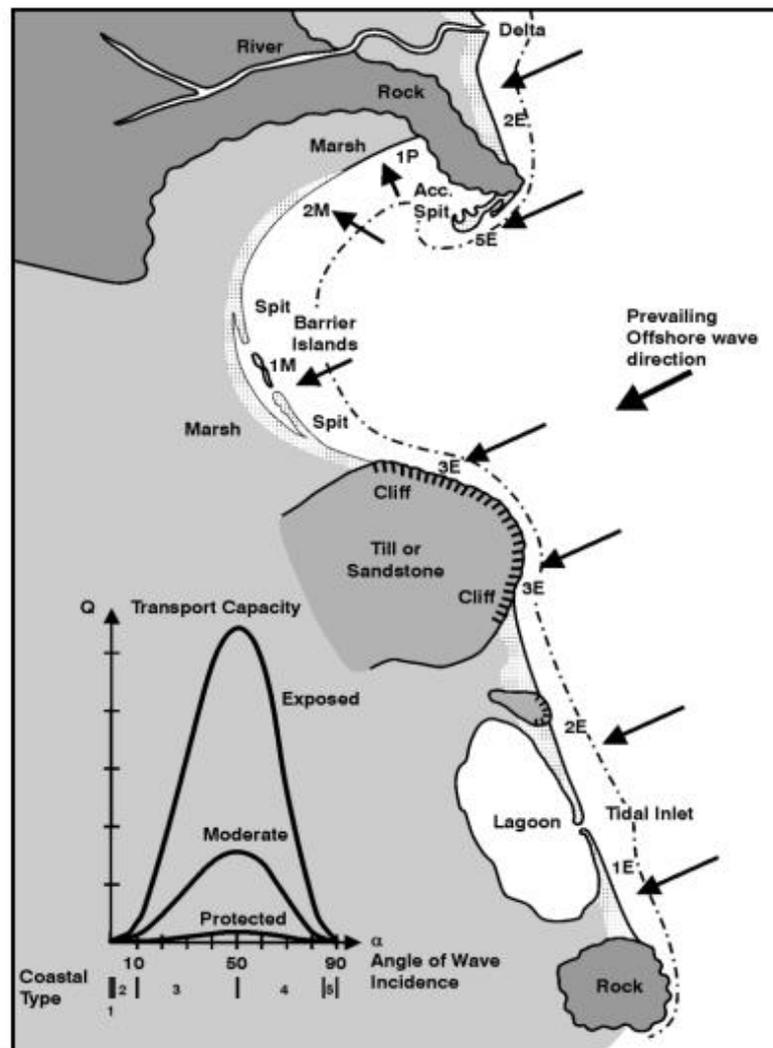
- Banjir pantai di kawasan dataran rendah yang dilindungi
- Mengubah lahan basah di pantai/pesisir
- Permasalahan *backwater*, meningkatkan salinitas dan *sluice practice*
- Erosi pantai/pesisir

2.1.4. Bentuk Pantai atau Pesisir

Nearly straight coastlines

Nearly straight coastlines dibagi menjadi 5 jenis:

- *Perpendicular wave approach* (sudut *off-shore* mendekati 0°)
- *Nearly perpendicular wave approach* (sudut *off-shore* $1^\circ - 10^\circ$, *net transport* kecil – sedang)
- *Moderate oblique wave approach* (sudut *off-shore* $10^\circ - 50^\circ$, *net transport* besar)
- *Very oblique wave approach* (sudut *off-shore* $50^\circ - 85^\circ$, *net transport* besar)
- *Nearly coast-parallel wave approach* (sudut *off-shore* $>85^\circ$, *net transport* mendekati 0)



Gambar 2.4 Klasifikasi Bentuk Pantai/Pesisir

Sumber: (Mangor, et al., 2017)

Table 9.1 Coastal classification as a function of the angle of incidence and wave exposure for littoral coasts and link to typical coastal landforms in relation to geological features.

Coastal Type	Angle of Incidence (0° = shore normal)	Exposure	Main Coastal Characteristics
1P	0°	Protected	Marsh
1M		Moderate	Narrow stable sand beach, barrier island, spits
1E		Exposed	Wide stable sand beach, barrier island, spits
2P	1°- 10°	Protected	Marsh
2M		Moderate	Narrow stable sand beach, barrier island, spits
2E		Exposed	Wide stable sand beach, barrier island, spits
3P	10° – 50°	Protected	Marsh
3M		Moderate	Narrow sand/shingle beach of varying stability, cliff or dunes
3E		Exposed	Wide sand/shingle beach of varying stability, cliff or dunes
4P	50° – 85°	Protected	Marsh
4M		Moderate	Narrow unstable sand/shingle beach, cliff or dunes, salients
4E		Exposed	Wide unstable sand/shingle beach, cliff or dunes, salients
5P	85° – 90°	Protected	Marsh
5M		Moderate	Sandy beach, accumulative land forms, spits
5E		Exposed	Sandy beach, accumulative land forms, spits

Gambar 2.5 Tabel Klasifikasi Bentuk Pantai/Pesisir
Sumber: (Mangor, et al., 2017)

Pembagian bentuk pantai ini digolongkan lebih lanjut menurut jenis eksposur gelombang yang datang. Gelombang tersebut terbagi menjadi 3, yaitu:

- **P**, *protected*, $H_{s,12h/y} < 1m^*$
- **M**, *moderately exposed*, $1m < H_{s,12h/y} < 3m^*$
- **E**, *exposed*, $H_{s,12h/y} > 3m^*$

(*Menurut “*once per year event*”; $H_{s,12h/y}$ adalah tinggi gelombang yang didata dalam waktu 12 jam/tahun)

2.2. Pembangkitan Gelombang

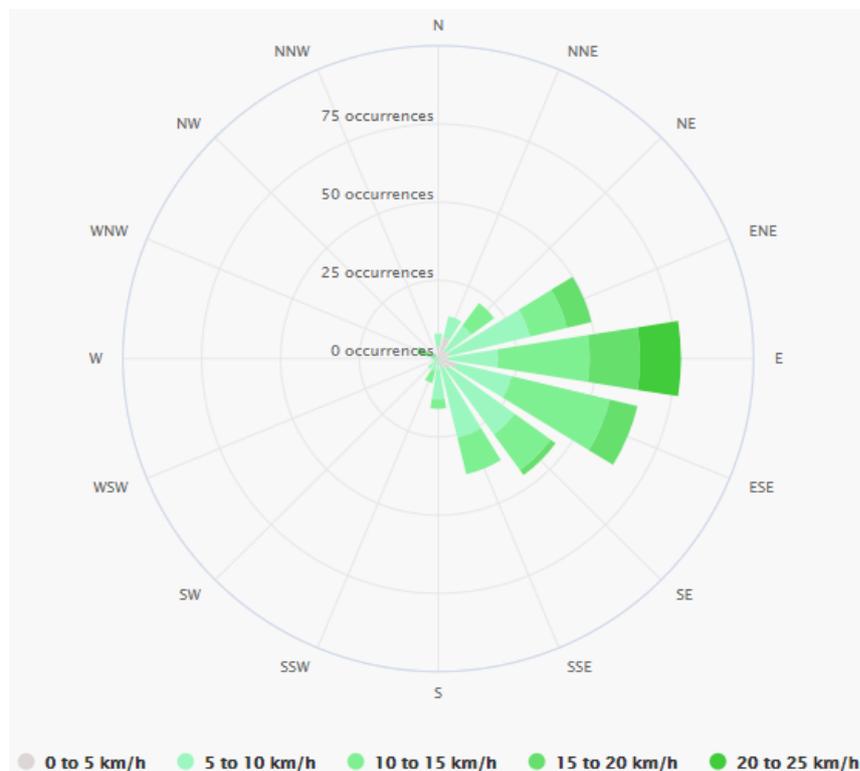
Gelombang umumnya dihasilkan akibat dari adanya hembusan angin. Pada bagian 2.1. telah disebutkan bahwa terdapat 2 bangkitan gelombang yang disebabkan oleh angin yaitu *sea wave* dan *swell wave*. Dari kedua gelombang tersebut, yang dapat diperhitungkan adalah *sea wave* karena bangkitannya berasal dari data angin lokal tempat yang ditinjau. Sedangkan *swell wave* lebih susah diperkirakan karena bangkitan anginnya tidak diketahui dari mana asalnya. Untuk mengetahui kondisi angin tersebut diperlukan analisis lapangan mengenai data angin. Data tersebut berupa pencatatan kondisi angin di waktu-waktu tertentu sehingga akan susah untuk dimengerti karena berisi banyak sekali pencatatan. Maka dari itu, data-data tersebut

disimpulkan dalam bentuk mawar angin (*wind rose*) agar lebih mudah dipahami. Langkah perhitungan pembangkitan gelombang:

1. Data angin
2. Data diringkas menjadi bentuk prosentase kejadian
3. Prosentase tersebut dapat digambarkan menjadi *wind rose*
4. Untuk kecepatan angin yang terukur harus dikoreksi terlebih dahulu
5. Mencari H_s dan T_s gelombang tiap kecepatan angin (dapat digunakan metode Darbyshire atau Sverdrup Munk Bretschneider, SMB)
6. Dapat dicari periode ulang dengan metode Weibull atau Gumbel

2.2.1. Data Angin

Wind rose atau mawar angin merupakan data kondisi angin, kecepatan angin dan arah angin pada suatu wilayah. Pencatatannya dilakukan dengan rentang interval yang singkat dan dalam kurun waktu tertentu seperti: 1 minggu, 1 bulan, 1 tahun, atau lebih lama lagi. Data-data yang sudah terkumpul kemudian digolongkan sesuai arah anginnya sehingga prosentase waktu dari setiap arah angina dapat ditetapkan. Biasanya data arah angin dibagi menjadi beberapa sudut arah yang besarnya sama, bisa 8 arah mata angin atau 16 mata angin.



Gambar 2.6 Wind Rose Jakarta tanggal 30 Juni 2021–14 Juli 2021
Sumber: https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/jakarta_indonesia_1642911?

2.2.2. Periode Ulang Gelombang

Secara statistik, probabilitas nilai gelombang dengan kala ulang tertentu dapat dipengaruhi oleh adanya panjang atau jumlah data yang tersedia. Dengan semakin banyak jumlah data maka hasil yang diperoleh akan lebih baik. Umumnya, nilai tinggi gelombang dengan kala ulang akan meningkat sesuai dengan penambahan tahun. Tinggi gelombang (Hsr) untuk 100 tahun akan lebih tinggi daripada tinggi gelombang untuk 50 tahun. Tinggi gelombang (Hsr) 50 tahun akan lebih tinggi daripada tinggi gelombang untuk 25 tahun dan seterusnya. Peningkatan tinggi gelombang signifikan periode ulang sangat ditentukan oleh jumlah kejadian gelombang dan nilai periode ulang. Dengan semakin tinggi jumlah kejadian dan periode ulang tertentu, maka tinggi gelombang signifikan akan semakin besar begitupun sebaliknya (Purwanto, et al., 2020).

Penjelasan lebih lanjut mengenai periode gelombang 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun sebagai berikut. Periode ulang gelombang 50 tahun bukan berarti dalam waktu 50 tahun akan terjadi 1 kali gelombang 50 tahunan melainkan itu diibaratkan sebagai prosentase terjadinya. Perhitungannya dapat diperkirakan bahwa gelombang tersebut jika dilampaui k kali dalam periode panjang M tahun akan mempunyai nilai k/M yang kira-kira sama dengan $1/50$ (Triatmodjo, 2016) atau kemungkinan terjadinya 2% (jarang terjadi). Jadi, untuk gelombang dengan periode ulang 2 tahunan akan lebih sering terjadi (50%) atau dijumpai daripada gelombang periode ulang lain. Untuk probabilitas, digunakan tipe probabilitas yang memiliki standar deviasi terbesar dan tingkat kepercayaan yang paling tinggi. Tipe – tipe probabilitas meliputi:

- Distribusi Weibull (paling sering digunakan)
- Distribusi Gumbel (paling sering digunakan)
- Distribusi Rayleigh
- Distribusi Pearson
- Distribusi Normal
- Distribusi Log-Normal
- Distribusi Eksponensial
- Distribusi Gamma

2.3. Fluktuasi Muka Air

Muka air pada lautan sangatlah dinamik. Salah satu fenomena yang menunjukkan bahawa laut itu dinamik adalah fluktuasi muka air. Fluktuasi muka air disebabkan oleh beberapa hal seperti gaya gravitasi bulan, gelombang, dan angin. Maksud muka air adalah elevasi rata – rata air pada periode waktu tertentu dimana cukup lama untuk menghilangkan efek osilasi.

2.3.1. Pasang Surut

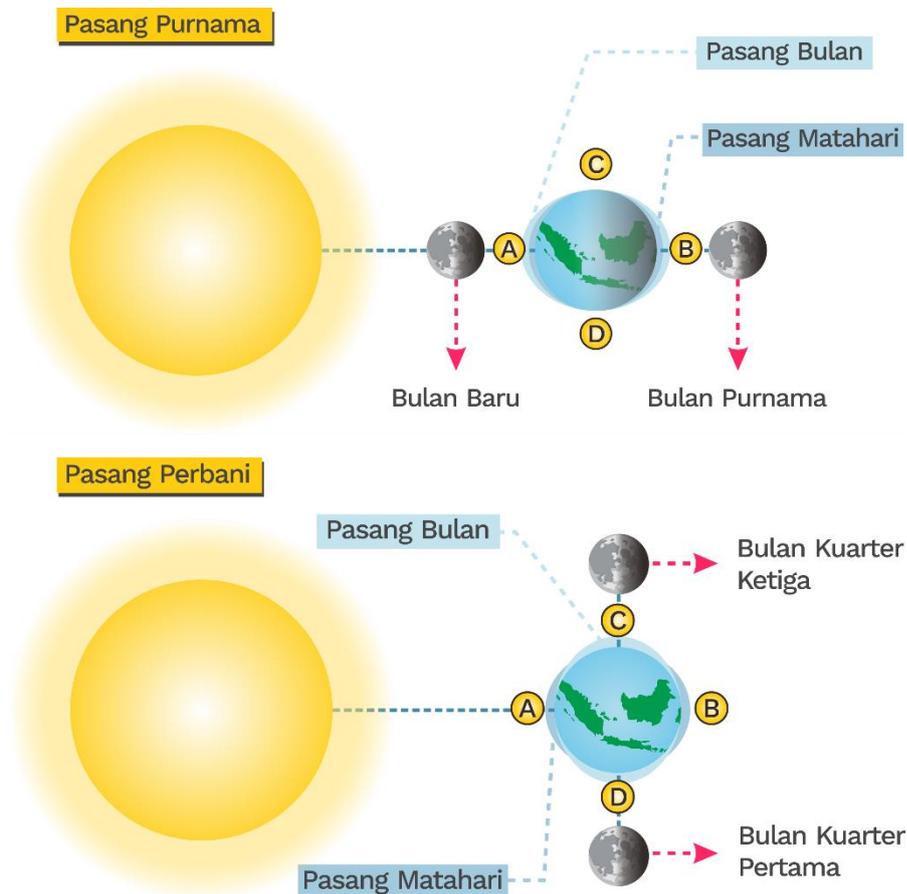
Pasang surut merupakan fenomena pantai yang pasti terjadi dan tampak nyata di laut. Fenomena ini ditandai dengan berubahnya naik turunnya muka air laut. Gerakan naik turunnya muka air laut disebabkan oleh pengaruh gaya gravitasi bumi dengan benda langit, dalam hal ini bumi dengan bulan dan bumi dengan matahari. Hukum gravitasi universal memaparkan gaya gravitasi antar dua massa seperti di Persamaan 2.1.

$$F = \frac{G(m_1 \times m_2)}{d^2} \quad (2.1)$$

Artinya, gaya gravitasi bergantung pada besar massa tiap benda dan jarak antara dua massa tersebut. Gravitasi berbanding lurus dengan massa tetapi berbanding terbalik terhadap jarak. Pasang surut air laut dipengaruhi dua gaya tarik menarik, yang pertama gaya tarik menarik bumi dengan bulan dan yang kedua gaya tarik menarik bumi dengan matahari. Berdasarkan hukum gravitasi universal, dapat disimpulkan bahwa gaya tarik menarik bumi dengan bulan lebih besar karena jarak antara bumi dan bulan lebih dekat daripada bumi dengan matahari. Pembentukan pasang surut air laut sangat dipengaruhi oleh gerakan utama matahari dan bulan yaitu (Ongkosongo, 1989).

1. Revolusi bulan terhadap bumi, dimana orbitnya berbentuk elips dan memerlukan periode untuk menyelesaikan revolusi itu selama 29,5 hari
2. Revolusi bumi terhadap matahari dengan orbitnya berbentuk elips, periode yang diperlukan adalah 365,25 hari
3. Perputaran bumi terhadap sumbunya sendiri, periode yang diperlukan untuk gerakan ini adalah 24 jam

Ada dua jenis pasang surut yaitu, pasang surut purnama dan pasang surut perbani. Kedua pasang surut ini memiliki perbedaan karakter yang disebabkan oleh perbedaan posisi bulan dan matahari. Pasang surut purnama terjadi karena bumi, bulan, dan matahari berada dalam satu garis lurus. Pasang surut purnama terjadi dua kali, pada saat bulan baru dan bulan purnama. Karakteristik pasang surut ini adalah pasang yang sangat tinggi dan surut yang sangat rendah. Pasang surut perbani terjadi ketika bumi, bulan, dan matahari membentuk sudut 90°. Pasang surut perbani terjadi dua kali dalam tiap satu revolusi bulan, yaitu pada saat bulan kuartier pertama dan terakhir. Tinggi pasang surut yang terjadi pun minimum. Posisi bumi, bulan, dan matahari saat terjadinya pasang surut diperlihatkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Posisi Bumi, Bulan, dan Matahari Saat Terjadinya Pasang Surut
 Sumber: [Prolog Materi - Definisi, Proses & Kategori Pasang Surut Air Laut | Zenius.net](#)

2.3.2. Konstanta Harmonik Pasang Surut

Konstanta harmonik pasang surut adalah komponen yang dapat membangkitkan pasang surut yang bersifat periodik, sesuai dengan gaya-gaya penyebabnya yang juga bersifat periodik. Komponen – komponen tadi disebabkan oleh pergerakan bulan mengitari bumi, dan bumi dan bulan mengitari matahari. Dalam hal ini juga berlaku Hukum Gravitasi Newton dimana jarak antara bumi, bulan, dan matahari memengaruhi besarnya nilai gaya. Konstanta pasang surut mempunyai nilai amplitudo dan periode yang berbeda-beda, tetapi secara garis besar dapat dikategorikan ke dalam 4 (empat) kelompok (Poerbandono, 1999), yaitu:

1. Konstanta harmonik periode setengah harian (*semidiurnal period tide*), terdiri dari M₂, S₂, N₂, dan K₂.
2. Konstanta harmonik periode harian (*diurnal period tide*), terdiri dari K₁, O₁, dan P₁.
3. Konstanta harmonik periode panjang (*long period tide*), terdiri dari M_f dan M_m.
4. Konstanta harmonik perairan dangkal (*shallow water tide*), terdiri dari M₄ dan MS₄

Karakter tiap konstanta harmonik pasang surut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Konstanta Harmonik Pasang Surut

Nama Konstanta	Simbol	Periode (jam)	Kecepatan (°/jam)	Jenis
<i>Principal lunar</i>	<i>M2</i>	12,42	28,984	<i>Semi diurnal</i>
<i>Principal solar</i>	<i>S2</i>	12,00	30,000	
<i>Larger lunar elliptic</i>	<i>N2</i>	12,66	28,440	
<i>Luni solar semi diurnal</i>	<i>K2</i>	11,98	30,082	
<i>Luni solar diurnal</i>	<i>K1</i>	23,93	15,041	<i>Diurnal</i>
<i>Principal lunar diurnal</i>	<i>O1</i>	25,82	13,943	
<i>Principal solar diurnal</i>	<i>P1</i>	24,07	14,959	
<i>Lunar fortnightly</i>	<i>Mf</i>	327,82	1,098	<i>Long Period</i>
<i>Lunar monthly</i>	<i>Mm</i>	661,30	0,544	
<i>Main lunar</i>	<i>M4</i>	6,21	57,968	<i>Shallow Water</i>
<i>Main luni-solar</i>	<i>MS4</i>	6,20	58,084	

2.3.3. Tipe Pasang Surut

Tipe pasang surut di suatu daerah dapat diketahui menggunakan rumus bilangan *Formzahl* pada Persamaan 2.2.

$$F = \frac{AK_1 + AO_1}{AM_2 + AS_2} \quad (2.2)$$

Keterangan:

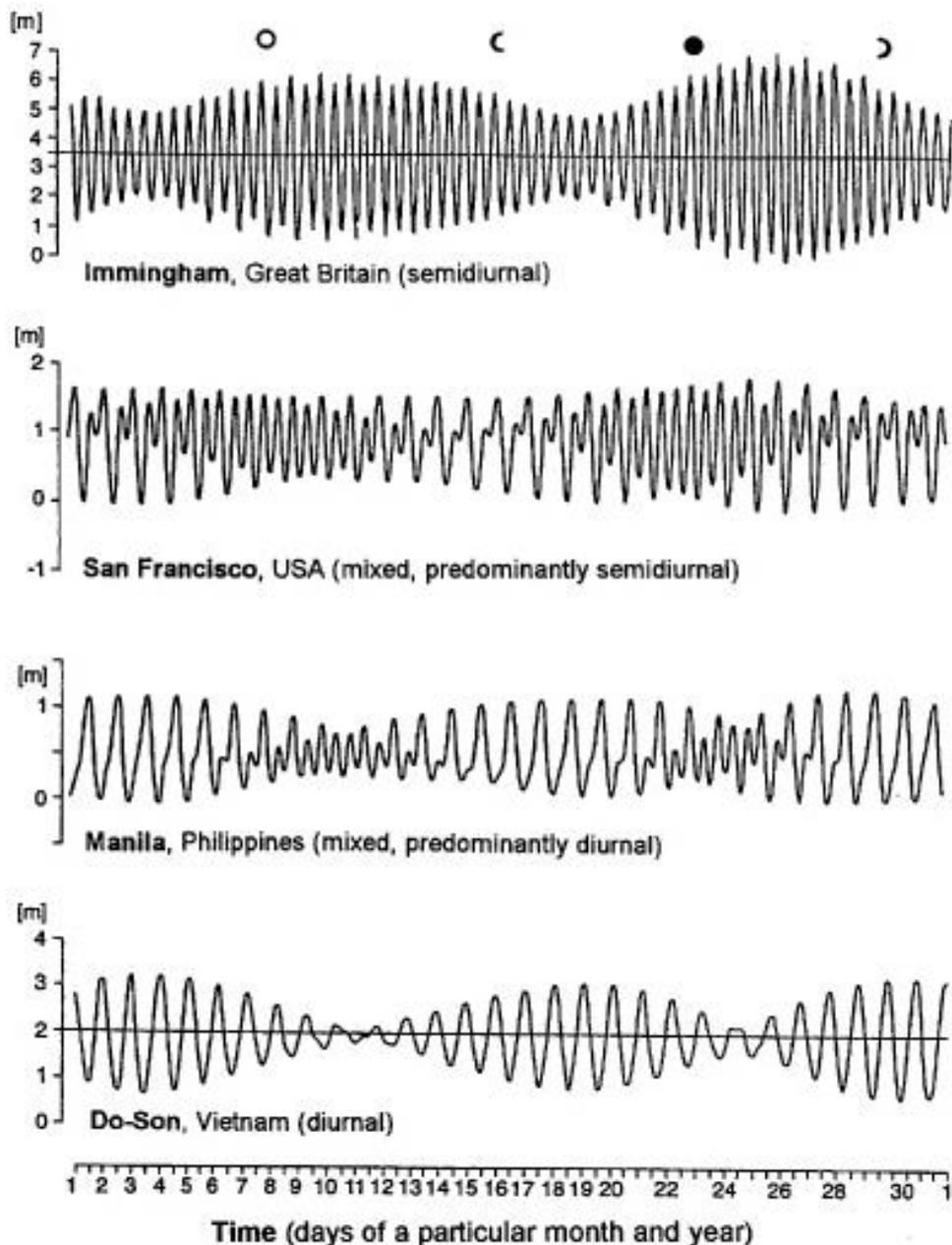
AK_1 dan AO_1 = amplitudo konstanta pasang surut harian tunggal utama

AM_2 dan AS_2 = amplitudo konstanta pasang surut harian ganda utama

Hasil perhitungan bilangan *Formzahl* kemudian dikelompokkan dan diklasifikasikan menjadi tipe pasang surut sebagai berikut:

1. Pasang surut harian ganda (*semidiurnal*), jika nilai F berada di rentang 0 – 0,25.
2. Pasang surut campuran condong harian ganda (*mixed semidiurnal*) jika nilai F berada di rentang 0,25 – 1,5.
3. Pasang surut harian tunggal (*diurnal*) jika nilai F berada di rentang 1,5 – 2,5.
4. Pasang surut campuran condong harian tunggal (*mixed diurnal*) jika nilai F berada di rentang 2,5 – 3.

Hasil pengukuran pasang surut bisa ditampilkan dalam bentuk grafik dan digolongkan ke dalam empat klasifikasi. Gambar 2.8 adalah contoh dari grafik pasang surut dan berbagai tipenya.



Gambar 2.8 Grafik Pasang Surut
Sumber: (Schwartz, 2005)

2.3.4. Elevasi Muka Air Desain

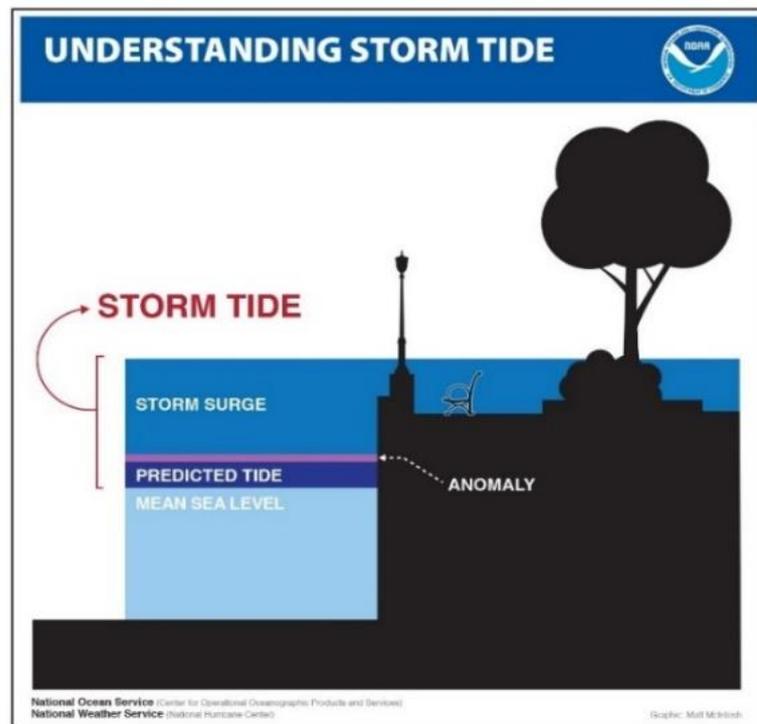
Saat mendesain bangunan pantai pasti memerlukan elevasi muka air desain. Selain itu, juga diperlukan datum sebagai elevasi acuan dalam mendesain. Karena jika menggunakan acuan yang salah maka struktur yang dibangun bisa mengalami kegagalan. Misal elevasi dermaga terlalu rendah atau terlalu tinggi sehingga kapal gagal bersandar. Ada banyak tipe datum elevasi muka air untuk mendesain bangunan pantai. Semua diklasifikasikan berdasarkan

elevasi muka air dalam berbagai kondisi. Berikut beberapa istilah dalam penentuan datum elevasi muka air desain

1. Muka air tinggi (*high water level*), muka air tertinggi yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut
2. Muka air rendah (*low water level*), kedudukan air terendah yang dicapai pada saat air surut dalam satu siklus pasang surut
3. Muka air tinggi rerata (*mean high water level*, MHWL), adalah rerata dari muka air tinggi selama periode 18,6 tahun
4. Muka air rendah rerata (*mean low water level*, MLWL), adalah rerata dari muka air rendah selama periode 18,6 tahun
5. Muka air laut rerata (*mean sea level*, MSL), adalah muka air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata
6. Muka air tinggi tertinggi (*highest high water level*, HHWL), adalah air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati
7. Muka air rendah terendah (*lowest low water level*, LLWL), adalah air terendah pada saat pasang surut purnama atau bulan mati
8. *Higher high water level*, adalah air tertinggi dari dua air tinggi dalam satu hari, seperti dalam pasang surut tipe campuran
9. *Lower low water level*, adalah air terendah dari dua air rendah dalam satu hari

2.3.5. Storm Surge

Storm surge (gelombang badai) adalah gelombang dengan panjang gelombang sampai beberapa kilometer yang dibangkitkan oleh badai dan penurunan tekanan atmosfer yang disebabkan suatu kejadian cuaca yang ekstrim (Garrison & Ellis, 2016). Salah satu akibat yang ditimbulkan *storm surge* adalah *storm tide* yang ketinggian gelombangnya di luar perkiraan. Ilustrasi *storm tide* bisa dilihat di Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Storm Surge
 Sumber: (NOAA, 2020)

Badai terjadi karena suhu lautan yang hangat dan udara lembab. Hal ini menyebabkan permukaan air bertekanan rendah dan udara hangat mengalir ke atas dan menciptakan awan badai. Udara yang mengalir ke atas juga bergerak melingkar. Inilah yang menjadi ciri khas badai, yaitu awan yang bergerak melingkar dengan pusat pusaran di tengah badai. Tekanan udara dan kecepatan angin pada bagian terluar badai sangatlah tinggi. Pada bagian tengah bada terdapat mata badai. Mata badai sangatlah tenang dan tidak ada awan yang terbentuk di atasnya. Tekanan udara di mata badai rendah dan menjadi suplai utama dalam pembentukan badai. Tekanan pada mata badai disebut *Central Pressure Index* atau CPI. CPI dapat dijadikan acuan dalam memprediksi terjadinya *storm surge*.

Efek dari udara bertekanan rendah adalah mengalirnya udara ke atas dan cukup kuat untuk membawa air laut terbawa ke atas. Hasilnya adalah tonjolan atau *bulge* di permukaan air. *Bulge* akan bergerak terdorong oleh angin yang dihasilkan badai dan bergerak sejalan dengan badai. Jika badai bergerak menuju pesisir, maka *bulge* pun akan ikut terbawa dan membanjiri daratan. Proses terjadinya badai ditampilkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Proses Terjadinya Badai
 Sumber: (NOAA, 2020)

Faktor yang memengaruhi *storm surge* bermacam – macam karena ini merupakan fenomena yang kompleks. Ada kecepatan gerak badai, ukuran, sudut datang, tekanan pada mata badai, dan kontur pantai. Kontur pantai yang dangkal dan landai berpotensi menciptakan *storm surge* yang lebih besar karena gelombang yang datang mengalami pendangkalan. Jika pantai lebih curam, maka *storm surge* lebih susah mencapai daratan. Kedua kondisi tadi akan diperlihatkan pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Storm Surge pada Pantai Berlantai Landai
 Sumber: (NOAA, 2020)



Gambar 2.12 Storm Surge pada Pantai Berlantai Curam
 Sumber: (NOAA, 2020)

Membuat prediksi muka air saat terjadi *storm surge* sangat penting dalam mendesain bangunan pantai. Bangunan pantai memiliki umur rencana tertentu dimana struktur tersebut harus berfungsi sampai pada umur yang direncanakan. Untuk itu perlu mengetahui frekuensi

terjadinya badai di lokasi bangunan pantai. Salah satu metode untuk mengetahuinya adalah menggunakan analisis statistik pada data historis gelombang. Akumulasi data selama bertahun – tahun dan diambil dari wilayah di sekitarnya menghasilkan prediksi yang cukup akurat. Akan tetapi, pemodelan matematis atau pemodelan fisik menggunakan data badai hipotesis untuk memperkirakan *storm surge* yang mungkin terjadi lebih umum digunakan. Kesulitan dalam memodelkan secara fisik di laboratorium adalah keterbatasan dalam merepresentasikan beberapa faktor penyebab *storm surge* seperti efek angin langsung dan Efek Coriolis. Sehingga pemodelan matematis lebih sering dipakai untuk memodelkan *storm surge*.

Metode empiris juga dipakai untuk memprediksi *storm surge*. Metode ini menggunakan teori analisis sederhana yang bersifat praktis. (Silvester, 1971) merumuskan cara memprediksi *storm surge*. Persamaan 2.3 digunakan untuk memprediksi *storm surge* di danau.

$$\frac{S}{d} = \frac{K_{10}U_{10}^2L}{2gd^2} \quad (2.3)$$

dengan:

d = kedalaman danau

U_{10} = kecepatan angin 10 meter di atas permukaan air

L = panjang danau atau fetch angin

S = amplitudo gelombang badai

$K_{10} = 3.3 \times 10^6$ (koefisien gesek angin)

Untuk danau yang tidak berbentuk segi empat, perlu dikalikan koefisien N pada ruas $\frac{S}{d}$

Perhitungan prediksi *storm surge* pada tepi pantai, Silvester mengasumsikan kedalaman d_1 untuk sisi terdalam dan d_2 untuk sisi terdangkal. Jika L adalah panjang ... dan F adalah panjang *fetch* angin maka d_2/d_1 dapat diasumsi L/x , dimana x adalah jarak. Untuk kasus kecepatan angin yang seragam, maka perumusannya ditampilkan pada Persamaan 2.4.

$$\frac{S}{d_1} = \frac{KU^2L}{gd_1^2 \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)} \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (2.4)$$

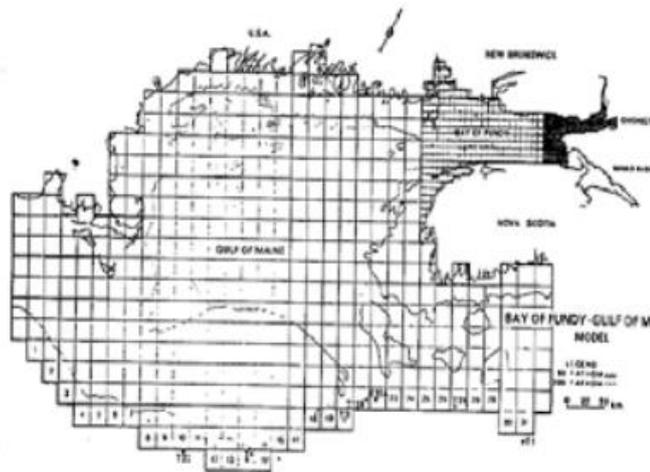
Penurunan satu hektopascal pada tekanan atmosfer mengakibatkan kenaikan satu cm pada permukaan air. Rao dan Mazumdar (1966) merumuskan Persamaan 2.5 untuk *storm surge*.

$$S = B + P + X + F \quad (2.5)$$

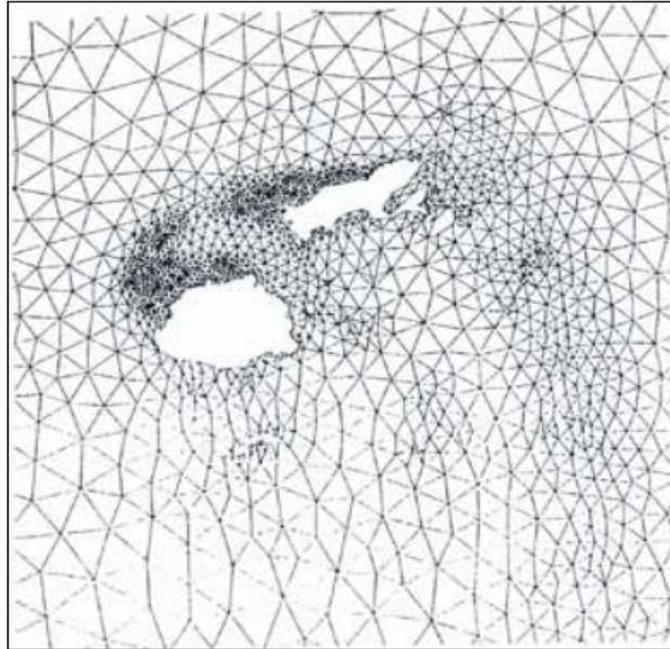
Kemudian (Rao & Mazumdar, 1966) menggabungkan B, P, dan X dan membuat perumusan baru untuk S seperti pada Persamaan 2.6.

$$S = \frac{5}{3} \times 4.5 \times 10^{-6} \overline{W^2} \sum_{d1, D1}^{dn, \Delta Dn} \frac{\Delta D}{D} + \frac{5}{3} \frac{\Delta Pa}{g} \times 10^{-3} \quad (2.6)$$

Metode berikutnya adalah metode numerik. Pendekatan ini juga sering dipakai untuk memprediksi *storm surge*. Awalnya, metode *finite difference* dengan *grid* persegi digunakan untuk perhitungan. Kelemahan pemodelan ini adalah metode perhitungan yang masih menggunakan *structured/staggered grid* yang mengakibatkan hasil pemodelan yang tidak mendetail pada geometri pantai yang kompleks. Dengan adanya masalah di atas, maka dicobalah pengaplikasian *finite element method* pada perhitungan *storm surge*. Hasilnya, metode ini menghasilkan pemodelan yang akurat dan tidak memerlukan banyak perhitungan. *Grid* yang dipakai memiliki jarak antar *nodal* yang variatif, berbeda dengan *finite difference* yang jarak antar nodalnya konstan. Biasanya digunakan *irregular triangular grid*. Karena jarak antar *nodal* yang variatif, domain yang dihasilkan akan meminimalisasi perhitungan dan meningkatkan akurasi (Blain et al, 1998). Jarak *nodal* yang variatif juga mempermudah untuk memodelkan bentuk pantai yang rumit sehingga bisa dihasilkan resolusi yang lebih tinggi. Misal, untuk memodelkan garis pantai yang rumit dibutlah *grid* dengan jarak *nodal* yang rapat sehingga menghasilkan resolusi yang tinggi. Lalu, untuk memodelkan daerah yang tidak terlalu rumit bisa menggunakan jarak antar *nodal* yang lebih renggang. Perbedaan kedua *grid* akan ditampilkan di Gambar 2.13 dan Gambar 2.14.



Gambar 2.13 Staggered Grid
Sumber: (WMO, 2011)(WMO, 2011)



Gambar 2.14 Triangular Grid
Sumber: (WMO, 2011)

2.4. Arus

Air yang berada di laut selalu bergerak. Pergerakan itu disebabkan oleh beberapa hal seperti: angin, gaya gravitasi benda langit, pergerakan lempeng tektonik dan lainnya. Arus air laut adalah pergerakan massa air di seluruh lautan secara vertikal dan horizontal sehingga menuju keseimbangannya (Hutabarat & Evans, 2006). Pergerakan arus dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain arah angin, perbedaan tekanan air, perbedaan densitas air, gaya Coriolis dan arus ekman, topografi dasar laut, arus permukaan, *upwelling*, dan *downwelling*. Arus dipengaruhi oleh paling tidak tiga faktor yaitu:

1. Bentuk topografi dasar lautan dan pulau – pulau yang ada di sekitarnya

Beberapa sistem lautan utama di dunia dibatasi oleh massa daratan dari tiga sisi dan pula oleh arus equatorial counter di sisi yang keempat. Batas – batas ini menghasilkan sistem aliran yang hampir tertutup dan cenderung membuat aliran mengarah dalam suatu bentuk bulatan.

2. Gaya Coriolis dan arus ekman

Gaya Coriolis memengaruhi aliran massa air, di mana gaya ini akan membelokkan arah mereka dari arah yang lurus. Gaya Coriolis juga yang menyebabkan timbulnya perubahan-perubahan arah arus yang kompleks susunannya yang terjadi sesuai dengan semakin dalamnya kedalaman suatu perairan.

3. Perbedaan densitas serta *upwelling* dan *downwelling*

Perbedaan densitas menyebabkan timbulnya aliran massa air dari laut yang dalam di daerah kutub selatan dan kutub utara ke arah daerah tropik.

Arus laut juga dikelompokkan menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Berdasarkan penyebab terjadinya (Pickard & Pond, 1983):

a. Arus pasang surut

Arus yang disebabkan oleh gaya tarik menarik antara bumi dan benda benda angkasa. Arus pasut ini merupakan arus yang gerakannya horizontal

b. Arus termohaline

Perubahan densitas timbul karena adanya perubahan suhu dan salinitas anantara 2 massa air yang densitasnya tinggi akan tenggelam dan menyebar dibawah permukaan air sebagai arus dalam dan sirkulasinya disebut arus termohalin.

c. Turbulensi

Suatu gerakan yang terjadi pada lapisan batas air dan terjadi karena adanya gaya gesekan antar lapisan

d. Tsunami

Tsunami merupakan gelombang besar yang terbentuk akibat gempa bumi, longsor, letusan gunung berapi atau peristiwa lainnya di laut/samudera.

e. Angin

Angin adalah faktor yang membangkitkan arus. Arus yang ditimbulkan oleh angin mempunyai kecepatan yang berbeda menurut kedalaman. Kecepatan arus yang dibangkitkan oleh angin memiliki perubahan yang kecil seiring penambahan kedalaman hingga tidak berpengaruh sama sekali.

2. Berdasarkan letaknya (Ningsih, 2002):

a. Arus permukaan

Arus permukaan adalah arus yang bergerak di permukaan laut. Faktor pembangkit arus permukaan disebabkan oleh adanya angin yang bertiup diatasnya. Tenaga angin memberikan pengaruh terhadap arus permukaan sekitar 2% dari kecepatan angin itu sendiri. Kecepatan arus ini akan berkurang sesuai dengan makin bertambahnya kedalaman perairan sampai pada akhirnya angin tidak berpengaruh pada kedalaman 200 meter (Bernawis, 2000).

Karena dibangkitkan oleh angin, arah arus laut permukaan (atas) mengikuti arah angin yang ada. Khususnya di Asia Tenggara karena arah angin musim sangat terlihat perubahannya antara musim barat dan musim timur maka arus laut permukaan juga banyak dipengaruhi. Arus musim barat ditandai oleh adanya aliran air dari arah utara melalui laut Cina bagian atas, laut Jawa, dan laut Flores. Adapun pada musim timur sebaliknya mengalir dari arah selatan

b. Arus dalam

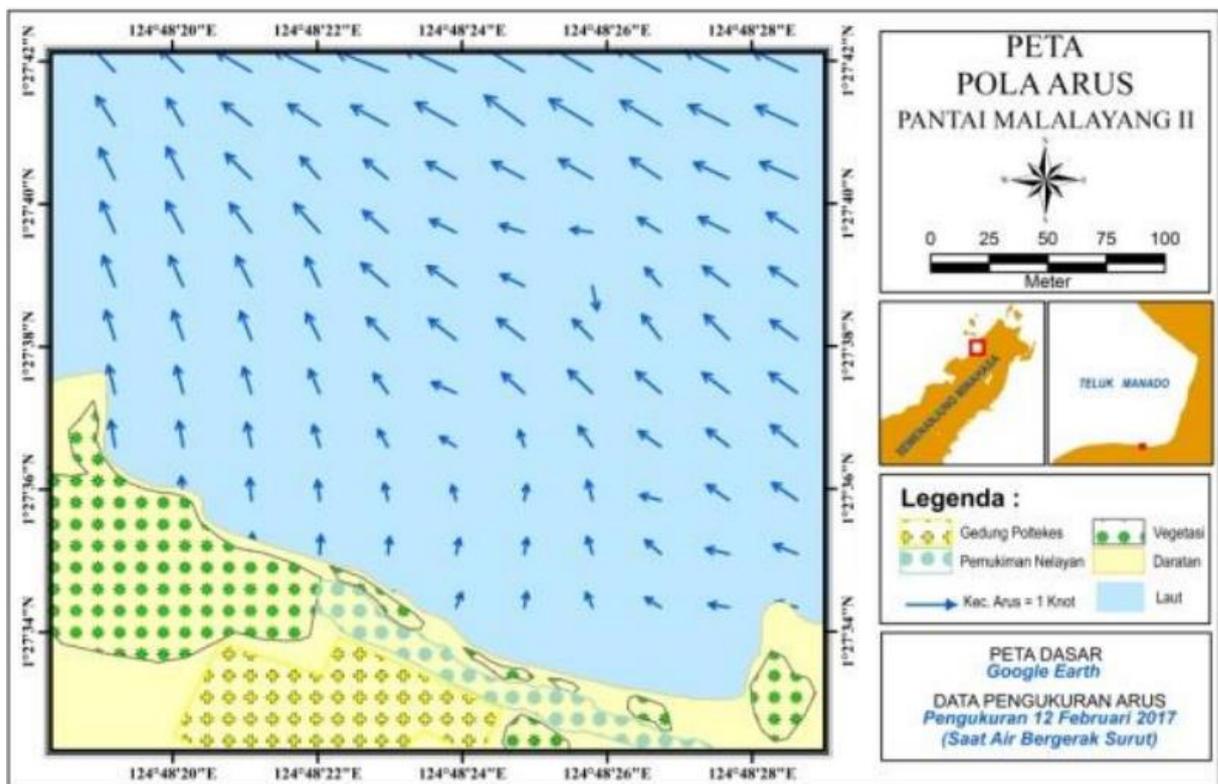
Arus dalam adalah arus yang bergerak di bawah permukaan laut. Selain pergerakan arah arus mendatar, angin dapat menimbulkan arus air vertikal yang dikenal dengan *upwelling* dan *downwelling* di daerah-daerah tertentu. Proses *upwelling* adalah suatu proses massa air yang didorong ke atas dari kedalaman sekitar 100 sampai 200 meter. Angin yang mendorong lapisan air permukaan mengakibatkan kekosongan di bagian atas, akibatnya air yang berasal dari bawah menggantikan kekosongan yang berada di atas. Oleh karena air yang dari kedalaman lapisan belum berhubungan dengan atmosfer, maka kandugan oksigennya rendah dan suhunya lebih dingin dibandingkan dengan suhu air permukaan lainnya.

Terjadinya arus di lautan disebabkan oleh faktor internal seperti perbedaan densitas air laut, gradien tekanan mendatar dan gesekan lapisan air dan faktor eksternal seperti gaya tarik matahari dan bulan yang dipengaruhi oleh tahanan dasar laut dan gaya coriolis, perbedaan tekanan udara, gaya gravitasi, gaya tektonik dan angin (Gross, 1990).

Arus di laut bisa diukur secara insitu atau lewat satelit altimetri. Pengukuran arus secara insitu adalah pengukuran secara langsung dengan dua metode pengukuran, yaitu pada titik tetap (Euler) dan metode dengan benda hanyut atau *drifter* (Langlarian). Alat pengukur paling sederhana adalah menggunakan *free-floating drogued buoy* untuk mengukur kecepatan dan sebuah kompas bidik untuk mencari arah. *Free-floating drogued buoy* dilepas di perairan dengan diikat sebuah tali dengan jarak tertentu, lalu diukur waktunya sampai tali tersebut menegang. Kecepatan arus bisa diukur dengan membagi jarak dengan waktu. Sedangkan arah bisa dicari dengan menggunakan kompas bidik. Peralatan modern yang sering digunakan saat ini dalam pengukuran arus adalah ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) dan *current meter*. ADCP menggunakan Asas Doppler mengenai perambatan bunyi, dimana partikel renik didalam air dapat memantulkan bunyi. *Current meter* merupakan pengembangan dari *free-floating drogued buoy* yang berfungsi untuk mengukur kecepatan dan arah arus laut berdasarkan metode Eularian. Pengukuran arus laut dengan *current meter* ini menggunakan metode eularian dimana metode ini merupakan pengukuran arus dengan menggunakan metode

gelombang sinusoidal. Prinsip kerja alat ini adalah baling-baling dimana sewaktu alat dimasukkan akan ada perputaran dari baling-baling tersebut sehingga menimbulkan percepatan. *Current meter* mempunyai 2 bagian yaitu untuk mengukur kecepatan dan arah.

Sistem altimetri berkembang sejak tahun 1975, saat diluncurkannya satelit GEO-3. Pada tahun 1990 satelit altimetri mulai diluncurkan seperti ERS-1 (1991-1996), Topex/Poseidon (sejak 1992) dan ERS-2 (sejak 1995). Altimetri adalah teknik untuk mengukur ketinggian. Satelit altimetri menghitung waktu yang digunakan oleh pulsa dari pemancar ke permukaan laut dan kembali lagi sebagai echo menuju penerima. Tujuan peluncuran sensor altimetri adalah mengamati sirkulasi lautan global, memantau volume dari lempengan es di kutub dan mengamati perubahan muka laut rata-rata global. *Sea Surface Height* (SSH) adalah jarak antara permukaan laut dengan ellipsoida referensi (jika kedalaman laut secara akurat tidak diketahui). Nilai SSH diperoleh dengan memperhitungkan pengaruh ketinggian permukaan laut yang akan terjadi tanpa gangguan (angin, ombak, gelombang, dan lainnya), dan juga sirkulasi lautan atau dinamika topografi. Salah satu contoh hasil pengukuran arus laut ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Pengukuran Pola Arus Laut Saat Surut
Sumber: (Djabar, et al., 2017)

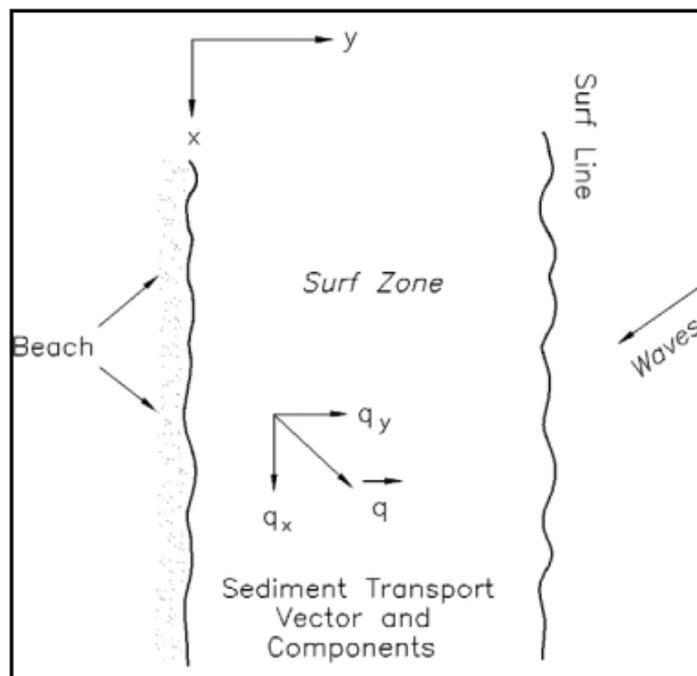
BAB 3

PROSES PANTAI

3.1. Perubahan Garis Pantai

Daerah pesisir merupakan daerah pertemuan antara laut dan darat. Daerah ini selalu mengalami perubahan karena terjadi pertemuan dua energi, yaitu energi yang berasal dari lautan dan yang daratan. Selain itu, sebagian besar energi gelombang terdisipasi di daerah ini. Fenomena – fenomena yang terjadi di daerah laut, baik yang diakibatkan oleh gaya dari luar maupun dalam, memengaruhi garis pantai. Garis pantai adalah garis batas pertemuan daratan dan air laut dengan posisi tidak tetap dan dapat berpindah sesuai dengan pasang surut air laut dan erosi pantai yang terjadi (Triatmodjo, 2016). Ada beberapa penyebab berubahnya garis pantai, yaitu:

1. Gelombang pasang surut yang kadang mendorong garis batas naik ke daratan dan kadang menyurutkan garis batas tersebut ke laut setiap hari.
2. Gelombang angin (gelombang yang tampak) di laut yang jelas terlihat membuat garis batas ini maju mundur
3. Perubahan garis batas ini maju mundur karena pengaruh musim angin.



Gambar 3.1 Pergerakan Sedimen di Zona Litoral
Sumber: (Dean, et al., 2008)

Perubahan garis pantai juga disebabkan oleh proses *littoral transport* yang diartikan sebagai pergerakan sedimen di zona litoral yang diakibatkan oleh gelombang dan arus. Proses

littoral transport sendiri digolongkan menjadi dua jenis pergerakan, yaitu *cross shore sediment transport* dan *longshore sediment transport* seperti di Gambar 3.1. Kedua proses mengakibatkan perpindahan material baik menuju atau meninggalkan pantai. Perpindahan sedimen menuju pantai disebut *swash*. Sementara perpindahan sedimen meninggalkan garis pantai disebut *backwash*. Perubahan posisi garis pantai digambarkan oleh satu garis kontur, sedangkan jumlah sedimen yang terpindah digambarkan dengan volume sedimen.

Pantai memiliki pertahanan alami dalam menghadapi terjangan gelombang dan arus dimana bentuknya akan terus – menerus beradaptasi menyesuaikan energi gelombang yang menerpa sehingga dapat diminimalisasi. Sistem pertahanan alami ini dapat berupa karang penghalang, atol, *sand dune*, *longshore bar*, kemiringan dasar pantai dan vegetasi yang hidup di pantai (bakau, api-api, dan sebagainya).

3.2. Angkutan Sedimen Tegak Lurus Pantai

Angkutan sedimen tegak lurus pantai, *cross shore sediment transport*, adalah pergerakan sedimen yang rata – rata arah pergerakannya tegak lurus garis pantai. Pergerakan sedimen yang tegak lurus pantai dibagi menjadi dua, yaitu *onshore transport* dan *offshore transport*. *Onshore transport* adalah perpindahan sedimen menuju pantai. Sedangkan *offshore transport* adalah perpindahan sedimen meninggalkan pantai.

Proses *onshore – offshore transport* dipengaruhi oleh deformasi gelombang berupa pendangkalan. Pada laut dalam, partikel air bergerak melingkar. Seiring bertambahnya kedalaman, efek dari gerakan partikel air menjadi lemah dan tidak berdampak pada sedimen di bagian dasar laut dalam. Semakin dekat gelombang bergerak menuju pantai, maka bentuk pergerakan partikel air berubah dari lingkaran ke elips karena terjadi pengurangan tinggi pada puncak gelombang. Seiring bertambahnya kedalaman, pergerakan partikel air menjadi gerak horisontal saja. Gelombang pada bagian dasar pantai itulah yang akan membawa sedimen ke pantai. Saat gelombang sudah mencapai ketinggian maksimumnya di pesisir, maka gelombang akan bergerak kembali menuju laut membawa sedimen dari kembali ke laut.

Perubahan pada periode dan amplitudo gelombang memengaruhi proses *onshore – offshore transport*. Proses *onshore transport* didominasi oleh gelombang beramplitudo rendah dan berperiode lama sehingga lebih banyak sedimen yang terbawa ke pantai. Kondisi ini biasanya terjadi pada musim panas. Sedangkan proses *offshore transport* didominasi oleh gelombang beramplitudo tinggi dan berperiode singkat sehingga lebih banyak sedimen yang tergerus dari pantai. Kondisi ini biasanya terjadi pada musim dingin. *Cross shore sediment transport* menjadi faktor penyebab beberapa masalah keteknikpantaian seperti (Dean, et al., 2008):

1. Respon pantai terhadap badai
2. Ekuilibrium pantai
3. Profile nourishment
4. Respon garis pantai terhadap kenaikan muka air
5. Perubahan garis pantai yang diakibatkan oleh pergantian musim
6. *Overwash*
7. *Scouring* pada struktur pantai
8. Pergerakan pasir di sekitar bangunan pantai

Gambar 3.2 menunjukkan ilustrasi dari kedelapan masalah keteknikpantaian.

Ada dua pandangan dalam memodelkan *cross shore sediment transport* yaitu *open loop* dan *close loop*. *Open loop* artinya hasil profil pantai setelah sedangkan *close loop* artinya terdapat profil pantai final. Pemodelan *close loop* mengasumsikan profil ekuilibrium pantai, yaitu profil pantai setelah terjadinya keseimbangan gaya antara *onshore transport* dan *offshore transport*. Jika terjadi perubahan pada profil pantai, maka profil pantai akan kembali pada profil ekuilibriumnya dengan asumsi bahwa kondisi pantai adalah sama dalam jangka waktu yang panjang. Ciri ciri profil pantai yang ekuilibrium adalah (Dean, et al., 2008)

1. Kemiringan dasar pantai cenderung landai jika sedimen terdiri dari butiran halus.
2. Kemiringan dasar pantai cenderung datar jika gelombang yang terjadi curam
3. Sedimen berbutir halus terendapkan di bagian pantai yang dalam sedangkan sedimen berbutir kasar terendapkan di bagian pantai yang lebih dangkal
4. Bentuk garis pantai cenderung cekung

Untuk menentukan profil ekuilibrium suatu pantai, (Dean, 1977) memaparkan bawah terdapat gaya perusak yang berperan yaitu:

1. Energi gelombang disipasi per satu unit volume air
2. Energi gelombang disipasi per satu unit luas permukaan
3. Tegangan geser

Dari ketiga gaya itulah terbentuk Persamaan 3.1 untuk profil ekuilibrium pantai.

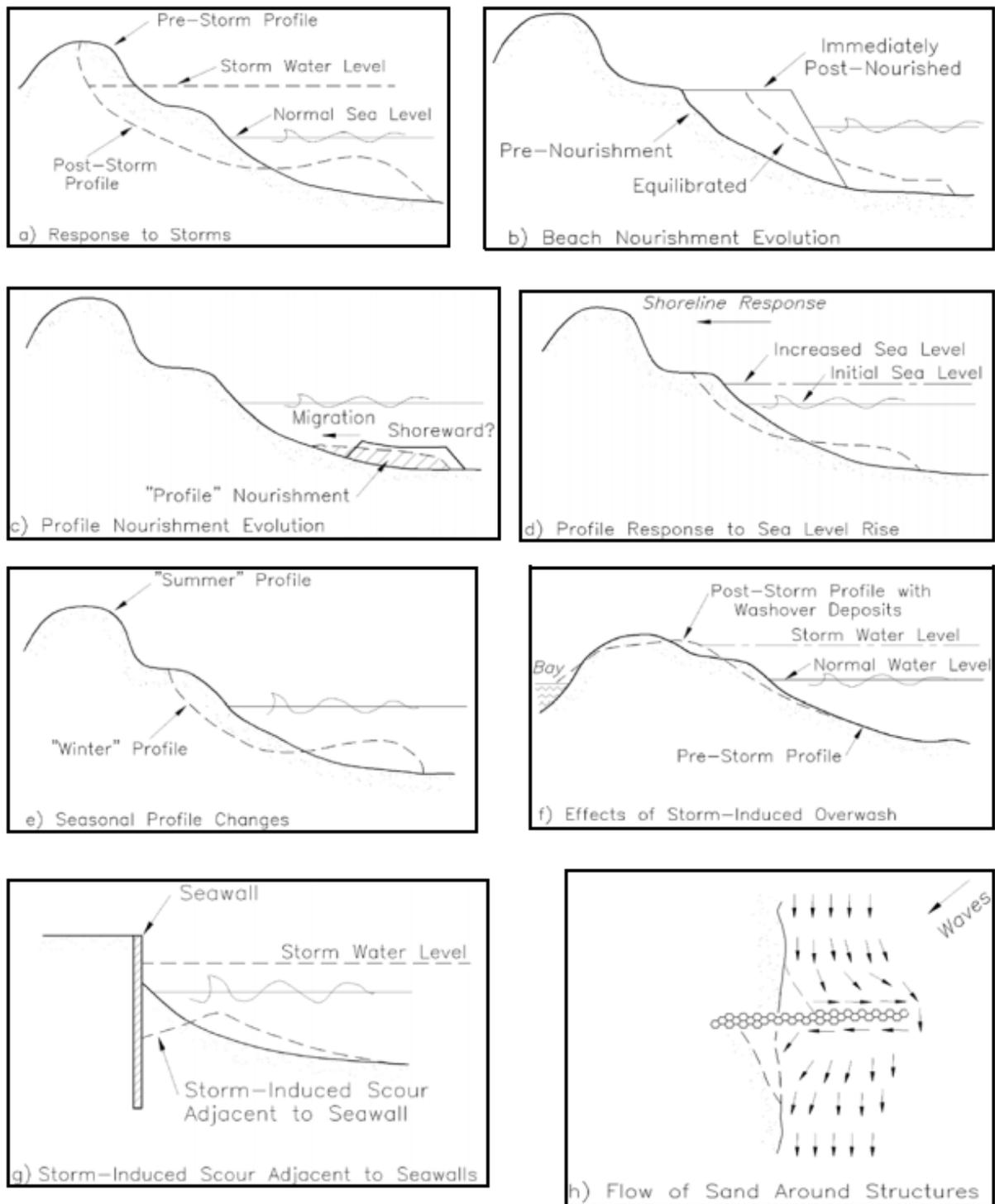
$$h = Ay^n \quad (3.1)$$

dengan:

h = kedalaman air laut

A = faktor skala terkait kecepatan jatuh sedimen

y = jarak dari lepas pantai



Gambar 3.2 Masalah Keteknikpantaian yang Diakibatkan Cross Shore Transport
 Sumber: (Dean, et al., 2008)

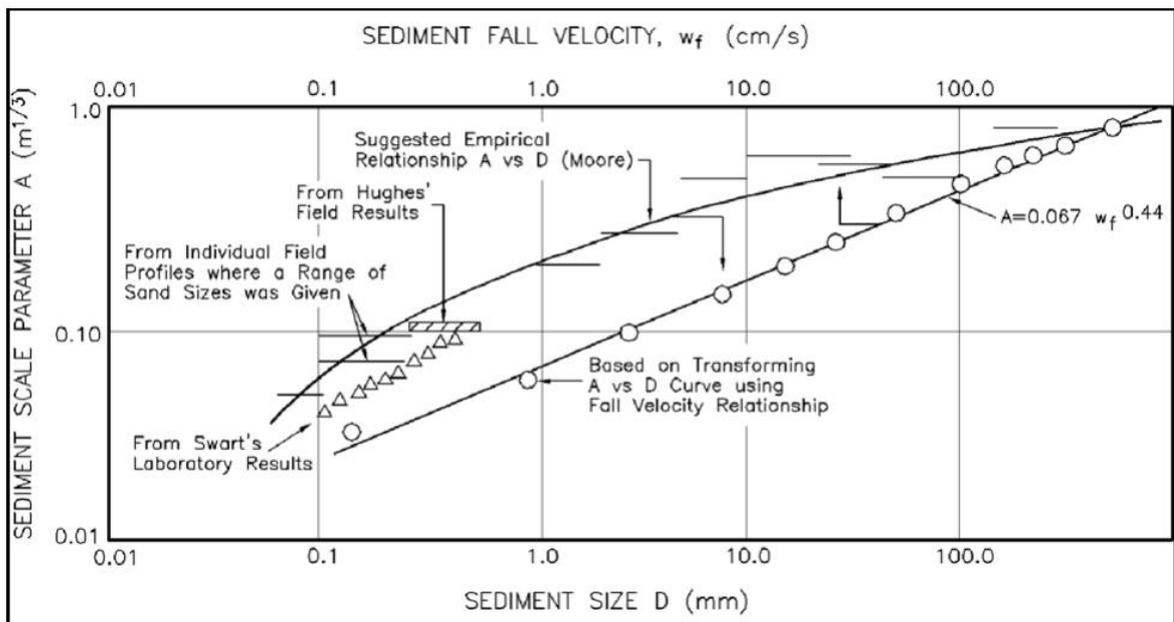
(Bruun, 1954) menemukan bahwa nilai n adalah $2/3$. Hal ini juga di dukung oleh (Dean, 1977) melalui perhitungannya dengan memakai energi gelombang disipasi per satu unit volume air sebagai gaya paling dominan. Hasilnya ditampilkan pada Persamaan 3.2.

$$h = Ay^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

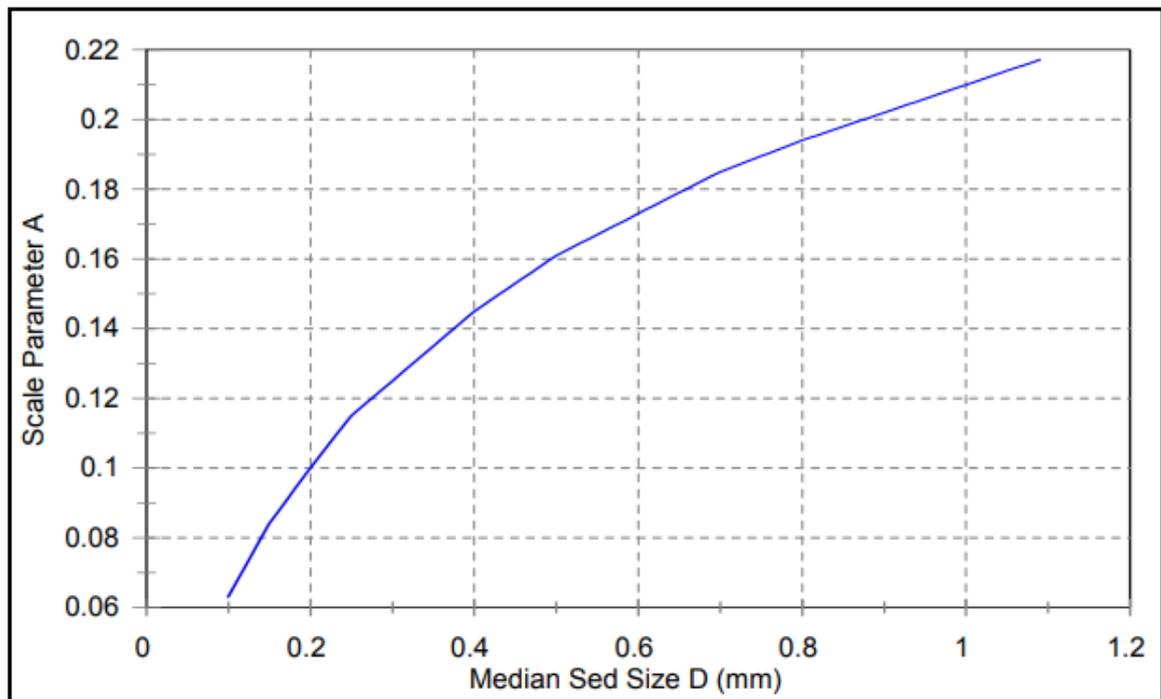
Untuk menentukan nilai A, ada beberapa persamaan yang dirumuskan beberapa orang. Salah satunya oleh Kriebel, Kraus, dan Larson (1991). Persamaan berkorelasi dengan w_f , kecepatan jatuh butiran, dan hanya berlaku untuk pasir berdiameter $D = 0.1$ mm sampai $D = 0.4$ mm. Hasilnya ditampilkan pada Persamaan 3.3.

$$A = 2.25 \left(\frac{w_f^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

Kemudian (Dean, 1987) dan (Moore, 1982) membuat rumusan A dengan diameter butiran D dan kecepatan jatuh butiran w_f sebagai variabelnya. Berikut hasil perumusannya pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Setelah itu dikembangkan lagi sebuah perumusan khusus untuk jenis pasir di pantai. Hasil perumusannya ditampilkan pada dan tabulasi nilainya pada Gambar 3.5.



Gambar 3.3 Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dan Diameter Sedimen, D, dengan Kecepatan Jatuh, w_f
Sumber: (Dean, et al., 2008)



Gambar 3.4 Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dengan Diameter Sedimen, D, untuk Jenis Pasir Pantai
 Sumber: (Dean, et al., 2008)

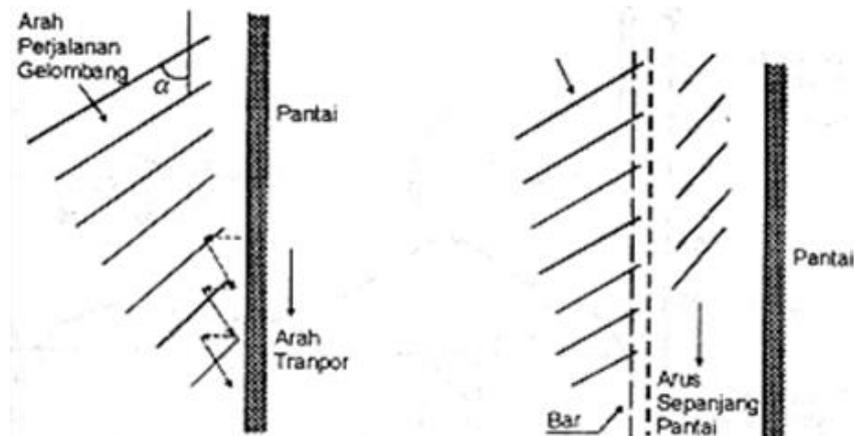
D(mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.084	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.153	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.161	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.167	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.173	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.179	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.185	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.194	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.198	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.202	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.206	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.210	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Gambar 3.5 Tabulasi Nilai Grafik Variasi Faktor Skala Sedimen, A, dengan Diameter Sedimen, D, untuk Jenis Pasir Pantai
 Sumber: (Dean, et al., 2008)

3.3. Angkutan Sedimen Sejajar Pantai

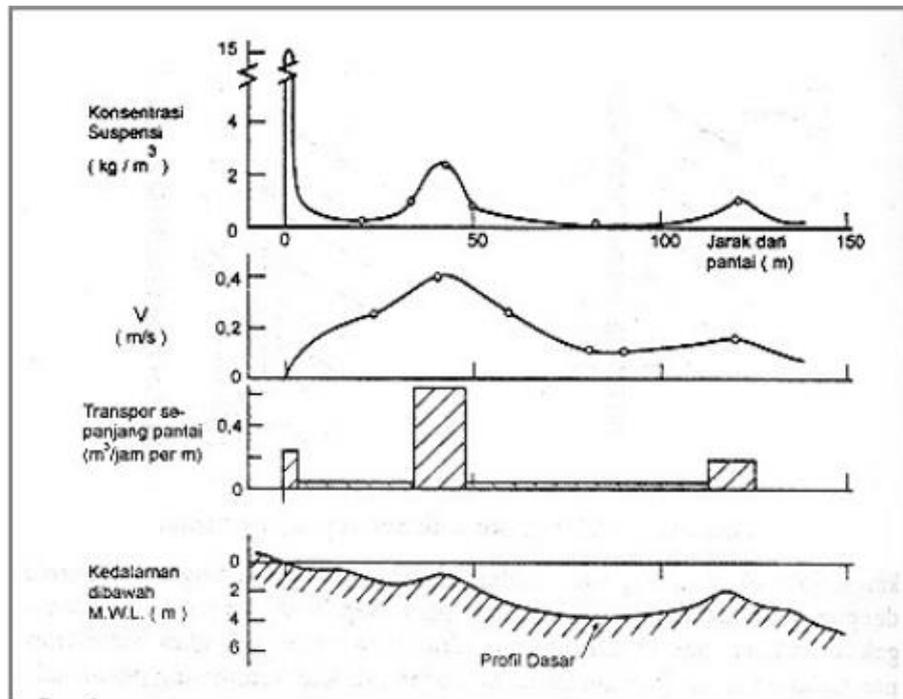
Lingkungan pantai merupakan daerah yang selalu mengalami perubahan karena daerah tersebut menjadi tempat pertemuan dua energi yang berasal dari lautan dan daratan. Bentuk perubahan tersebut berupa maju-mundurnya garis pantai. Proses perubahan garis pantai terjadi karena adanya angkutan sedimen di wilayah pantai (*coastal sediment transport*). Bentuk angkutan sedimen yang dimaksud berupa angkutan sedimen sejajar garis pantai (*longshore sediment transport*) dan angkutan sedimen tegak lurus garis pantai (*cross-shore sediment transport*). Proses ini dapat berlangsung secara cepat maupun secara lambat, tergantung pada keseimbangan kondisi topografi, batuan dan sedimen, dan sifat-sifatnya terhadap gelombang,

pasang-surut, dan angin. Pada bagian ini, hal yang akan dibahas mengenai angkutan sedimen sejajar garis pantai.



Gambar 3.6 Transpor Sedimen Sepanjang Pantai
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Transpor sedimen sepanjang pantai terdiri dari dua komponen utama, yaitu transport sedimen dalam bentuk mata gergaji di garis pantai dan transport sepanjang pantai di *surf zone*, seperti di Gambar 3.6, pada waktu gelombang menuju pantai dengan membentuk sudut terhadap garis pantai maka gelombang tersebut akan naik ke pantai (*uprush*) yang juga membentuk sudut. Massa air yang naik tersebut kemudian turun lagi dalam arah tegak lurus pantai. Gerak air tersebut membentuk lintasan seperti mata gergaji, yang disertai dengan terangkutnya sediment dalam arah sepanjang pantai. Komponen kedua adalah transport sediment yang ditimbulkan oleh arus sepanjang pantai yang dibangkitkan oleh gelombang pecah. Transport sediment ini terjadi di *surf zone*.



Gambar 3.7 Hasil Pengukuran Transpore Sedimen Sepanjang Pantai
 Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Zenkovitch dalam (Sleath, 1982) melakukan pengukuran transport sedimen sepanjang pantai. Hasil pengukuran diberikan dalam Gambar 3.7. Terdapat dua puncak konsentrasi sedimen suspensi yang ditimbulkan oleh gelombang pecah disekitar lokasi gelombang pecah dan di garis pantai. Konsentrasi tinggi di dekat garis pantai disebabkan oleh gerak air berbentuk gergaji seperti yang telah dijelaskan di atas. Zenkovitch juga mengukur laju transport sedimen sepanjang pantai seperti yang ditampilkan Dalam histogram pada gambar tersebut. Tinggi histogram diperoleh dengan membagi laju transport total pada tiap blok dengan lebar blok tegak lurus garis pantai. Di daerah gelombang pecah sebagian besar transport sedimen terjadi dalam suspensi sedang di luar gelombang pecah sebagai *bedload*. Transport sedimen sepanjang pantai banyak menyebabkan permasalahan seperti pendangkalan di pelabuhan, erosi pantai dan sebagainya. Oleh karena itu prediksi transport sedimen sepanjang pantai adalah sangat penting.

Rumus yang ada untuk menghitung transport sedimen sepanjang pantai dikembangkan berdasar data pengukuran model dan prototip pada pantai berpasir. Sebagian rumus-rumus tersebut merupakan hubungan yang sederhana antara transport sedimen dan komponen fluks energi gelombang sepanjang pantai dalam bentuk.

$$Q_s = K \cdot P1^n \quad (3.4)$$

$$P1 = \frac{\rho g}{8} \cdot Hb^2 \cdot Cb \cdot \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad (3.5)$$

Keterangan:

Q_s = angkutan sedimen sepanjang pantai (m^3/day)

P_1 = komponen fluks energi gelombang sepanjang pantai pada saat pecah ($Nm/day/m$)

ρ = rapat massa air laut (kg/m^3)

H_b = tinggi gelombang pecah (m)

C_b = cepat rambat gelombang pecah (m/day)

α_b = sudut datang gelombang pecah

K, n = konstanta

Pada (CERC, 1984) rumus ini digarap kembali menjadi Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7.

$$Q_s = 1290 \cdot P_1 \quad (m^3/tahun) \quad (3.6)$$

$$Q_s = 3.534 \cdot P_1 \quad (m^3/hari) \quad (3.7)$$

(CERC, 1984) memberikan transport sediment total. Distribusi transport sediment pada lebar *surf zone*, dimana transport sedimen terjadi, tidak dapat diketahui. Hal ini menyebabkan terbatasnya pemakaian rumus tersebut pada pantai yang mempunyai groin pendek. Selain itu rumus CERC tidak memperhitungkan sifat-sifat sediment dasar. Rumus tersebut diturunkan untuk pantai yang terdiri dari pasir agak seragam dengan diameter rerata bervariasi dari 0,175 mm sampai 1 mm. Oleh karena itu rumus tersebut bisa digunakan untuk pantai lain yang memiliki sedimen dengan sifat serupa.

3.4. Permasalahan di Wilayah Pantai

Menurut (Triatmodjo, 2016) transpor sedimen sepanjang pantai merupakan penyebab utama terjadinya perubahan garis pantai. Perubahan garis pantai pada dasarnya meliputi proses abrasi dan akresi (sedimentasi) yang dapat terjadi secara alami karena faktor alam dan manusia. Akresi dan abrasi yang terjadi disertai dengan maju dan mundurnya garis pantai. Akibat pengaruh transpor sedimen sepanjang pantai, sedimen dapat terangkut sampai jauh dan menyebabkan perubahan garis pantai.

3.4.1. Abrasi

Abrasi adalah suatu proses alam berupa pengikisan tanah pada daerah pesisir pantai yang diakibatkan oleh ombak dan arus laut yang sifatnya merusak terkadang juga disebut dengan erosi pantai. Abrasi merupakan salah satu masalah yang mengancam pesisir, mengalami kemunduran garis pantai sehingga merugikan bagi penduduk wilayah pesisir. Abrasi dapat merusak bangunan-bangunan yang difungsikan sebagai penunjang wisata dan rumah penduduk

yang berada di pinggir pantai. Abrasi pantai disebabkan adanya angkutan sedimen menyusur pantai sehingga mengakibatkan berpindahnya sedimen dari satu tempat ke tempat lainnya.

3.4.2. Akresi

Menurut Satyanta (2010) akresi atau sedimentasi adalah pendangkalan atau penambahan daratan baru yang cenderung semakin ke arah laut akibat adanya pengendapan sedimen yang dibawa oleh air laut. Akresi dapat merugikan masyarakat pesisir karena mempengaruhi ketidakstabilan garis pantai. Akresi secara terus-menerus dalam jangka waktu relatif lama dapat mengubah permukaan menjadi daratan yang lebih tinggi dan luas.

BAB 4

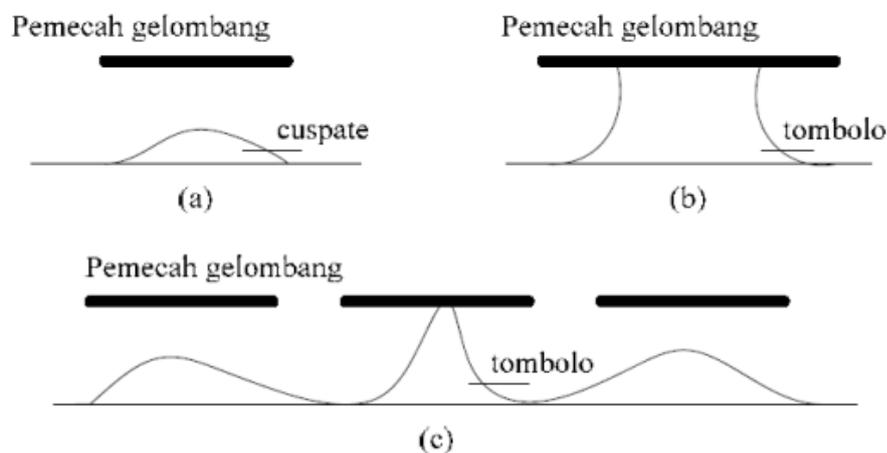
TIPE TIPE STRUKTUR BANGUNAN PANTAI

4.1. *Hard Structure*

4.1.1. Breakwater

Breakwater atau pemecah gelombang merupakan bangunan pantai yang berfungsi untuk melindungi pantai. *Breakwater* melindungi pantai dengan cara mengurangi energi gelombang yang menghantam. Gelombang yang menjalar akan mengenai *breakwater* sehingga sebagian energinya akan dipantulkan (refleksi), sebagian diteruskan (transmisi) dan sebagian dihancurkan (disipasi) melalui pecahnya gelombang, kekentalan fluida, gesekan dasar dan lainnya. Pembagian besarnya energi gelombang yang dipantulkan, dihancurkan dan diteruskan tergantung karakteristik gelombang datang (periode, tinggi, kedalaman air), tipe bangunan peredam gelombang (permukaan halus dan kasar, lurus air dan tidak lurus air) dan geometrik bangunan peredam (kemiringan, elevasi, dan puncak bangunan). Berkurangnya energi gelombang di daerah terlindung akan mengurangi pengiriman sedimen di daerah tersebut. Maka pengiriman sedimen sepanjang pantai yang berasal dari daerah di sekitarnya akan diendapkan dibelakang bangunan. Pantai di belakang struktur akan stabil dengan terbentuknya endapan sediment tersebut.

Jika lokasi panjang pemecah gelombang relatif kecil dan dekat dengan garis pantai maka akan dihasilkan tonjolan yang dinamakan *cusplate* seperti di Gambar 4.1a. Jika panjang pemecah gelombang cukup panjang maka dihasilkan tombolo seperti di Gambar 4.1b. Suatu rangkaian pemecah gelombang akan menghasilkan perubahan garis pantai seperti di Gambar 4.1c.

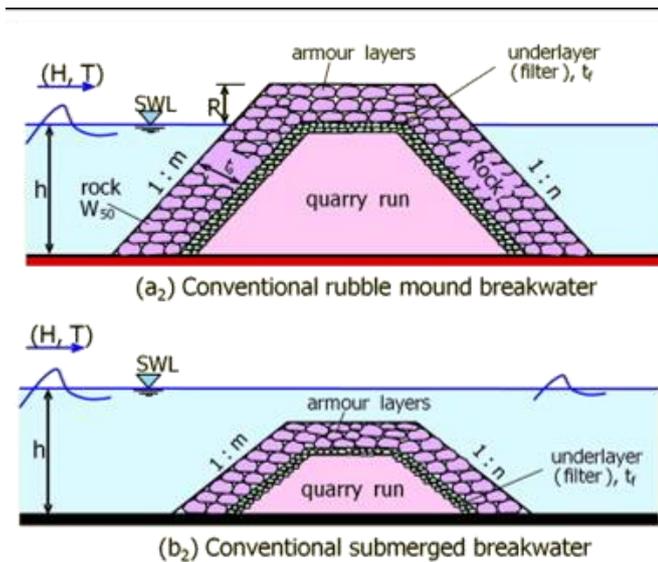


Gambar 4.1 Pemecah Gelombang Lepas Pantai
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Berdasarkan lokasinya pemecah gelombang dibedakan menjadi dua tipe yaitu pemecah gelombang lepas pantai dan pemecah gelombang sambung pantai. Tipe lepas pantai digunakan untuk melindungi pantai dari erosi. Ada beberapa tipe material pemecah gelombang seperti: batu, aspal – batu, *sheet pile*, dan beton bertulang. pemecah gelombang sambung pantai, diantaranya:

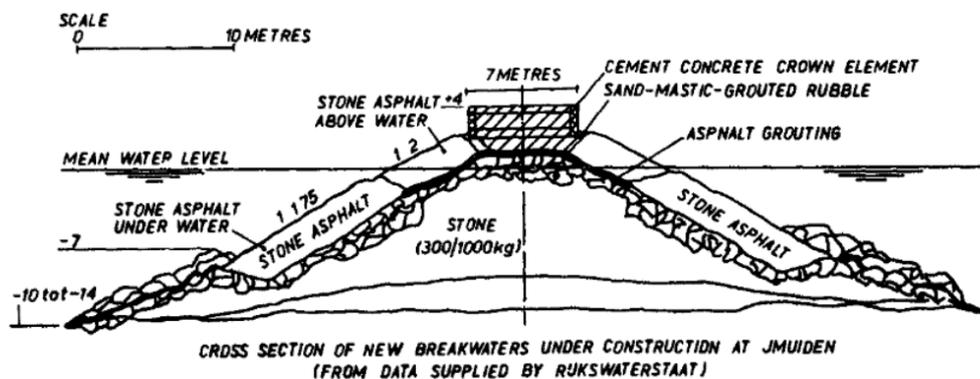
1. *Rubble – mound breakwaters*
2. *Stone – asphalt breakwaters*
3. *Cellular – steel sheet – pile breakwaters*
4. *Concrete caisson breakwaters*

Pemecah gelombang lepas pantai adalah pemecah gelombang yang dipasang paralel dengan pantai dan berada di kedalaman air 1,5 – 8 m. Pemecah gelombang ini berfungsi untuk melindungi pantai, pelabuhan, Untuk tipe lepas pantai biasanya memakai tipe *rubble – mound* atau *cellular – steel sheet – pile breakwaters*. *Rubble – mound breakwaters* merupakan pemecah gelombang yang terbuat dari batu yang ditumpuk. Biasanya terdapat dua lapis batuan, yaitu, lapisan luar dan lapisan dalam. Lapisan luar harus mampu menahan energi gelombang. Selain itu, lapisan dalam tidak boleh merembes keluar melalui celah di lapisan luar saat terkena gelombang. Ada dua jenis *rubble – mound breakwaters* yaitu *overtopping breakwaters* dan *non overtopping breakwaters*. *Overtopping breakwaters*, seperti yang ditampilkan di Gambar 4.2b merupakan pemecah gelombang yang didesain sehingga air bisa melimpas di atas pemecah gelombang. Penyebabnya adalah daerah yang dilindungi oleh pemecah gelombang tidak terlalu sensitif terhadap gelombang yang terjadi. Sedangkan *non overtopping breakwaters*, seperti di Gambar 4.2a, merupakan pemecah gelombang yang didesain sehingga air tidak diperbolehkan melimpas di atas pemecah gelombang. Tinggi mercu pemecah gelombang harus didesain berdasarkan *wave run-up*.



Gambar 4.2 Rubble Mound Breakwater
 Sumber: (Oumeraci & Kortenhaus, 2011)

Stone – asphalt breakwaters merupakan pengembangan dari *rubble – mound breakwaters*. Pada tipe sebelumnya, batu yang digunakan tidak diberi lapisan tambahan di permukaan batunya. Pada tipe kedua, terdapat campuran beberapa material. Sekitar 60% – 80% batu berdiameter 5 – 50 cm dicampur dengan 20% – 40% aspal beton dengan diameter maksimum agregat 5 cm.



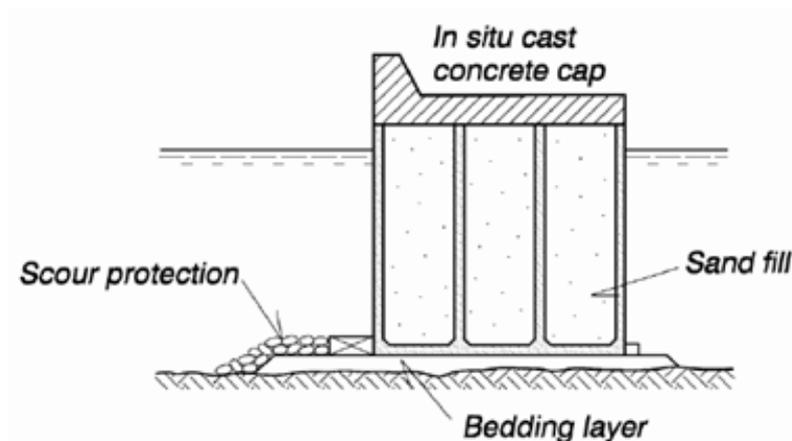
Gambar 4.3 Stone Asphalt Breakwater
 Sumber: (d'Angremond, et al., 1970)

Cellular – steel sheet – pile breakwaters merupakan pemecah gelombang yang terbuat dari *sheet pile*. Pemecah gelombang tipe ini cocok untuk pantai dengan gelombang badai yang tidak terlalu kuat. Prinsip perencanaannya mirip seperti *sheet pile* pada umumnya. Ilustrasi dari *cellular – steel sheet – pile breakwaters* ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Cellular–Steel Sheet–Pile Breakwaters
 Sumber: [Breakwater - Tanah Merah / Oriental Sheet Piling](#)

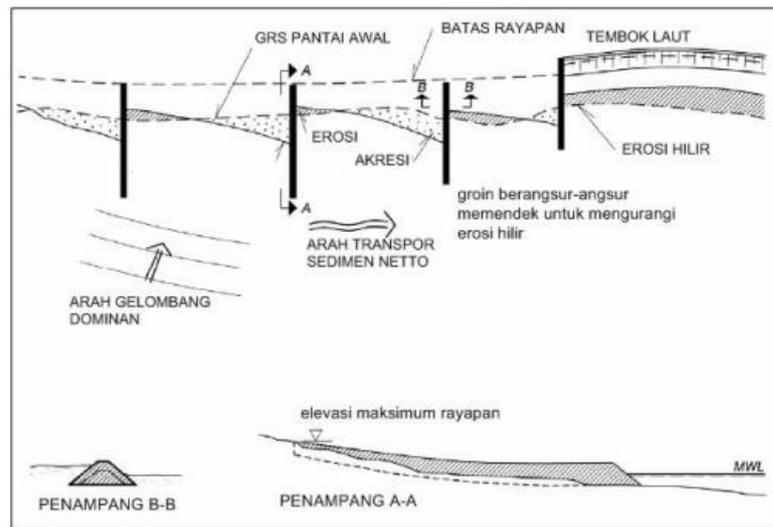
Concrete caisson breakwaters merupakan pemecah gelombang yang terbuat dari beton bertulang tetapi bagian dalamnya terdapat rongga yang dibagi oleh dinding – dinding. Struktur ini dapat diapungkan, ditanam dengan fondasi ke dasar laut, atau diisi dengan batu, pasir, atau air untuk kestabilan. *Concrete caisson breakwaters* bisa digunakan untuk kedalaman 3 – 10 m. Gambar 4.5 menunjukkan penampang melintang dari *concrete caisson breakwaters*.



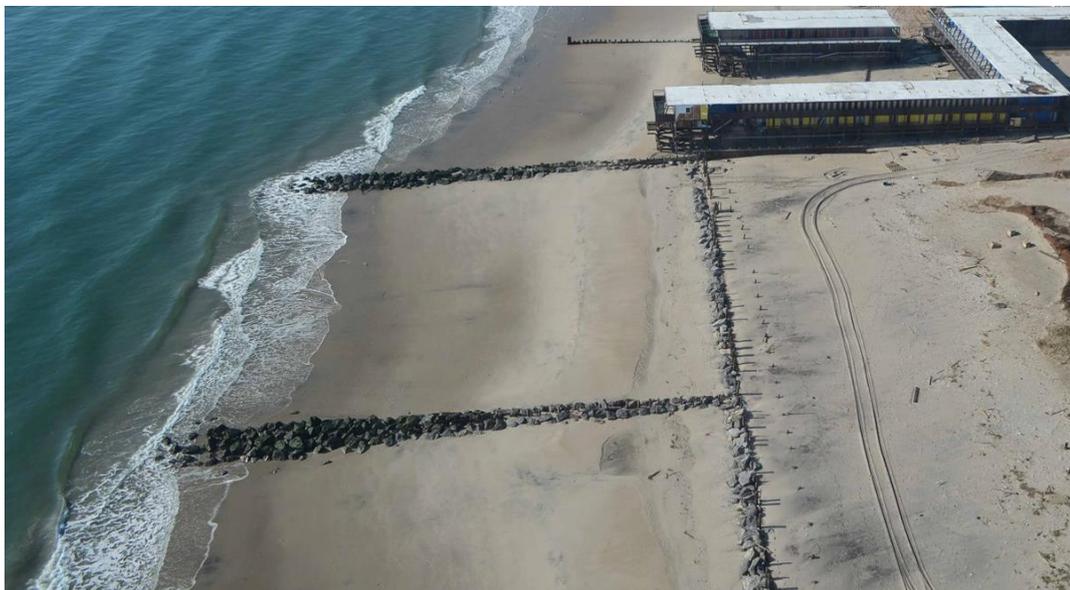
Gambar 4.5 Concrete Caisson Breakwater
 Sumber: (Maia, et al., 2017)

4.1.2. Groin

Menurut (CERC, 1984), groin merupakan bangunan yang diutamakan dalam hal permeabilitasnya, ketinggian, dan panjang strukturnya. Groin dibangun menggunakan material konstruksi yang umum sekali digunakan seperti batuan, beton, kayu, dan baja. aspal dan karung nilon biasa digunakan untuk memperpanjang umur groin. Berikut beberapa jenis groin berdasarkan materialnya dan beberapa ilustrasi groin pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Contoh Pengaplikasian Groin
Sumber: (Safitri, 2016)



Gambar 4.7 Groin di Sepanjang Pantai Selatan New Jersey
Sumber: (National Park Service, 2019)

1. Timber groin

Timber groin adalah struktur bangunan pantai yang memiliki sifat kedap air. Strukturnya terbentuk dari *sheet pile* baja yang diapit dengan wales dari kayu dan tiang silinder dari kayu. Struktur ini dapat dibuat tidak kedap air dengan memberi celah celah antara *sheet pile*. Tiang kayu yang diperkenankan digunakan paling tidak memiliki diameter minimum 30 cm. Wales yang diperkenankan digunakan minimum setebal 20–25 cm, yang kegiatan pemotongan dan pengeborannya dilakukan sebelum perawatan menggunakan *creosote* dan *coal-tar solution*. *Sheet pile* yang digunakan biasanya berjenis Wakefield, *tongue-and-groove*, atau *shiplap* yang akan dikaitkan dengan paku pada wales.

2. *Steel groin*

Steel groin tersusun dari *sheet pile* baja berjenis *straight-web*, *arch-web*, atau *Z piles*. Struktur ini dapat dibangun tidak kedap air dengan memotong celah/lubang pada plat baja. Pemilihan jenis tiang yang digunakan tergantung pada gaya pada tanah yang akan diterima. Jika *differential loads* yang diterima kecil maka *straight-web pile* dapat digunakan. Jika *differential loads* yang diterima cukup besar maka *Z piles* dapat digunakan.

3. *Concrete groin*

Kegunaan *concrete groin* sangatlah jarang digunakan untuk bangunan yang difungsikan tidak kedap air, di mana pasir tidak dapat melewati bangunan tersebut. Desain dari *concrete groin* ini telah didiskusikan oleh Portland Cement Association (1955) dan Berg and Watts (1967). Struktur ini umumnya kedap air, dengan struktur tiang beton prategang dan cap beton yang dicor in-situ. Pada pemasangannya di Masonboro Inlet, North Carolina, struktur ini ditambahkan dengan 2 wale kayu agar meningkatkan fleksibilitas.

4. *Rubble-mound groin*

Rubble-mound groin dibangun menggunakan *core of the quarry run material*, material halus yang membuat struktur kedap pasir, dan diselimuti dengan lapisan *armor unit*. *Armor unit* yang digunakan harus memiliki berat yang cukup untuk menahan terpaan dari gelombang desain agar bangunan tetap stabil. Jika memerlukan bangunan yang diharuskan kedap air (permeabilitas tinggi) maka celah celah antar batu dapat diberikan lapisan beton atau aspal. Lapisan ini juga dapat meningkatkan kestabilan bangunan terhadap terpaan gelombang.

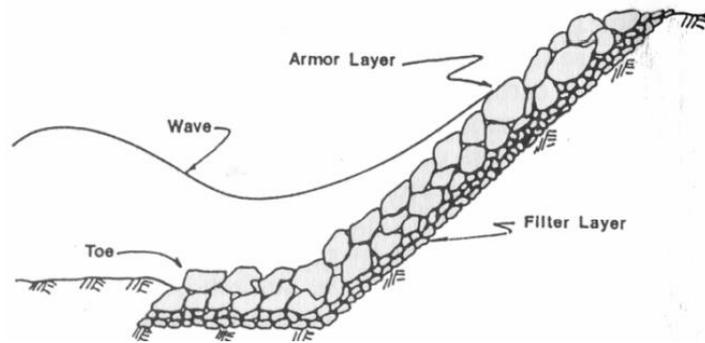
5. *Asphalt groin*

4.1.3. **Revetment**

Revetment adalah salah satu jenis struktur perlindungan pantai terhadap gaya gelombang dan/atau arus struktur di pantai dan dibangun sejajar garis pantai dengan fungsi utama melindungi pantai dari erosi. Struktur *revetment* secara tipikal terdiri dari lapisan luar terbuat dari batu, beton, atau aspal untuk melindungi profil pantai dengan kemiringan alami. Karena permukaannya terdiri dari timbunan batu/blok beton, dengan rongga-rongga, maka *revetment* lebih efektif untuk meredam energi gelombang.

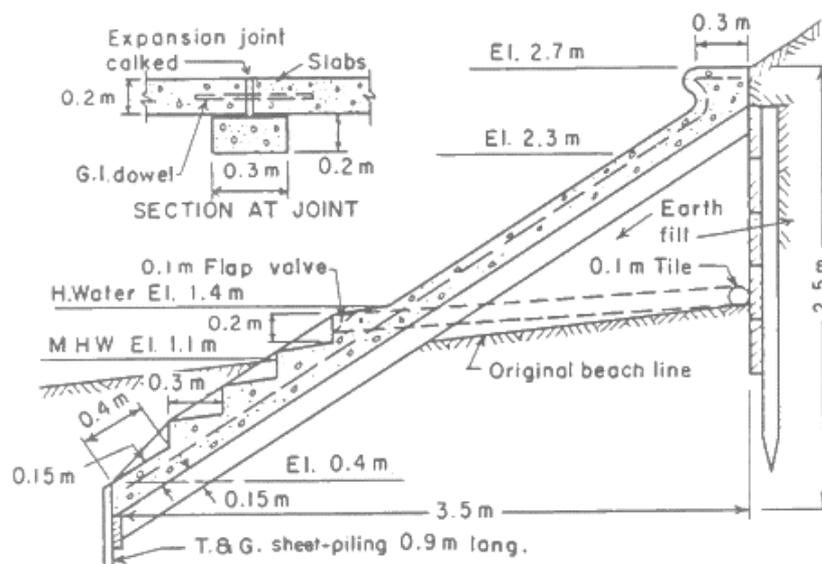
Revetment terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapisan pelindung, lapisan *filter*, dan kaki. Bagian – bagian *revetment* diilustrasikan pada Gambar 4.8. Bagian pelindung merupakan lapisan terluar yang berfungsi untuk melindungi struktur dari energi gelombang. Kemudian lapisan *filter* yang terletak di dalam lapisan pelindung. Lapisan ini berfungsi untuk akses air menembus struktur dan mencegah terhanyutnya tanah di bawah struktur. Kemudian ada bagian kaki. Di bagian ini peluang terjadinya erosi lebih besar dari bagian lain. Sehingga diperlukan

pelindung kaki struktur (*toe protection*) yang berfungsi untuk mencegah tererosinya bagian depan dari *revetment* dan mencegah tergesernya kaki *revetment*. Ilustrasi *revetment* ditampilkan pada Gambar 4.8.

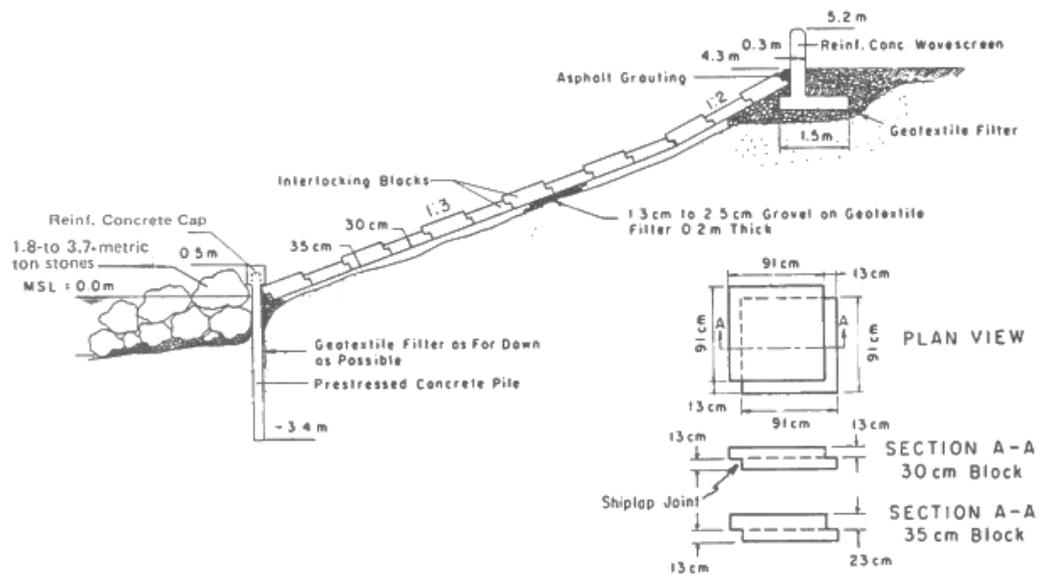


Gambar 4.8 Potongan Melintang Tipikal *Revetment*
 Sumber: (CERC, 1984)

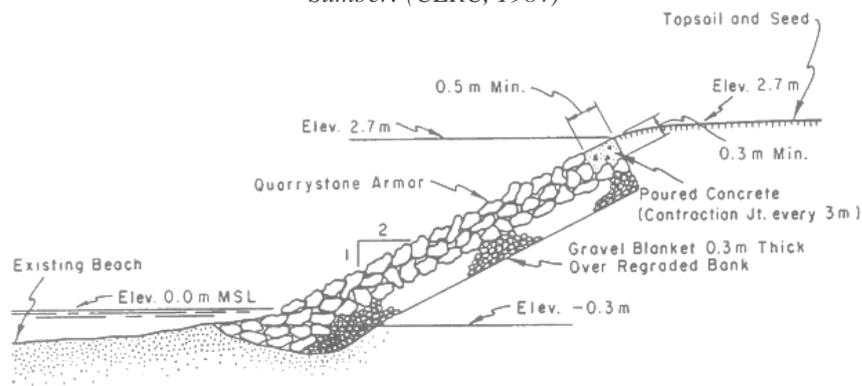
Ada dua tipe *revetment*, yaitu tipe yang kaku dan fleksibel. *Revetment* kaku biasanya berupa beton yang dicetak di tempat seperti di Gambar 4.11. *Revetment* kaku memberikan perlindungan lebih baik daripada tipe fleksibel. Tetapi yang perlu diperhatikan dalam mendesain tipe kaku adalah potensi retaknya struktur yang diakibatkan drainase di belakang struktur atau pemampatan yang tidak merata. Sedangkan *revetment* fleksibel berupa segmen – segmen terbuat dari beton yang saling terkoneksi secara mekanis, seperti di Gambar 4.10 atau terdiri dari tumpukan batu seperti di Gambar 4.11. Koneksi mekanis ini merupakan solusi agar struktur bisa beradaptasi dengan pemampatan tanah meskipun kemampuannya terbatas. Ada banyak pengembangan dari *revetment* fleksibel. Ada yang menggunakan *geobag*, blok beton, buis beton dan blok beton bergigi.



Gambar 4.9 *Revetment* Beton
 Sumber: (CERC, 1984)



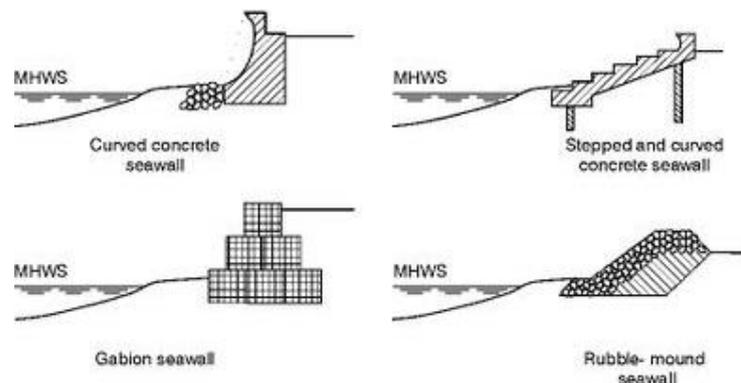
Gambar 4.10 Revetment Beton Fleksibel
 Sumber: (CERC, 1984)



Gambar 4.11 Revetment Batu
 Sumber: (CERC, 1984)

4.1.4. Seawall

Seawall adalah struktur perlindungan pantai yang diletakkan sejajar garis pantai yang berfungsi menahan gelombang penuh dan sebagai penahan timbunan tanah. *Seawall* biasanya digunakan untuk melindungi pantai terhadap gelombang yang cukup besar. Contoh dari *seawall* bisa dilihat di **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**



Gambar 4.12 Contoh Struktur Seawall
 Sumber: (Mangor, et al., 2017)

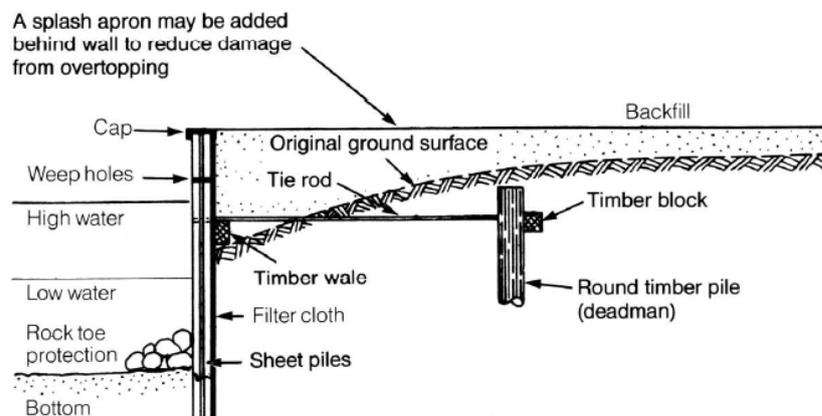


Gambar 4.13 Seawall
Sumber: (Victoria, 2020)

4.1.5. Bulkhead

Bulkhead adalah dinding penahan yang dipasang sejajar garis pantai. *Bulkhead* biasanya berukuran lebih kecil dari *seawall*. Fungsi utamanya adalah menahan tanah dibelakangnya dari keruntuhan geser. Namun, *bulkhead* harus didesain dan kuat menahan erosi gelombang pada situs. *Bulkhead* bisa terbuat dari berbagai macam material.

Yang pertama adalah *bulkhead* dari *cantilevered sheet piles* dan *anchored sheet piles*. *Cantilevered sheet piles* adalah struktur yang ditancapkan langsung ke dalam tanah. Kekuatannya bergantung pada seberapa dalam struktur itu tertancap. Karena itu, biasanya tipe *cantilever* ini membutuhkan kedalaman penetrasi yang lebih dalam dari tipe *anchored*. Secara praktis, panjang *sheet piles* yang tertancap minimum sebesar 2.5 kali panjang *sheet piles* yang timbul. *Anchored sheet piles* adalah tipe *sheet piles* yang berangkur dan diletakkan di sisi dalam *sheet piles*. Ilustasi *sheet piles bulkhead* ditampilkan pada Gambar 4.14.



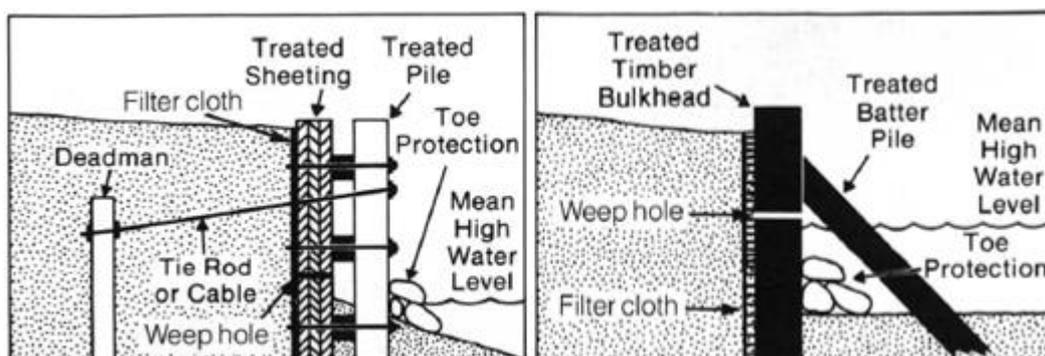
Gambar 4.14 Sheet Piles Bulkhead
Sumber: (O'Neill, 1986)

Yang kedua adalah *bulkhead* yang terbuat dari beton, baik yang *precast* atau *cast in situ*. Untuk *cast in situ bulkhead*, Prinsip perhitungannya mirip dengan *sheet pile* dimana bisa didesain secara *cantilever* atau *anchored sheet piles*. Untuk *precast bulkhead* bisa didesain secara *anchored* atau diberi timbunan di bagian belakang struktur (*backfill*). Karena *precast bulkhead* tidak mempunyai fondasi yang menembus ke tanah, maka struktur berpotensi roboh karena *scouring*. Maka dari itu diperlukan perlindungan tambahan pada bagian kaki struktur. Ilustasi *bulkhead* beton ditampilkan pada Gambar 4.15.



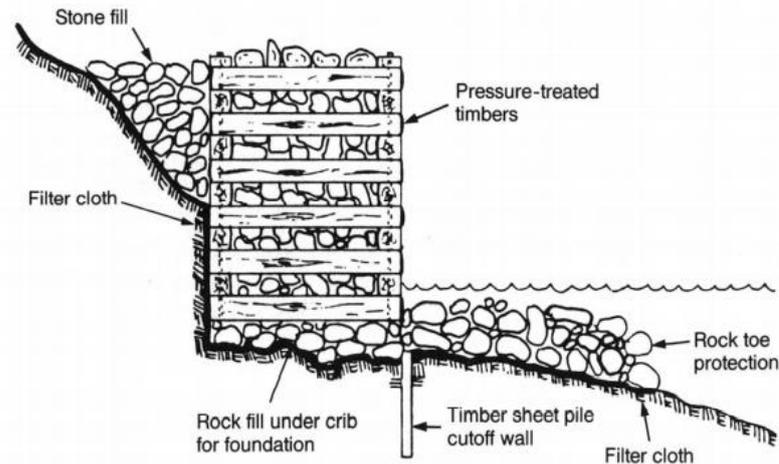
Gambar 4.15 Bulkhead Beton
Sumber: (O'Neill, 1986)

Yang ketiga adalah *bulkhead* dari kayu. Sama seperti *sheet pile*, struktur ini terbuat dari gelondongan kayu yang ditancapkan ke tanah secara vertikal yang diberi angkur atau *bracing* untuk menambah kekuatan. Setelah itu, dipasang juga papan – papan kayu yang berfungsi untuk menahan *backfill*. Untuk mencegah kegagalan akibat *scouring*, maka papan kayu tadi harus tertancap ke tanah sedalam... atau diberi *stone toe* sebagai pelindung bagian kaki struktur. Ilustasi *bulkhead* kayu ditampilkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Bulkhead Kayu
Sumber: (O'Neill, 1986)

Yang keempat adalah *timber crib*. *Timber crib* merupakan struktur yang terbuat dari kayu yang disusun vertikal dan horisontal dan diisi oleh batu berukuran besar. Kayu – kayu tersebut disambung menggunakan baut. Sama seperti struktur lainnya, struktur ini juga memerlukan perlindungan di bagian kaki berupa tumpukan batu. Ilustrasi *timber crib bulkhead* ditampilkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Timber Crib Bulkhead
Sumber: (O'Neill, 1986)

Yang terakhir adalah gabion. Gabion adalah kerangka berbentuk sangkar dari kawat yang diisi batu. Karena tidak terdapat fondasi, maka diperlukan perlindungan terhadap bagian depan struktur. Ilustrasi gabion ditampilkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Gabion Bulkhead
Sumber: (Qingdao Haisan New Energy Co., 2017)

4.1.6. Jetty

Jetty adalah bangunan pelindung pantai yang diletakkan tegak lurus garis pantai, digunakan untuk stabilisasi muara sungai. Suatu sungai yang tertutup muaranya oleh *sand spit*, pada saat terjadi banjir akan berusaha mencari jalan termudah untuk mengalir menuju laut. Apabila aliran tidak mampu menembus aliran sand spit, hal inilah yang menyebabkan muara sungai berpindah-pindah. Penutupan muara sungai oleh *sand spit* biasanya disebabkan:

1. Debit sungai terlalu bervariasi dan pada suatu saat sangat kecil
2. Angkutan sedimen pantai cukup potensial, sehingga mampu menutup muara sungai pada saat debit kecil
3. Apabila tebing sangat rendah, dapat menimbulkan banjir di daerah kanankiri muara sungai dan muara sungai sering berpindah.

Untuk mengatasi masalah ini dilakukan stabilisasi muara sungai dengan jetty. Apabila tebing sungai relatif rendah maka jetty harus dikombinasikan dengan tanggul sungai.



Gambar 4.19 Indian River Inlet, United States

Sumber: <https://marinas.com/view/inlet/d7i1d> Indian River Inlet DE United States

4.2. Soft Structure

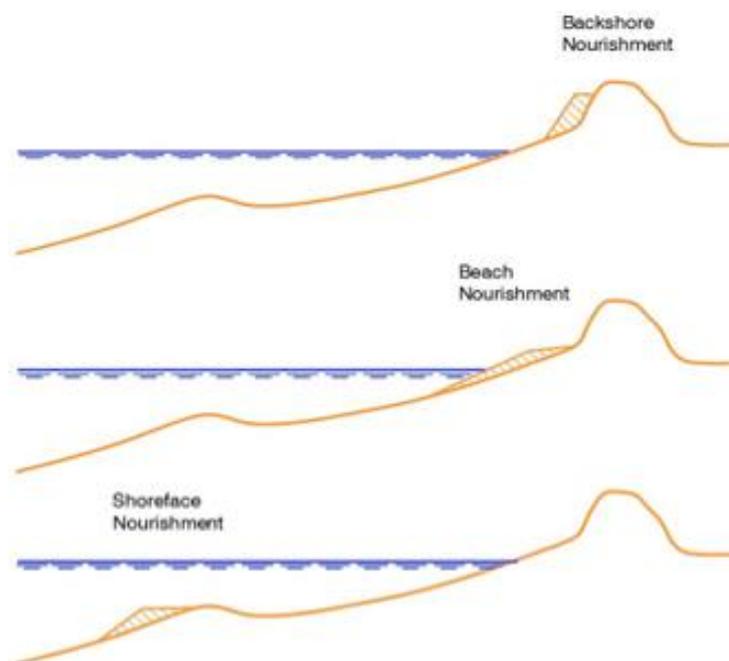
4.2.1. Sand Nourishment

Sand nourishment adalah proses penambahan pasir ke wilayah pantai yang tererosi. Tujuannya adalah untuk mencegah erosi pantai dan menjaga bentuk garis pantai. Dengan adanya penambahan pasir pengganti maka akan mengganti pasir yang tererosi oleh gelombang dan arus. Selain untuk melindungi pantai, ada beberapa tujuan lain diantaranya:

1. Penambahan luas pantai rekreasi
2. Perhindungan terhadap bangunan di pesisir
3. Perlindungan terhadap habitat flora dan fauna

Prinsip dasar *sand nourishment* adalah penambahan suplai pasir terhadap pantai yang tererosi. Diusahakan kualitas pasir urugan harus lebih baik atau sama dengan kualitas pasir yang akan diurug atau diameter pasir urugan diusahakan lebih besar atau sama dengan diameter pasir asli (Triatmodjo, 2016). Sumber sedimen tambahan bisa berasal dari laut atau darat, tergantung ketersediaan material dan kemudahan transportasi.

Menurut (Marchand, et al., 2012) ada tiga jenis *sand nourishment*. Ketiganya dibedakan oleh lokasi penambahan suplai pasir. *Backshore nourishment* merupakan metode perkuatan bagian atas pesisir dengan cara menambah suplai pasir. Tujuan dari *backshore nourishment* adalah perlindungan dari erosi dan *breaching* saat fenomena alam ekstrim. Pasir yang ditambahkan akan tergerus saat terjadinya fenomena alam ekstrim. *Beach nourishment* merupakan penambahan suplai pasir pada daerah pantai. Tujuannya untuk menambah luas pantai rekreasional dan/atau perlindungan pantai dari erosi. Sebisa mungkin diameter butiran pasir yang ditambahkan sama dengan butiran pasir eksisting supaya. Meskipun penggunaan pasir tambahan yang lebih kasar lebih menguntungkan, tetapi profil pantai akan menjadi lebih curam. *Shoreface nourishment* merupakan penambahan suplai pasir di bagian *longshore bar*. Ilustrasi dari ketiga metode terdapat di Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Tiga Metode Sand Nourishment
Sumber: (Mangor, 2020)

4.2.2. Reboisasi



Gambar 4.21 Reboisasi Pantai di Sulawesi Selatan
Sumber: (Chandra, 2015)

Reboisasi merupakan cara alami untuk pengaman daerah pantai. Penanaman tumbuhan pelindung pantai seperti pohon bakau atau pohon api-api sangat cocok untuk pantai lumpur atau lempung. Pohon bakau selain dapat mematahkan energi gelombang juga dapat bermanfaat untuk:

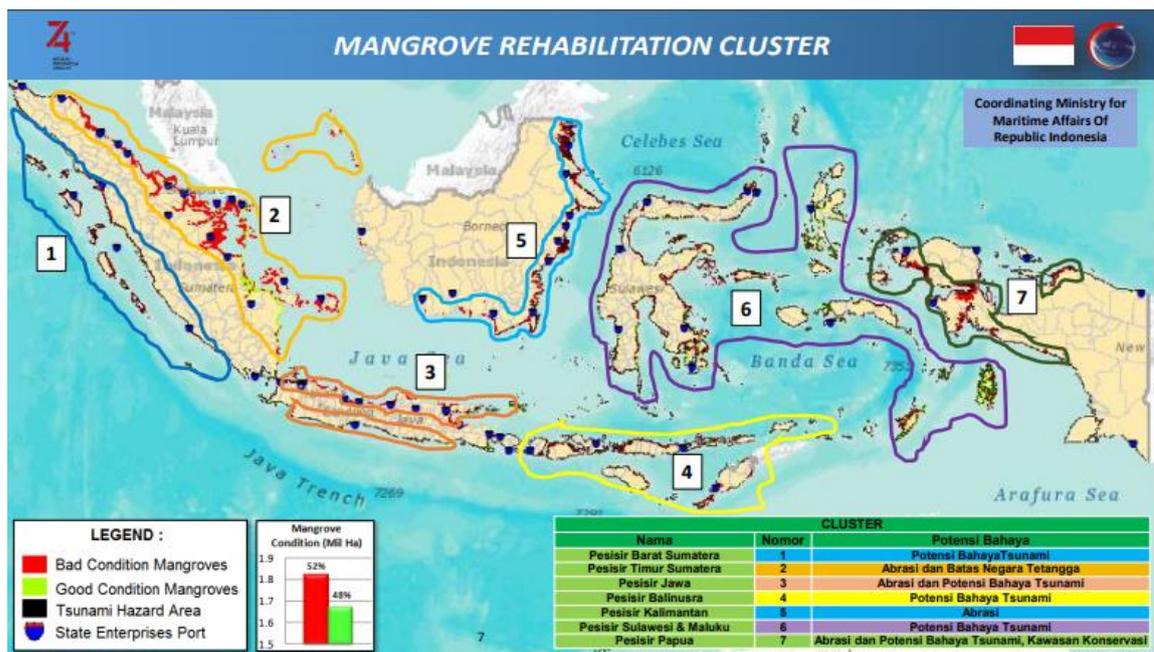
1. Perlindungan dan pelestarian terhadap kehidupan pantai seperti ikan, burung atau dapat dikatakan menjaga keberlangsungan ekosistem di pantai
2. Dapat membantu mempercepat pertumbuhan pantai
3. Sebagai daerah *buffer zone* yang dapat berfungsi sebagai daerah produksi oksigen

Penjelasan lebih lanjut mengenai mengapa harus pohon bakau yang cocok untuk daerah pantai yang terkena abrasi tersebut karena keberadaan hutan mangrove dapat mengendapkan lumpur di sekitar akar pohon sehingga dapat mencegah terjadinya intruksi air laut kedaratan. Akar bakau tadi bisa dilihat pada Gambar 4.22. Hutan mangrove membantu mempercepat proses penguraian bahan kimia seperti minyak dan deterjen yang mencemari air laut, juga sebagai pengendali bencana, tempat penyimpanan air dan untuk mengurangi polusi pencegahan udara serta menjadi biota laut.



Gambar 4.22 Tanaman Mangrove
 Sumber: (Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng, 2019)

Terdapat riset mengenai fungsi nyata kawasan mangrove pada wilayah pantai. Riset tersebut menganalisis kawassn mangrove di wilayah pantai, di desa Panggung, Bulakbaru, Tanggultlare, Kabupaten Jepara, yang diubah menjadi kawasan tambak. Kawasan mangrove tersebut menjadi penghasilan warga dengan menebang pohonnya dan dijual sebagai kayu bakar. Dari hasil penelitian Program Pascasajana Universitas Diponegoro, Program Studi Magister Manajemen Sumber Daya Pantai, proses abrasi yang terjadi pada wilayah desa Tanggultlare, desa Bulakbaru, dan desa Panggung disebabkan oleh pengaruh besarnya gelombang, sehingga dapat mengikis daratan yang ada di depannya. Hal ini diakibatkan juga karena tidak adanya peredam gelombang seperti terumbu karang dan hutan mangrove yang telah habis dirusak oleh masyarakat untuk perluasan tambak kearah laut.



Gambar 4.23 Persebaran Mangrove di Indonesia
 Sumber: (Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman , 2019)

BAB 5

KONSEP PERENCANAAN STRUKTUR BUATAN

5.1. Analisis Data Gelombang

Analisis data gelombang dilakukan dalam beberapa tahap. Gambar 5.1 menunjukkan tahapan dari perhitungan gelombang.



Gambar 5.1 Diagram Alir Perhitungan Tinggi Gelombang
Sumber: Penulis

5.1.1. Angin

Angin merupakan salah satu penyebab terjadinya gelombang. Maka dari itu, angin bisa digunakan untuk memprediksi gelombang yang dibangkitkan oleh angin. Data angin yang diketahui biasanya berupa kecepatannya dan arahnya. Setelah itu, data angin dikelompokkan berdasarkan arahnya. Arah angin dibagi sesuai dengan delapan arah mata angin yaitu utara, timur laut, timur, tenggara, selatan, barat daya, barat dan barat laut. Setelah mengetahui data angin, dibuatlah *Fetch* dari lokasi struktur. Data kecepatan angin yang digunakan dalam peramalan gelombang merupakan data angin di permukaan laut. Tidak semua pengukuran kecepatan angin dilakukan tepat di atas permukaan laut. Maka dari itu dilakukan beberapa konversi diantaranya:

1. Jika data angin yang didapat merupakan hasil pengukuran di atas kapal, maka perlu dilakukan koreksi sesuai Persamaan 5.1.

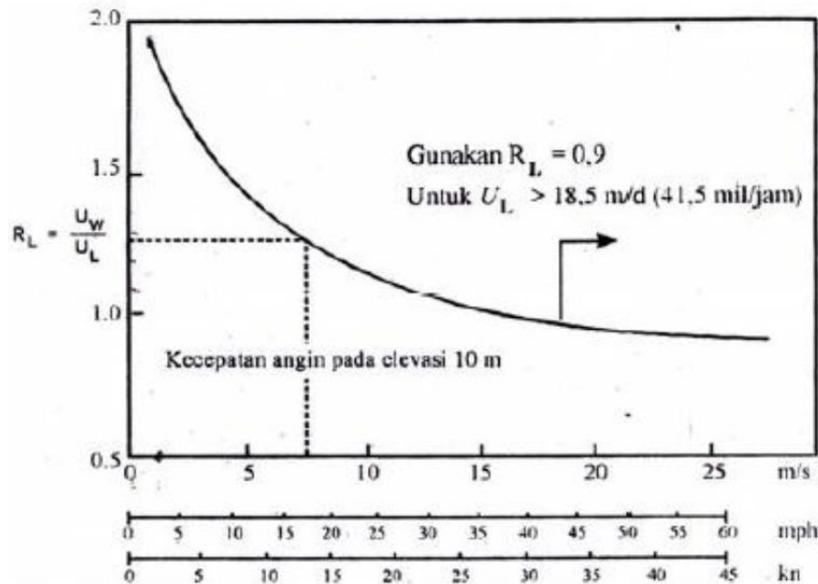
$$U = 2,16U_s^{\frac{7}{9}} \quad (5.1)$$

dengan:

U_s = kecepatan angin yang diukur oleh kapal (knot)

U = kecepatan angin terkoreksi (knot)

2. Jika pengukuran angin dilakukan di darat, perlu dilakukan konversi melalui grafik pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin di Darat dan di Laut
Sumber: (CERC, 1984)

Hubungan antara kecepatan angin di laut dan angin di darat diberikan oleh Persamaan 5.2.

$$R_L = \frac{U_w}{U_l} \quad (5.2)$$

dengan:

R_L = faktor koreksi terhadap kecepatan angin di darat

U_w = kecepatan angin di laut (m/s)

U_l = kecepatan angin di daratan (m/s)

3. Selain itu, ada beberapa rumus yang menggunakan kecepatan angin yang diukur pada ketinggian 10 m di atas permukaan laut. Jika data yang didapat tidak diukur pada ketinggian 10 m di atas permukaan laut, maka harus dikonversi menggunakan Persamaan 5.3.

$$U_{10} = U_y \left(\frac{10}{y} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (5.3)$$

dengan:

U_{10} = kecepatan angin pada ketinggian 10 m di atas permukaan laut (m/s)

U_y = kecepatan angin pada ketinggian y m di atas permukaan laut (m/s)

Rumus-rumus dan grafik-grafik pembangkitan gelombang mengandung variabel U_A , yaitu faktor tegangan angin. Sehingga diperlukan konversi dari kecepatan angin ke faktor tegangan angin melalui Persamaan 5.4.

$$U_A = 0,71U^{1,23} \quad (5.4)$$

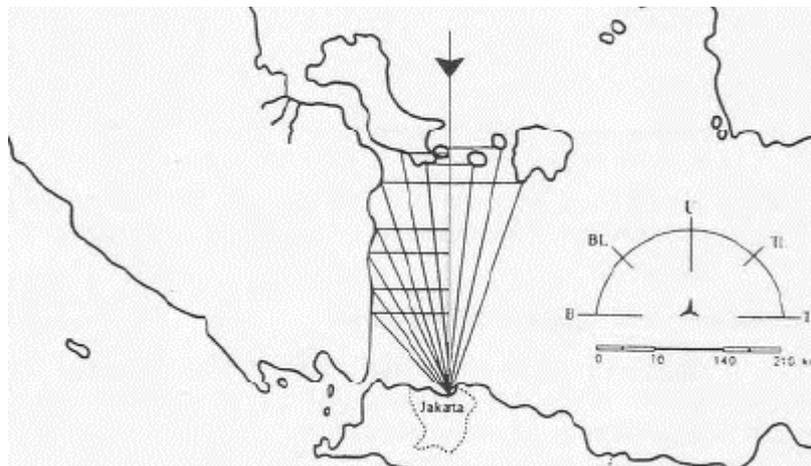
dengan:

U = kecepatan angin (m/s)

U_A = faktor tegangan angin

5.1.2. Fetch

Fetch merupakan daerah yang berpengaruh dalam pembangkitan gelombang. Ujung akhir dari segmen *fetch* dibatasi oleh bentuk daratan. menunjukkan *fetch* dari suatu daerah. Di dalam *fetch*, gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin tetapi juga dalam berbagai sudut terhadap arah angin. Normalnya terdapat deviasi pada kedua sisi arah angin. Deviasi yang terjadi berkisar antara 6° sampai 42° . Untuk memperoleh panjang *fetch* rerata efektif dapat melalui Persamaan 5.5 dan Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Fetch
Sumber: (CERC, 1984)

$$F_{eff} = \frac{\sum x_i \cdot \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (5.5)$$

dengan:

F_{eff} = panjang *fetch* rerata efektif

X_i = panjang *fetch* diukur dari titik observasi gelombang ke ujung akhir *fetch*

α_i = deviasi pada kedua sisi dari arah angin dengan besar pertambahan 6° sampai 42° pada masing – masing sisi arah angin

5.1.3. Peramalan Gelombang Laut Dalam

Peramalan gelombang dilakukan dengan menggunakan data angin sebagai pembangkit utama gelombang, dan daerah pembentukan gelombang (*fetch*). Dari data angin dan *fetch* gelombang akan didapatkan jenis, tinggi dan periode gelombang yang ada di daerah pantai. Salah satu metode yang dipakai dalam peramalan gelombang adalah metode pada *Shore Protection Manual* atau SPM. Pada SPM, gelombang yang terjadi bisa berdasarkan *fetch limited* atau *fully developed sea*. Pada *fetch limited*, gelombang yang terjadi dibatasi oleh panjang *fetch* gelombang. Angin bertiup cukup lama dan kondisi gelombang yang terbentuk adalah fungsi dari kecepatan dan panjang *fetch*. Penghitungan parameter gelombang *fetch limited* ini menggunakan Persamaan 5.6, Persamaan 5.7, dan Persamaan 5.8.

$$H_{m0} = 0,0016 \frac{U_A^2}{g} \sqrt{g \cdot \frac{F}{U_A^2}} \quad (5.6)$$

$$T_m = 0,2857 \frac{U_A}{g} \left(g \cdot \frac{F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.7)$$

$$t = 0,688 \frac{U_A}{g} \left(g \cdot \frac{F}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.8)$$

dengan:

H_{m0} = tinggi gelombang signifikan (m)

T_m = periode gelombang signifikan (m)

t = lama angin berhembus (s)

U_A = kecepatan angin (m/s)

Sedangkan pada *fully developed sea*, gelombang yang terjadi tidak dipengaruhi oleh panjang *fetch*. Gelombang ini terbentuk bila angin bertiup cukup lama dan dengan kecepatan yang cukup besar. Penghitungan parameter gelombang *fully developed sea* ini menggunakan Persamaan 5.9, Persamaan 5.10, dan Persamaan 5.11.

$$H_{m0} = 0,0016 \frac{U_A^2}{g} \sqrt{g \cdot \frac{F}{U_A^2}} \quad (5.9)$$

$$T_m = 0,2857 \frac{U_A}{g} \left(g \cdot \frac{F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.10)$$

$$t = 0,688 \frac{U_A}{g} \left(g \cdot \frac{F}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.11)$$

dengan:

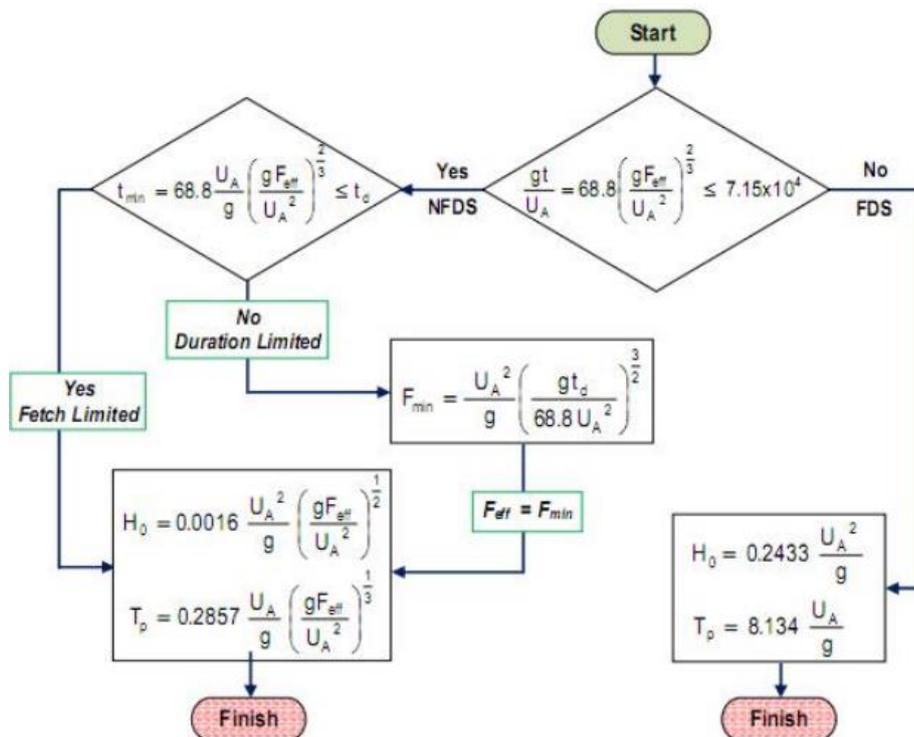
H_{m0} = tinggi gelombang signifikan (m)

T_m = periode gelombang signifikan (m)

t = lama angin berhembus (s)

U_A = kecepatan angin (m/s)

Tahapan dalam menghitung peramalan gelombang laut dalam metod SPM ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Diagram Alir Perhitungan Peramalan Gelombang Laut Dalam
Sumber: (Karamma & Sukri, 2018)

5.1.4. Penentuan Gelombang Rencana



Gambar 5.5 Pencatatan Gelombang di Suatu Tempat
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Pencatatan gelombang pada suatu tempat memberikan pencatatan muka air sebagai fungsi waktu seperti yang ditunjukkan di Gambar 5.5. Gambar 5.5 menunjukkan bahwa gelombang yang terjadi memiliki ketinggian dan periode yang tidak teratur. Data yang didapat bisa kompleks dan banyak sehingga diperlukan analisis secara statistik untuk menentukan ketinggian gelombang. Selain melalui perhitungan statistik, data historis gelombang di suatu tempat bisa merepresentasikan kondisi gelombang. Representasi gelombang itu dinorasikan dengan H_s .

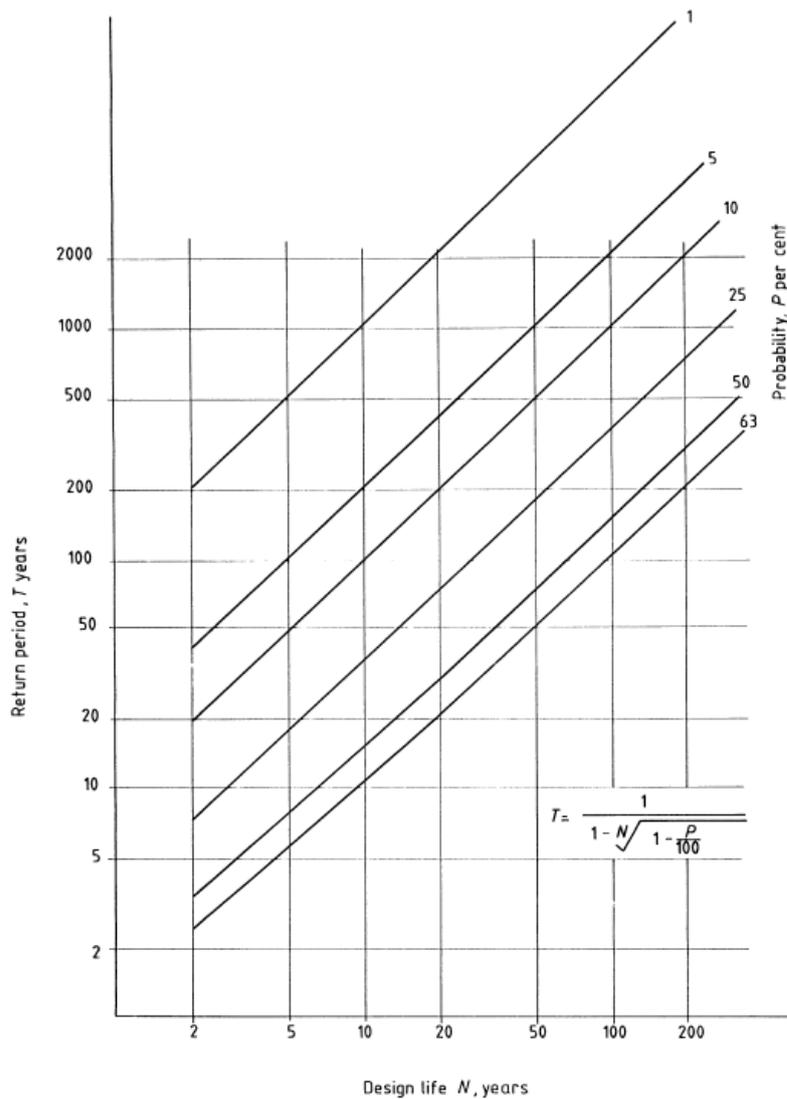
H_s bisa dihitung dengan cara merata-rata 1/3 data teratas dari gelombang tertinggi. Selain mencari rata-rata dari 1/3 data tertinggi, bisa juga digunakan 10%, 5% atau 1% data gelombang tertinggi. H_{10} bisa bernilai 1,27 H_s ; H_5 bisa bernilai 1,37 H_s ; dan H_1 bisa bernilai 1,67 H_s . Penentuan desain gelombang rencana untuk struktur harus mempertimbangkan kondisi gelombang yang datang seperti, gelombang tidak pecah, gelombang pecah, atau gelombang telah pecah dan juga karakter dari struktur itu seperti geometri struktur dan porositasnya. Untuk struktur *rigid*, ketika terjadi rentetan gelombang tinggi maka gelombang tersebut berpotensi merusak keseluruhan struktur. Maka dari itu dipakailah tinggi gelombang rencana H_1 . Untuk struktur *semirigid* seperti *steel sheet-pile cell* yang bisa menyerap energi gelombang, bisa menggunakan tinggi gelombang rencana $H_{10} - H_1$. Untuk struktur fleksibel seperti *rubble mound* atau *riprap*, bisa menggunakan tinggi gelombang rencana $H_5 - H_s$. Penentuan gelombang rencana ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Penentuan Jenis dan Nilai Gelombang Representatif
 Sumber: Penulis

Jenis struktur	Jenis gelombang representatif	Nilai gelombang representatif
<i>Rigid</i>	H_1	$1,67 H_s$
<i>Semi-rigid</i>	$H_1 - H_{10}$	$1,67 H_s - 1,27 H_s$
<i>Flexible</i>	$H_5 - H_s$	$1,37 H_s - H_s$

5.1.5. Perkiraan Gelombang Dengan Periode Ulang

Untuk menetapkan gelombang dengan periode ulang tertentu dibutuhkan data hasil pengukuran gelombang selama beberapa tahun. Dari setiap tahun pencatatan dapat ditentukan gelombang representatifnya. Berdasar data representatif untuk beberapa tahun dapat diperkirakan gelombang yang diharapkan atau dilampaui satu kali dalam T tahun. Gelombang ini dikenal dengan gelombang periode ulang T tahun. Penentuan T tidak selalu sama dengan periode ulang yang ingin kita cari. Jika *breakwater* didesain dengan umur rencana 50 tahun dan menahan gelombang dengan periode ulang 50 tahun, maka sebenarnya ada kemungkinan 63% gelombang yang terjadi bisa melebihi tinggi gelombang rencana. Probabilitas terlampaui sebesar 63% ini terjadi selama umur rencana, yaitu 50 tahun. Jadi terjadinya tinggi gelombang yang terlampaui adalah 63% dalam kurun waktu 50 tahun. Gambar 5.6 menunjukkan hubungan antara umur rencana, periode ulang, dan probabilitas kejadian terlampaui. Dengan adanya hubungan antara umur rencana dengan periode ulang, perlu dipertimbangkan lagi berapa tahun periode ulang gelombang yang diinginkan untuk didesain. Harus diseimbangkan antara probabilitas terjadinya gelombang dengan kerusakan yang timbul. Direkomendasikan untuk meninjau kestabilan struktur terhadap gelombang periode ulang dengan probabilitas terlampaui sebesar 5%.



Gambar 5.6 Hubungan Umur Rencana, Periode Ulang, dan Probabilitas Kejadian Terlampaui
 Sumber: (BS 6349, 1991)

Ada dua jenis distribusi yang sering dipakai untuk memprediksi gelombang periode ulang yaitu distribusi Gumbel (Feisher-Tippett Type 1) dan distribusi Weibull (CERC,1984). Kedua distribusi tersebut ditampilkan pada Persamaan 5.12 untuk distribusi Gumbel dan Persamaan 5.13 untuk distribusi Weibull.

$$P(H_S \leq \widehat{H}_S) = e^{-e^{-\left(\frac{H_S - B}{A}\right)}} \quad (5.12)$$

$$P(H_S \leq \widehat{H}_S) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{H_S - B}{A}\right)^k}} \quad (5.13)$$

dengan:

$P(H_S \leq \widehat{H}_S)$ = probabilitas bahwa \widehat{H}_S tidak dilampaui

H = tinggi gelombang representatif

\widehat{H}_S = tinggi gelombang dengan nilai tertentu

A = parameter skala
 B = parameter lokasi
 κ = parameter bentuk

Data masukan disusun dalam urutan dari besar ke kecil. Selanjutnya probabilitas ditetapkan untuk setiap tinggi gelombang. Persamaan 5.14 merupakan persamaan probabilitas untuk distribusi Gumbel dan Persamaan 5.15 untuk persamaan probabilitas Weibull.

$$P(H_S \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,44}{N_T + 0,12} \quad (5.14)$$

$$P(H_S \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0,2 - \frac{0,27}{\sqrt{\kappa}}}{N_T + 0,2 + \frac{0,27}{\sqrt{\kappa}}} \quad (5.15)$$

dengan:

$P(H_S \leq \widehat{H}_{sm})$ = probabilitas dari tinggi gelombang representatif ke m yang tidak dilampaui

H_{sm} = tinggi gelombang urutan ke m

m = nomorurut tinggi gelombang gelombang signifikan

N_T = jumlah kejadian gelombang selama pencatatan (bisa lebih besar dari gelombang representatif)

Parameter A dan B pada Persamaan 5.12 dan Persamaan 5.13 dihitung dari metode kuadrat terkecil untuk setiap tipe distribusi yang digunakan. Hitungan didasarkan pada analisis regresi linier dari Persamaan 5.16.

$$H_m = \hat{A}y_m + \hat{B} \quad (5.16)$$

Dimana y_m dihitung berdasarkan Persamaan 5.17 untuk untuk distribusi Gumbel dan Persamaan 5.18 untuk distribusi Weibull.

$$y_m = -\ln\{-\ln F(H_S \leq H_{sm})\} \quad (5.17)$$

$$y_m = [-\ln\{1 - F(H_S \leq H_{sm})\}]^{\frac{1}{\kappa}} \quad (5.18)$$

Tinggi gelombang signifikan untuk berbagai periode ulang dihitung dari fungsi probabilitas dengan Persamaan 5.19.

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B} \quad (5.19)$$

Dimana y_r dihitung berdasarkan Persamaan 5.20 untuk untuk distribusi Gumbel dan Persamaan 5.21 untuk persamaan probabilitas Weibull

$$y_r = -\ln\left\{-\ln\left(1 - \frac{1}{L T_r}\right)\right\} \quad (5.20)$$

$$y_r = \{-\ln(L T_r)\}^{\frac{1}{k}} \quad (5.21)$$

dengan:

H_{sr} = tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang T_r

T_r = periodel ulang (tahun)

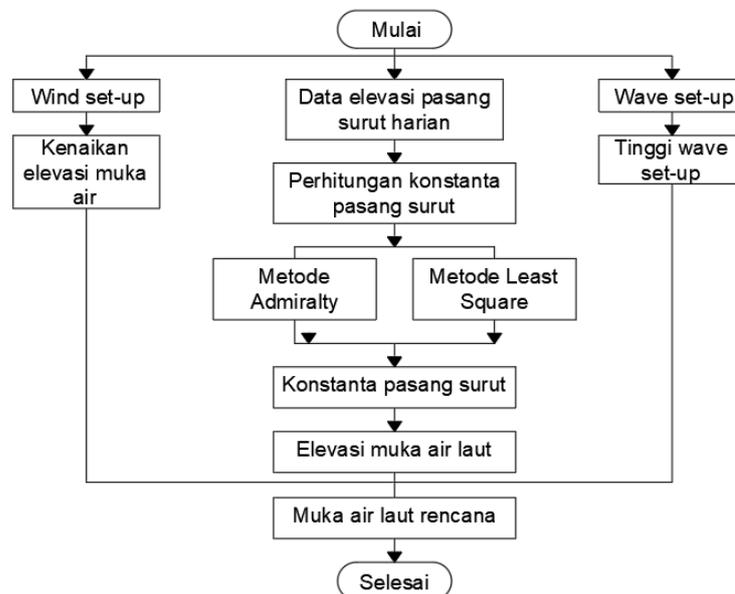
K = panjang data (tahun)

L = rerata jumlah kejadian per tahun

Dari berbagai jenis distribusi dan variasi nilainya, dipilihlah nilai R^2 yang tertinggi dari hasil regresi linear antara nilai y_m dan H_{sm} sebagai gelombang periode ulang.

5.2. Elevasi Muka Air Laut

Kenaikan muka air laut dipengaruhi oleh banyak hal. Kesemuanya itu berpengaruh pada elevasi muka air laut rencana pada perencanaan struktur. Gambar 5.7 merupakan diagram alir untuk menghitung muka air laut rencana.



Gambar 5.7 Diagram Alir Perhitungan Elevasi Muka Air Rencana
Sumber: Penulis

5.2.1. Pasang Surut

Data pasang surut digunakan untuk mengetahui posisi muka air laut absolut terendah, dan pola pasang surutnya. Analisis data pasang-surut digunakan metode analisis harmonik. Untuk perumusannya menggunakan Bilangan Formzahl seperti pada Persamaan 5.22.

$$F = \frac{A(O_1) + A(K_1)}{A(M_2) + A(S_2)} \quad (5.22)$$

Tipe pasang surut:

$0,0 < F < 0,25$ = pasut semidiurnal

$0,25 < F \leq 1,50$ = campuran, dominan pasut semidiurnal

$1,50 < F \leq 3,0$ = campuran, dominan pasut diurnal

$3,0 < F$ = pasut diurnal

1. Metode Admiralty

Proses perhitungan komponen pasut menggunakan metode Admiralty biasanya untuk data pasut jangka pendek, yaitu 15 piantan atau 29 piantan. Untuk data pasut lebih dari 29 piantan, salah satu cara yang umum digunakan adalah dengan menghitung rata-rata dari beberapa perhitungan 29 piantan terhadap data tersebut. Output yang dihasilkan dalam metode admiralty meliputi amplitudo (A) dan fase (g) dari setiap komponen pasang surut dan elevasi beberapa muka air penting. Komponen pasang surut hasil pengolahan metode admiralty meliputi 9 komponen utama pasang surut yaitu: M2, S2, N2, K1, O1, P1, M4, MS4, dan K2. Sedangkan nilai elevasi yang dihasilkan dari pengolahan data ini antara lain: MSL, HWL, HHWL dan LLWL. Dalam pengolahan lebih lanjut, nilai amplitudo (A) digunakan untuk menentukan nilai Formzhal (F), sehingga akan didapatkan tipe pasang surut pada lokasi penelitian.

2. Metode *Least Square*

Metode *least square* adalah metode yang digunakan untuk menganalisis komponen pasut sehingga elevasi pasut dapat diprediksi. Komponen pasut yang timbul oleh faktor astronomi dan pasang surut perairan dangkal bersifat periodik, sedangkan gangguan faktor meteorologi bersifat musiman dan kadang-kadang sesaat saja. Tanpa memperhatikan faktor meteorologi, maka elevasi pasang surut merupakan penjumlahan dari komponen yang membentuknya dan dapat dinyatakan dalam fungsi sinus. Persamaannya dapat dituliskan pada Persamaan 5.23 (Ongkosongo, 1989).

$$\eta(t) = S_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t - P_i) \quad (5.23)$$

dengan:

$\eta(t)$ = elevasi pasang surut fungsi dari waktu

A_i = Amplitudo komponen ke-i

$\omega i = 2\pi/T_i$, T_i = Periode komponen ke- i

P_i = fase komponen ke- i

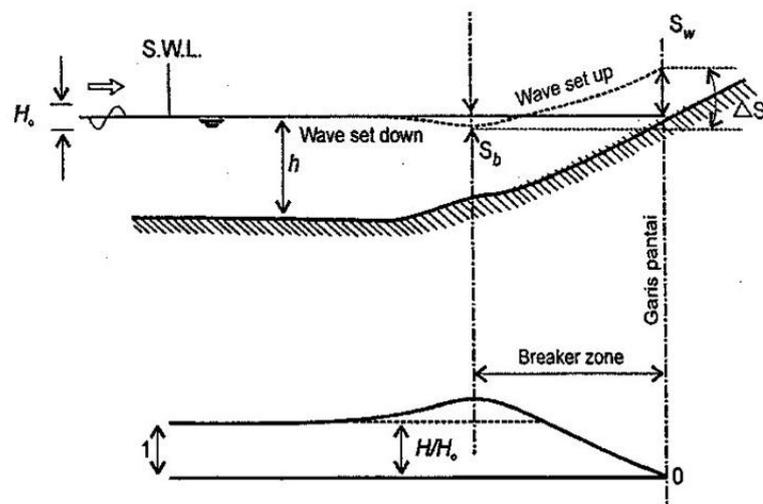
S_0 = duduk tengah (mean sea level)

t = waktu

N = jumlah komponen

5.2.2. Kenaikan Muka Air Laut karena Gelombang (*Wave Set-Up*)

Gelombang yang datang dari laut menuju pantai menyebabkan fluktuasi muka air di daerah pantai. Saat gelombang pecah, elevasi muka air laut akan menurun terhadap muka air diamnya. Kemudian dari posisi gelombang pecah, elevasi muka air laut akan menaik secara berangsur-angsur ke arah pantai. Turunnya muka air laut disebut *wave set-down* sedangkan naiknya muka air laut disebut *wave set-up*. Ilustrasi proses *wave set-up* dan *wave set-down* ditampilkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Wave Set-Up dan Wave Set-Down
Sumber: (CERC, 1984)

Wave set-up di pantai dapat dihitung menggunakan teori Longuet-Higgins dan Stewart (1963, dalam CERC, 1984). Besar *wave set-down* di daerah gelombang pecah dihitung melalui Persamaan 5.24.

$$S_b = -\frac{0,536H_b^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{gT}} \quad (5.24)$$

dengan:

S_b = *set-down* di daerah gelombang pecah

T = periode gelombang

H'_0 = tinggi gelombang laut dalam ekivalen

d_b = kedalaman gelombang pecah

g = percepatan gravitasi

Wave set-up di pantai dihitung menggunakan Persamaan 5.25.

$$S_w = \Delta S - S_b \quad (5.25)$$

Longuet-Higgins dan Stewart melakukan analisis data hasil percobaan yang dilakukan Saville (1961, dalam CERC, 1984) dan hasilnya ΔS senilai 0,15 d_b . Dengan menganggap bahwa $d_b = 1,28 H_b$ dan mensubstitusikan Persamaan 1 ke dalam Persamaan 2, maka perumusan S_w dapat dilihat di Persamaan 5.26.

$$S_w = 0,19 \left(1 - 2,82 \sqrt{\frac{H_b}{gT^2}} \right) H_b \quad (5.26)$$

5.2.3. Kenaikan Muka Air Laut karena Badai (*Wind Set-Up*)

Angin dengan kecepatan besar yang terjadi di atas permukaan laut bisa membangkitkan fluktuasi muka air laut yang besar di sepanjang pantai. Besar perubahan elevasi muka air laut tergantung pada kecepatan angin, fetch, kedalaman air dan kemiringan dasar. Kenaikan muka air dapat menyebabkan genangan yang luas di daratan. Penurunan muka air yang cepat setelah badai dapat menyebabkan kerusakan karena sapuan air dari genangan kembali ke laut. Kenaikan elevasi muka air karena badai dapat dihitung dengan Persamaan 5.27 dan Persamaan 5.28 berikut.

$$\Delta h = \frac{F \cdot i}{2} \quad (5.27)$$

$$\Delta h = F \cdot c \frac{V^2}{2gd} \quad (5.28)$$

Keterangan:

Δh = kenaikan elevasi muka air karena badai (m)

F = panjang *fetch* (m)

i = kemiringan muka air

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

V = kecepatan angin (m/s)

d = kedalaman air (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

5.2.4. Elevasi Muka Air Laut Rencana

Elevasi muka air laut merupakan elevasi muka air laut yang ditetapkan berdasarkan data pasang surut. Beberapa jenis elevasi muka air laut (Triatmodjo, 2011):

1. Muka air tinggi (*high water level*, HWL) adalah muka air tertinggi yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut
2. Muka air rendah (*low water level*, LWL) adalah muka air terendah yang dicapai pada saat air pasang dalam satu siklus pasang surut
3. Muka air tinggi rerata (*mean high water level*, MHWL) adalah rata-rata dari muka air tertinggi selama periode 19 tahun
4. Muka air rendah rerata (*mean low water level*, MLWL) adalah rata-rata dari muka air terendah selama periode 19 tahun
5. Muka air laut rerata (*mean sea level*, MSL) adalah muka air rata-rata dari muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata. Elevasi ini digunakan sebagai referensi untuk elevasi di daratan
6. Muka air tinggi tertinggi (*highest high water level*, HHWL) adalah air tertinggi pada saat pasang surut purnama atau bulan mati
7. Muka air rendah terendah (*lowest low water level*, LLWL) adalah air terendah pada saat pasang surut purnama atau bulan mati

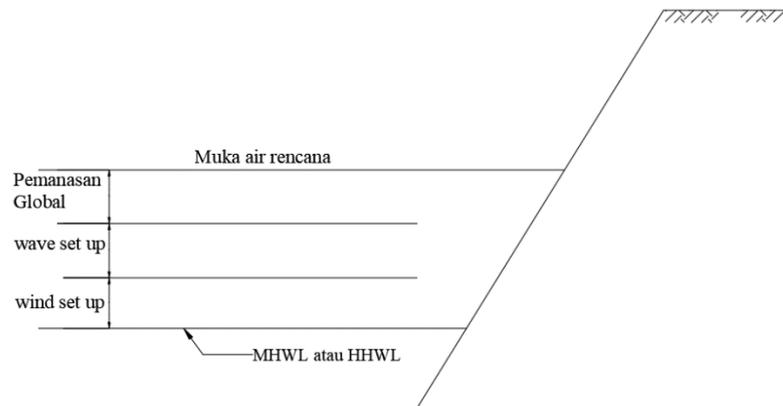
Ketujuh elevasi tadi didapat melalui penjumlahan konstanta harmonik pasang surut. Berikut rumusannya pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Persamaan Untuk Menghitung Elevasi Muka Air Laut

Elevasi muka air laut	Persamaan
HWL	$S_0 + \text{semua konstanta pasang surut}$
LWL	$S_0 - \text{semua konstanta pasang surut}$
MHWL	$S_0 + (M_2 + K_1 + O_1)$
MLWL	$S_0 - (M_2 + K_1 + O_1)$
MSL	S_0
HHWL	$S_0 + (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1)$
LLWL	$S_0 - (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1)$

Penggunaan elevasi muka air laut dalam perencanaan bergantung pada fungsi bangunan yang direncanakan. Perencanaan pemecah gelombang memakai MHWL atau HHWL sebagai acuan untuk menentukan elevasi puncak. Elevasi muka air laut rencana suatu pemecah gelombang

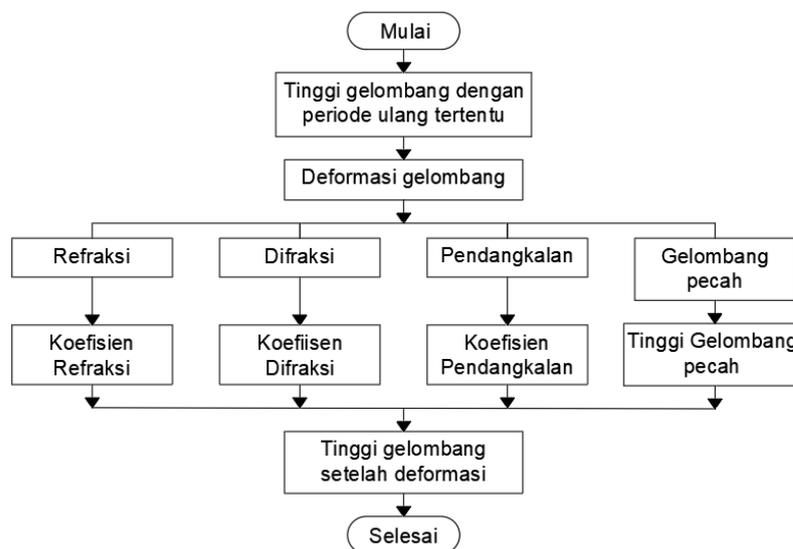
merupakan penjumlahan dari beberapa parameter seperti pasang surut, *wave set-up*, dan *wind set-up*. Gambar 5.9 merupakan contoh penentuan elevasi muka air laut rencana.



Gambar 5.9 Elevasi Muka Air Rencana
Sumber: (CERC, 1984)

5.3. Deformasi Gelombang

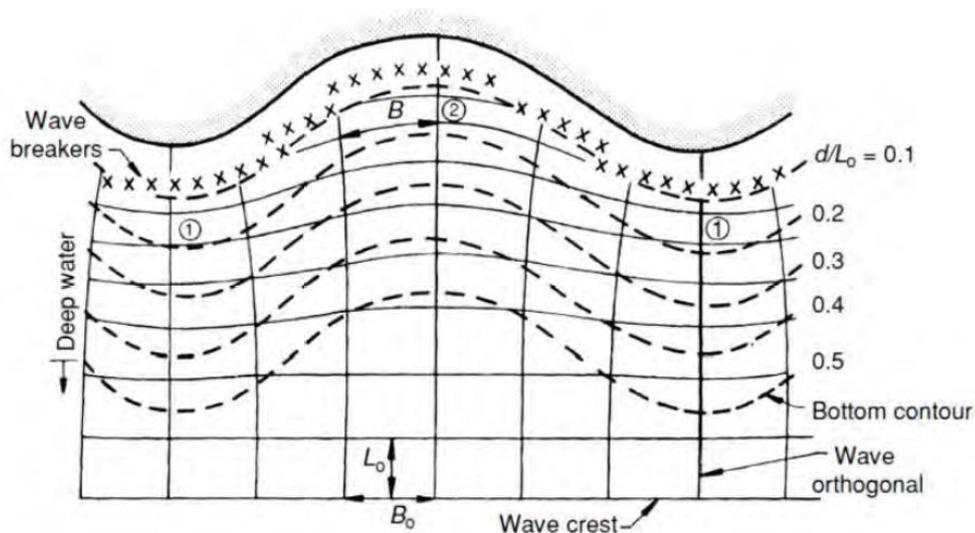
Tinggi gelombang yang didapat dari hasil perhitungan periode ulang merupakan gelombang di laut dalam. Saat menjalar ke pantai atau terkena rintangan, gelombang akan berdeformasi. Deformasi gelombang dipengaruhi banyak hal seperti kedalaman air dan benda-benda yang menghalangi. Gambar 5.10 menunjukkan tahapan pengerjaannya.



Gambar 5.10 Diagram Alir Perhitungan Deformasi Gelombang
Sumber: Penulis

5.3.1. Refraksi

Refraksi terjadi karena adanya perubahan kedalaman laut. Refraksi mulai terjadi setelah gelombang menjalar melewati laut dalam, yaitu sedalam $d/L_0 < 0,5$. Contoh refraksi ditampilkan pada Gambar 5.11.



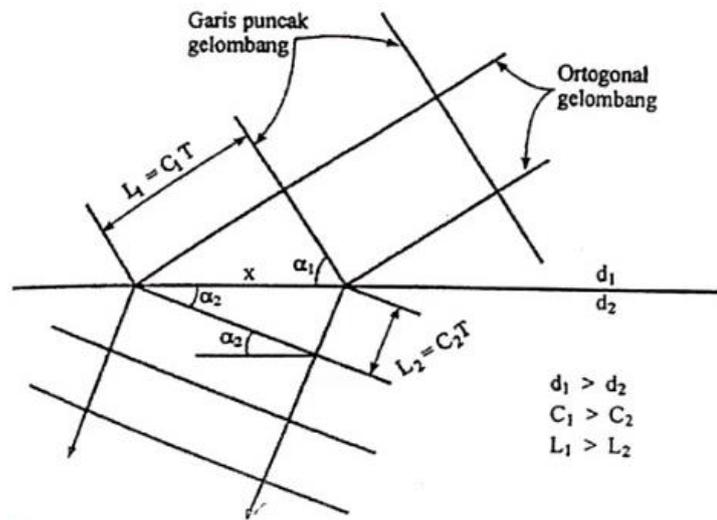
Gambar 5.11 Refraksi Gelombang
Sumber: (CERC, 1984)

Suatu gelombang berjalan dengan panjang gelombang, L_0 , dan garis puncak gelombang, B_0 , yang tegak lurus dengan arah datang gelombang. Setelah melewati kontur dengan kedalaman relatif $d/L_0 < 0,5$; garis puncak gelombang akan berbelok secara perlahan sehingga sejajar dengan kontur laut. Pembelokan ini terjadi karena perbedaan kecepatan pada puncak gelombang. Ada satu sisi puncak gelombang yang berjalan di kedalaman yang lebih rendah, sehingga kecepatannya pun berkurang. Karena sisi satunya berjalan di kedalaman yang lebih dalam dari sisi lainnya, maka kecepatannya lebih tinggi. Akibatnya, puncak gelombang berbelok dan berjalan mengikuti kontur. Ada beberapa anggapan yang digunakan dalam teori refraksi ini (Triatmodjo, 2016):

1. Energi gelombang antara dua ortogonal adalah konstan
 2. Arah perjalanan gelombang tegak lurus pada puncak gelombang, yaitu dalam arah ortogonal gelombang
 3. Cepat rambat gelombang yang mempunyai periode tertentu di suatu tempat hanya tergantung pada kedalaman di tempat tersebut
 4. Perubahan topografi dasar adalah berangsur-angsur
 5. Gelombang mempunyai puncak yang panjang, periode konstan, amplitudi kecil dan monokromatik
 6. Pengaruh arus, angin, dan refleksi dari pantai dan perubahan topografi dasar laut diabaikan.
- Prinsip refraksi gelombang mirip dengan refraksi cahaya yang melewati dua medium. Dengan kesamaan tersebut maka pemakaian hukum Snell pada optik dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah refraksi gelombang.

Pada Gambar 5.12 suatu deretan gelombang menjalar dari laut dengan kedalaman d_1 menuju kedalaman d_2 dengan perubahan kedalaman mendadak dan dianggap tidak ada refleksi

gelombang pada perubahan tersebut. Karena adanya perubahan kedalaman maka cepat rambat dan panjang gelombang berubah dari C_1 dan L_1 menjadi C_2 dan L_2 .



Gambar 5.12 Hukum Snell untuk Refraksi Gelombang
Sumber: (CERC, 1984)

$$\sin \alpha_2 = \left(\frac{C_2}{C_1} \right) \sin \alpha_1 \quad (5.29)$$

dengan:

α_1 = sudut antara garis puncak gelombang dengan kontur dasar di mana gelombang melintas

α_2 = sudut yang sama yang diukur saat garis puncak gelombang melintasi kontur dasar berikutnya

C_1 = kecepatan gelombang pada kedalaman di kontur pertama

C_2 = kecepatan gelombang pada kedalaman di kontur kedua

Kemudian untuk menghitung koefisien refraksi digunakan Persamaan 5.30

$$Kr = \sqrt{\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}} \quad (5.30)$$

dengan:

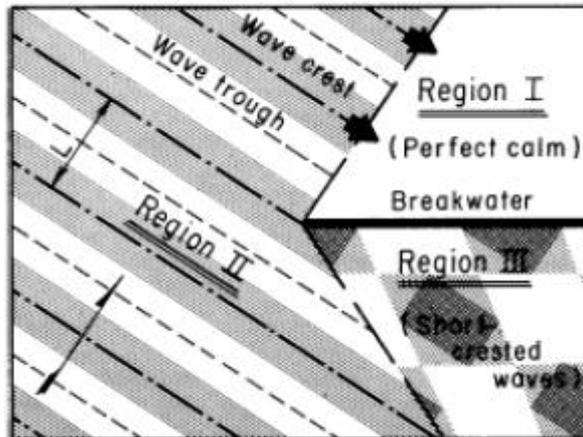
α_1 = sudut antara garis puncak gelombang dengan kontur dasar di mana gelombang melintas

α_2 = sudut yang sama yang diukur saat garis puncak gelombang melintasi kontur dasar

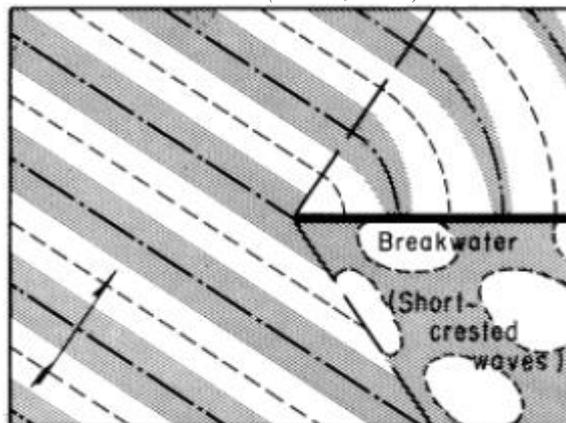
5.3.2. Difraksi

Difraksi merupakan pembelokan gelombang karena gelombang tersebut menghantam suatu rintangan. Gelombang akan berbelok di sekitar ujung rintangan dan masuk di daerah

belakang rintangan (Triatmodjo, 2011). Perbedaan gelombang saat sebelum dan sesudah terdifraksi diilustrasikan di Gambar 5.13 dan Gambar 5.14.



Gambar 5.13 Gelombang Sebelum Terdifraksi
Sumber: (CERC, 1984)



Gambar 5.14 Gelombang Sesudah Terdifraksi
Sumber: (CERC, 1984)

Dari Gambar 5.13 dan Gambar 5.14 ditampilkan bahwa ada perbedaan kondisi perairan di belakang pemecah gelombang setelah dan sebelum terjadinya difraksi. Sebelum terjadinya difraksi, kondisi perairan di belakang pemecah gelombang cenderung tenang. Namun setelah terjadinya difraksi, terdapat gelombang di belakang pemecah gelombang. Terjadi transfer energi ke daerah di belakang pemecah gelombang sehingga menyebabkan terbentuknya gelombang. Gelombang yang terbentuk di belakang pemecah gelombang memiliki ketinggian yang lebih rendah daripada sebelumnya. Persamaan 5.31 merupakan rumus perhitungan gelombang terdifraksi untuk pemecah gelombang tunggal.

$$H_A = K' \cdot H_P \quad (5.31)$$

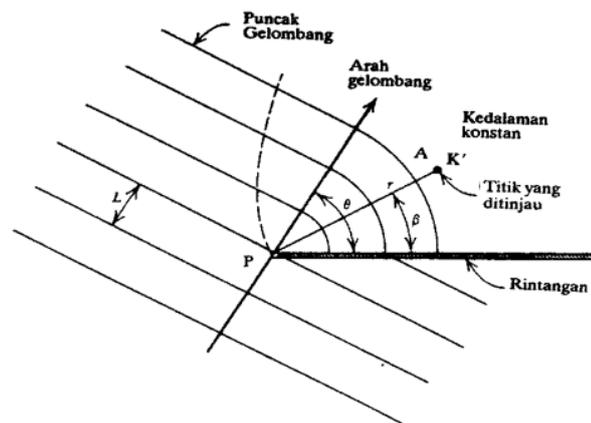
dengan:

H_A = tinggi gelombang terdifraksi

H_P = tinggi gelombang datang

K' = koefisien difraksi

Koefisien difraksi, K' , merupakan fungsi dari r , jarak titik tinjau terhadap ujung rintangan, β , sudut antara rintangan dan garis yang menghubungkan titik tersebut dengan ujung rintangan, dan θ , sudut antara arah penjalaran gelombang dan rintangan. Komponen-komponen dalam perhitungan difraksi ditampilkan pada Gambar 5.15.



Gambar 5.15 Difraksi Gelombang di Belakang Rintangan
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Untuk difraksi pada *breakwater* tunggal, bisa menggunakan koefisien difraksi, K' , yang dirumuskan oleh Wiegel, dalam (Sorensen, 1978) yang ditampilkan pada Gambar 5.16 dan Gambar 5.17.

Perumusan nilai koefisien difraksi, K' , untuk dua pemecah gelombang dengan celah di antaranya tidak menggunakan tabel melainkan menggunakan grafik yang dikembangkan oleh Johnson (1952, 1953, dalam Wiegel, 1964). Ada dua karakteristik celah yaitu, untuk lebar celah yang berukuran kurang dari lima kali panjang gelombang dan untuk lebar celah yang berukuran lebih dari lima kali panjang gelombang.

r/L	β (derajat)												
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\theta = 15^\circ$													
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	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
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
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
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
$\theta = 30^\circ$													
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	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
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
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
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
$\theta = 45^\circ$													
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	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
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
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
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
$\theta = 60^\circ$													
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	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
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
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
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
$\theta = 75^\circ$													
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	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
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
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
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
$\theta = 90^\circ$													
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	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
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
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
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

Gambar 5.16 Tabel Koefisien Difraksi Gelombang, K' , Dari Gelombang Datang Dengan Sudut θ Sebagai Fungsi r/L dan β (Bagian I)
 Sumber: (Triatmodjo, 2016)

r/L	β (derajat)												
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\theta = 105^\circ$													
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	0.20	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	0.14	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	0.09	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	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.12	0.20	0.52	1.14	1.07	0.97	0.99	1.00
$\theta = 120^\circ$													
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	0.18	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	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.20	0.26	0.16	0.55	0.83	1.07	1.03	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	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.13	0.29	0.52	1.13	1.06	0.98	1.00
$\theta = 135^\circ$													
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	0.18	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	0.12	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	0.08	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	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.13	0.21	0.53	1.12	1.00
$\theta = 150^\circ$													
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	0.16	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	0.12	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	0.07	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	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.13	0.22	0.54	1.10	1.00
$\theta = 165^\circ$													
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	0.16	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	0.11	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	0.07	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	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.11	0.21	0.58	1.00
$\theta = 180^\circ$													
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	0.10	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	0.02	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	0.02	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	0.01	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.20	0.36	1.00

Gambar 5.17 Tabel Koefisien Difraksi Gelombang, K' , Dari Gelombang Datang Dengan Sudut θ Sebagai Fungsi r/L dan β (Bagian II)
 Sumber: (Triatmodjo, 2016)

5.3.3. Pendangkalan Gelombang

Pendangkalan merupakan proses berkurangnya kedalaman perairan. Saat gelombang berjalan menuju perairan yang lebih dangkal, terjadi perubahan tinggi gelombang. Persamaan 5.32 merupakan persamaan untuk mencari tinggi gelombang setelah pendangkalan.

$$H_A = K_S \cdot H_P \quad (5.32)$$

dengan:

H_A = tinggi gelombang setelah pendangkalan

H_P = tinggi gelombang datang

K_S = koefisien *shoaling*

Perhitungan Koefisien *Shoaling* didapat menggunakan Persamaan 5.33.

$$K_S = \sqrt{\frac{C_0}{2nC}} \quad (5.33)$$

dengan:

$$n = C_g/C$$

Persamaan 5.33 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 5.34.

$$K_S = \sqrt{\frac{C_0}{2C_g}} \quad (5.34)$$

5.3.4. Gelombang Pecah

Gelombang mengalami perubahan bentuk saat menjalar menuju perairan yang lebih dangkal. Perubahan gelombang mulai terjadi saat $d/\lambda < 0,5$ (Triatmodjo, 2016). Pada laut dalam, profil gelombang cenderung sinusoidal. Bentuk gelombang akan berubah menjadi lebih tajam di puncak dan datar di lembah saat gelombang menjalar menuju perairan yang lebih dangkal. Kestabilan gelombang terjadi saat rasio H_0 dan L_0 lebih kecil dari $1/7$. Ketika nilai H_0/L_0 sama dengan $1/7$, kecepatan partikel di puncak gelombang sama dengan kecepatan rambat gelombang. Ketika gelombang menjalar dengan kemiringan lebih besar dari $1/7$, maka kecepatan partikel di puncak akan lebih besar dan menyebabkan gelombang pecah. Kemiringan H_0/L_0 dipengaruhi oleh kedalaman relatif, d/L , dan kemiringan laut, m . Kedalaman gelombang saat pecah diberi notasi d_b dan ketinggian gelombang saat pecah diberi notasi H_b . Gelombang pecah dapat dibedakan menjadi tiga tipe berikut (Triatmodjo, 2016):

1. *Spilling*

Spilling biasanya terjadi apabila gelombang dengan kemiringan kecil menuju ke pantai yang datar. Gelombang mulai pecah pada jarak yang cukup jauh dari pantai dan pecahnya terjadi berangsur-angsur. Buih terjadi pada puncak gelombang selama mengalami pecah dan meninggalkan suatu lapis tipis buih pada jarak yang cukup panjang.

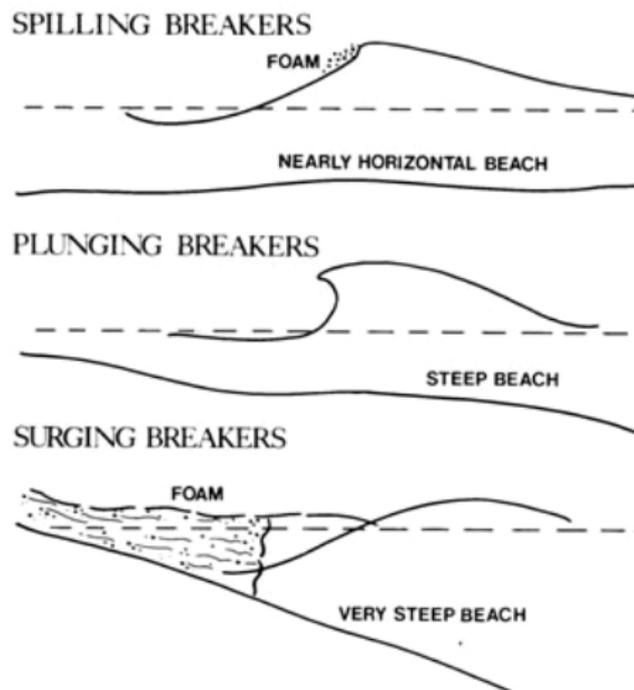
2. *Plunging*

Apabila kemiringan gelombang dan dasar bertambah, gelombang akan pecah dan puncak gelombang akan memutar dengan massa air pada puncak gelombang akan terjun ke depan. Energi gelombang pecah dihancurkan dalam turbulensi, sebagian kecil dipantulkan ke pantai ke laut, dan tidak banyak gelombang baru terjadi pada air yang dangkal

3. *Surging*

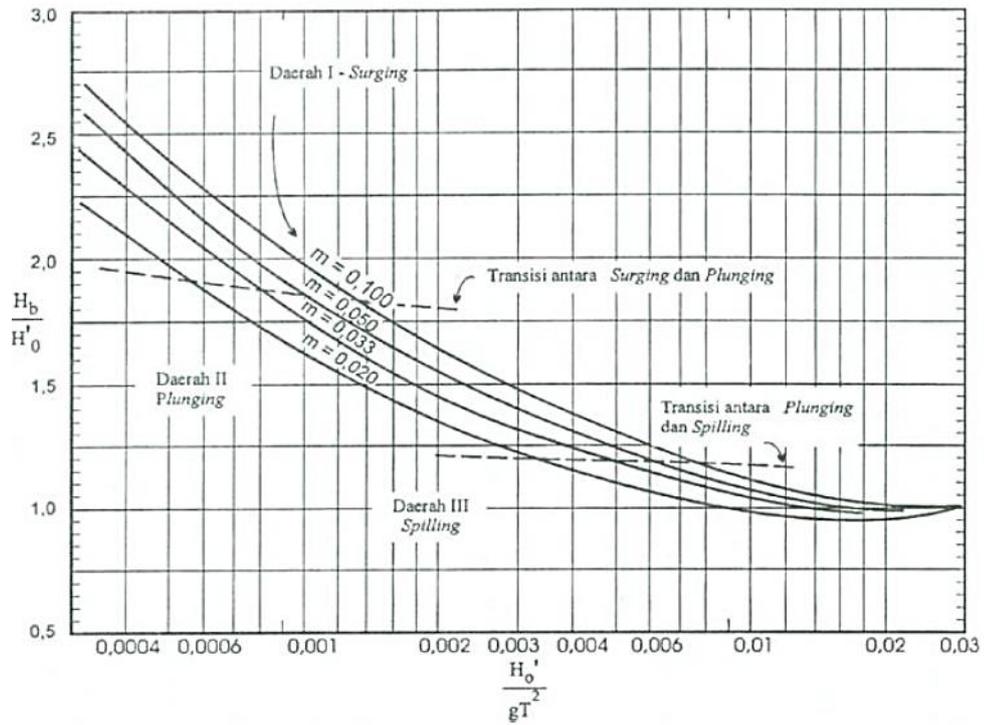
Surging terjadi pada pantai dengan kemiringan yang sangat besar seperti yang terjadi pada pantai berkarang. Darah gelombang pecah sangat sempit, dan sebagian besar energi dipantulkan kembali ke laut dalam. Gelombang pecah tipe *surging* ini mirip dengan *plunging*, tetapi sebelum puncaknya terjun dasar gelombang sudah pecah.

Ilustrasi ketiga jenis gelombang ini ditunjukkan pada Gambar 5.18.

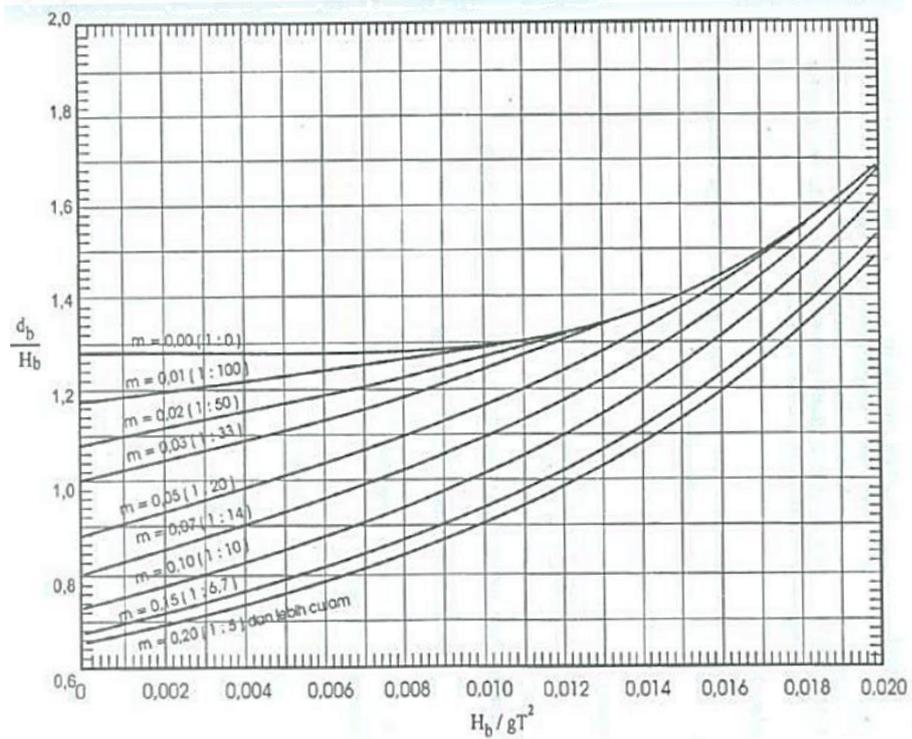


Gambar 5.18 Tipe Gelombang Pecah
Sumber: (Robertson, et al., 2013)

Gelombang pecah terjadi pada kedalaman tertentu dan memiliki tinggi gelombang tersendiri. Penelitian Iversen, Galvin, dan Goda dalam (CERC, 1984) membuktikan bahwa H_b/H_0' dan d_b/h_b tergantung pada kemiringan pantai dan kemiringan gelombang datang. Gambar 5.19 menunjukkan hubungan H_b/H_0' dan H_0/L_0' untuk berbagai kemiringan dasar laut. Gambar 5.20 menunjukkan hubungan antara d_b/h_b dan H_b/gT^2 .



Gambar 5.19 Penentuan Tinggi Gelombang Pecah
Sumber: (CERC, 1984)



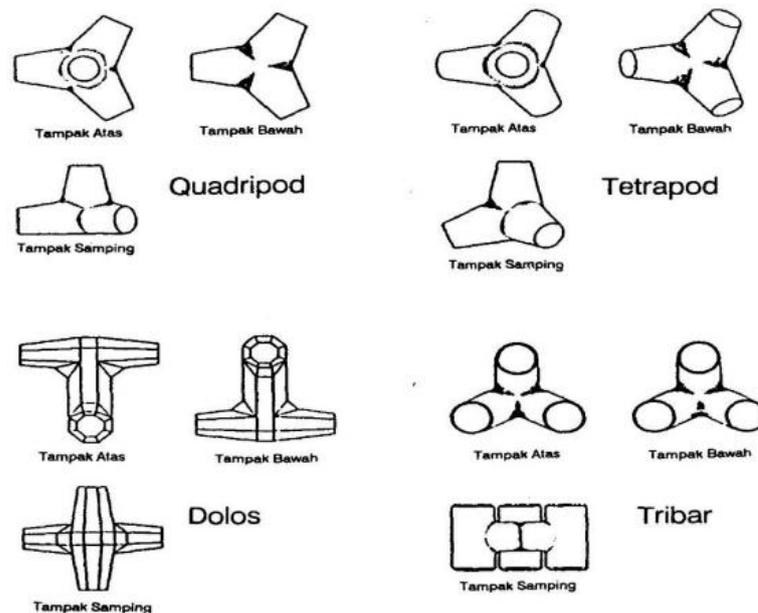
Gambar 5.20 Penentuan Kedalaman Gelombang Pecah
Sumber: (CERC, 1984)

5.4. Stabilitas Struktur Fleksibel

Rubble – mound breakwaters merupakan pemecah gelombang yang terbuat dari batu yang ditumpuk. Biasanya terdapat dua lapis batuan, yaitu, lapisan luar dan lapisan dalam.

Lapisan luar harus mampu menahan energi gelombang. Selain itu, lapisan dalam tidak boleh merembes keluar melalui celah di lapisan luar saat terkena gelombang. Ada dua jenis *rubble – mound breakwaters* yaitu *overtopping breakwaters* dan *non overtopping breakwaters*. *Overtopping breakwaters* merupakan pemecah gelombang yang didesain sehingga air bisa melimpas di atas pemecah gelombang. Penyebabnya adalah daerah yang dilindungi oleh pemecah gelombang tidak terlalu sensitif terhadap gelombang yang terjadi. Sedangkan *non overtopping breakwaters* merupakan pemecah gelombang yang didesain sehingga air tidak diperbolehkan melimpas di atas pemecah gelombang.

Stabilitas batu lapis pelindung tergantung dari berat dan bentuk butiran serta kemiringan. Selain itu, kemampuan butiran untuk berkaitan juga memengaruhi kestabilan struktur. Butiran batu dengan sisi tajam mempunyai daya kait yang lebih tinggi sehingga memiliki kestabilan struktur. Semakin besar kemiringan pemecah gelombang maka memerlukan batu yang semakin berat. Permasalahannya adalah tidaklah mudah untuk mendapatkan batu seberat itu dalam jumlah yang sangat besar. Maka dari itu, dibuatlah batu buatan dari beton dengan bentuk tertentu. Beberapa contoh bentuk batuan ditampilkan pada Gambar 5.21.



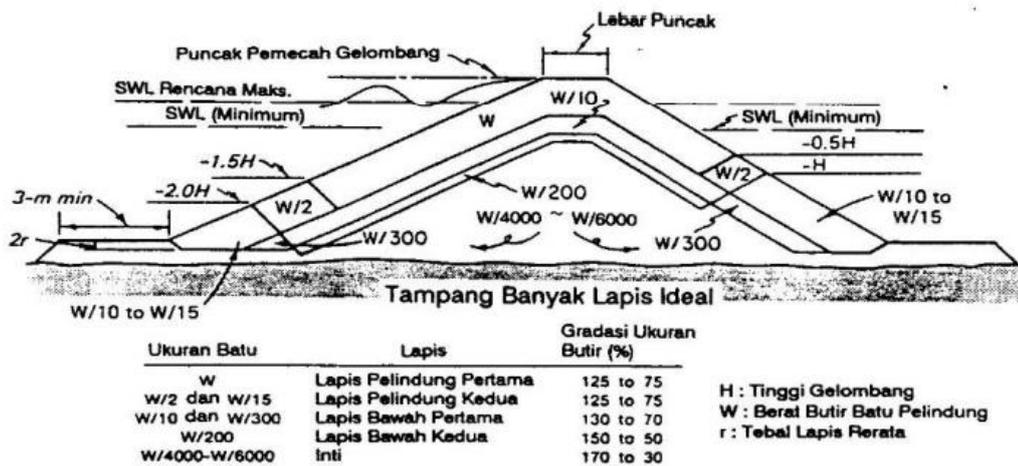
Gambar 5.21 Beberapa Jenis Batu Pelindung pada Pemecah Gelombang
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Struktur fleksibel ini biasanya terdiri dari beberapa lapisan seperti:

1. Lapisan pelindung utama (*primary cover layer*), lapis paling luar yang menerima langsung serangan gelombang. Berat unit lapis lindung harus cukup besar sehingga stabil terhadap hantaman gelombang.

2. Lapis pelindung sekunder (*secondary cover layer*), lapis paling luar yang berada pada elevasi di bawah lapis pelindung utama. Berat unit lapis lindung lebih kecil daripada lapis lindung utama.
3. Lapis bawah pertama (*first underlayer*), lapis disebelah dalam dari lapis lindung utama dan sekunder.
4. Lapis bawah kedua (*second underlayer*), lapis disebelah dalam dari lapis bawah kedua.
5. Inti (*core*), bagian paling dalam dari pemecah gelombang.
6. *Bedding layer*, lapis yang merupakan alas untuk timbunan batu di atasnya.
7. Pelindung tumit, yang berfungsi untuk melindungi gerusan pada kaki bangunan.

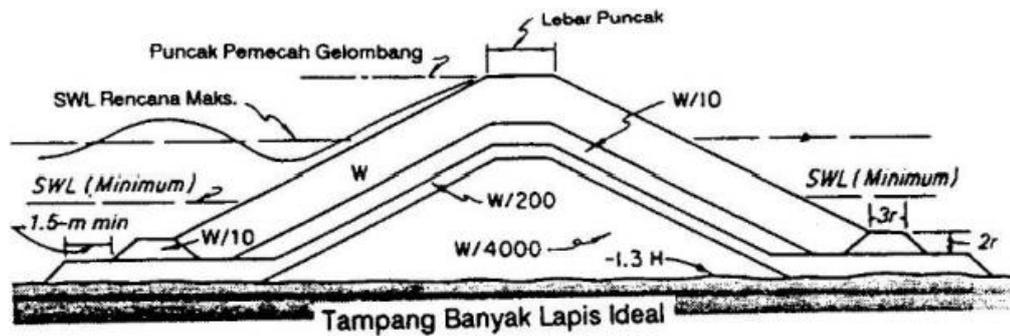
Jika tidak memungkinkan bisa menggunakan tiga lapis saja yaitu lapis pelindung utama, lapis bawah pertama, dan inti. Penampang melintang dari kedua jenis lapisan *breakwater* ditunjukkan pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23.



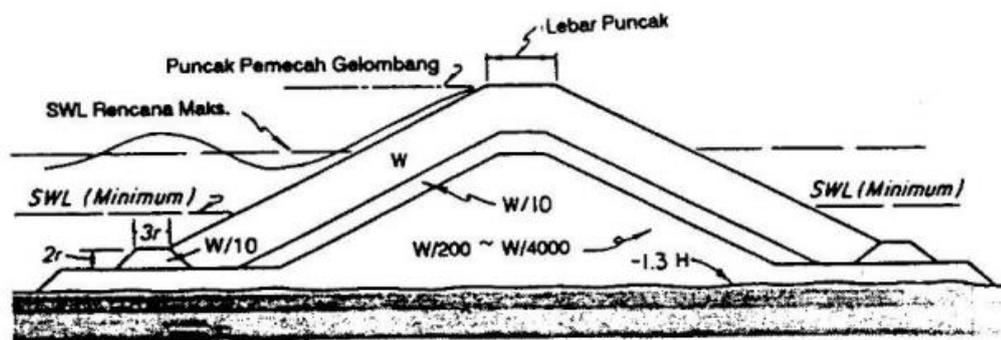
SWL : Still Water Level (muka air diam)



Gambar 5.22 Breakwater Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Dua Sisi
Sumber: (Triatmodjo, 2016)



Ukuran Batu	Lapis	Gradasi Ukuran Butir (%)	
W	Lapis Pelindung Pertama	125 to 75	H : Tinggi Gelombang W : Berat Butir Batu Pelindung r : Tebal Lapis Rerata
W/10	Berm Kaki dan Lapis Bawah Pertama	130 to 70	
W/200	Lapis Bawah Kedua	150 to 50	
W/4000	Inti	170 to 30	



Tampang Tiga Lapis Yang Disarankan

Gambar 5.23 Breakwater Sisi Miring Dengan Serangan Gelombang Pada Dua Sisi
 Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Di dalam perencanaan pemecah gelombang, ditentukan berat batu butir pelindung, yang dapat dihitung dengan menggunakan rumus Hudson pada Persamaan 5.35.

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (5.35)$$

$$S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_a}$$

dengan:

W = Berat butir batu pelindung (kg)

γ_r = Berat jenis batu (kg/m^3)

γ_a = Berat jenis air laut (kg/m^3)

H = Tinggi gelombang rencana (m)

θ = Sudut kemiringan sisi pemecah gelombang (derajat)

K_D = Koefisien stabilitas yang tergantung pada bentuk batu pelindung (batu alam atau batu buatan), kekasaran permukaan batu, ketajaman sisi-sisinya, ikatan antar butir, keadaan pemecah gelombang.

Untuk nilai K_D didapat dari Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Koefisien K_D untuk Berbagai Jenis Butiran
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

No.	Lapis lindung	n	Penempatan	Lengan bangunan		Kepala bangunan		Kemiringan
				KD		KD		
				Gelombang pecah	Gelombang tidak pecah	Gelombang pecah	Gelombang tidak pecah	
1	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*
3	Bersudut kasar	1	Acak	1*	2,9	1*	2,3	2*
4	Bersudut Kasar	2	Acak	2	4	1,9	3,2	1,5
						1,6	2,8	2
						1,3	2,3	3
5	Bersudut kasar	>3	Acak	2,2	4,5	2,1	4,2	2*
6	Bersudut kasar	2	khusus 1*	5,8	7	5,3	6,4	2*
7	Paralelipedum	2	khusus	7,0-20,0	8,5-24	-	-	-
8	Tetrapod dan Quadripod	2	Acak	7	8	5	6	1,5
						4,5	5,5	2
						3,5	4	3
9	Tribar	2	Acak	9	8	5	6	1,5
						4,5	5,5	2
						3,5	4	3
10	Dolos	2	Acak	15,8	31,8	8	16	2
						7	14	3
11	Kubus dimodifikasi	2	Acak	6,5	7,5	-	5	2*
12	Hexapod	2	Acak	8	9,5	5	7	2*
13	Tribar	1	Seragam	12	15	7,5	9,5	2*

Keterangan:

n = jumlah susunan butir batu lapis pelindung

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

2* = sampai ada ketentuan lebih lanjut mengenai nilai KD, penggunaan KD dibatasi pada kemiringan 1:1,5 sampai 1:3

3* = batu ditempatkan dengan sumbu panjangnya tegak lurus permukaan bangunan.

Elevasi puncak pemecah gelombang dipengaruhi oleh *overtopping* yang terjadi, apakah struktur itu diperbolehkan terjadi *overtopping* apa tidak. Hal lain yang memengaruhi elevasi puncak pemecah gelombang adalah *run-up* gelombang. Lebar puncak juga tergantung pada limpasan yang diijinkan. Pada kondisi limpasan diijinkan, lebar puncak minimum adalah sama dengan lebar dari tiga butir batu pelindung yang disusun berdampingan ($n=3$). Untuk bangunan tanpa terjadi limpasan, lebar puncak pemecah gelombang bisa lebih kecil. Selain batasan tersebut, lebar puncak harus cukup lebar untuk keperluan operasi peralatan pada waktu pelaksanaan dan perawatan. Lebar puncak gelombang dapat dihitung menggunakan Persamaan 5.36.

$$B = n k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.36)$$

dengan:

B = lebar puncak (m)

n = jumlah butir batu (n minimal = 2)

$k\Delta$ = koefisien lapis

W = berat batu pelindung (kg)

γ_r = berat jenis batu pelindung (kg/m^3)

Sedangkan tebal lapis pelindung dan jumlah butir tiap satu luasan diberikan oleh Persamaan 5.37 dan Persamaan 5.38.

$$t = n k \Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.37)$$

$$N = A n k \Delta \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.38)$$

dengan:

t = tebal lapisan pelindung (m)

n = jumlah lapisan batu dalam lapisan pelindung

$k\Delta$ = koefisien lapis

A = luas permukaan (m^2)

P = porositas rerata dari lapis pelindung

n = jumlah butir batu untuk satu satuan luas

γ_r = berat jenis batu pelindung (kg/m^3)

Nilai koefisien lapis, $k\Delta$ ditampilkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Koefisien Lapis
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

No	Batu Pelindung	n	Penempatan	Koef. Lapis ($k\Delta$)	Porositas (%)
1	Batu alam (halus)	2	Acak	1,02	38
2	Batu alam (kasar)	2	Acak	1,15	37
3	Batu alam (halus)	>3	Acak	1,1	40
4	Kubus	2	Acak	1,1	47
5	Tetrapod	2	Acak	1,04	50
6	Quadripod	2	Acak	0,95	49
7	Hexapod	2	Acak	1,15	47
8	Tribard	2	Acak	1,02	54
9	Dolos	2	Acak	1	63
10	Tribar	1	Seragam	1,13	47
11	Batu alam		Acak		37

Stabilitas bangunan pada bagian kaki dan fondasi juga diperlukan. Stabilitas bangunan tergantung pada kemampuan fondasi terhadap erosi yang ditimbulkan oleh serangan gelombang besar. Gelombang rencana untuk menghitung berat baru fondasi dan pelindung kaki sama dengan yang digunakan untuk perencanaan bangunannya. Dimensi dari fondasi dan pelindung kaki *breakwater* ditunjukkan pada Gambar 5.24. Berat butir batu untuk fondasi dan pelindung kaki bangunan diberikan oleh Persamaan 5.39 berikut.

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{N_s^3 (sr - 1)^3} \quad (5.39)$$

dengan:

W = berat rerata butir batu (ton)

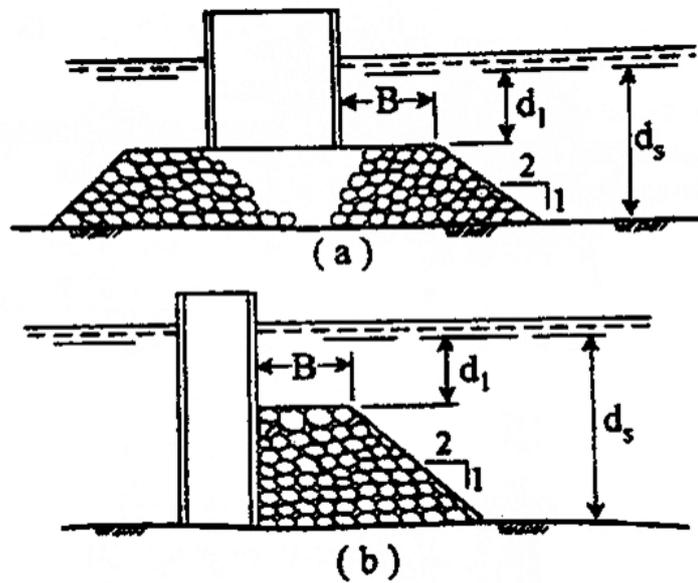
γ_r = berat jenis batu (ton/m^3)

H = tinggi gelombang rencana (m)

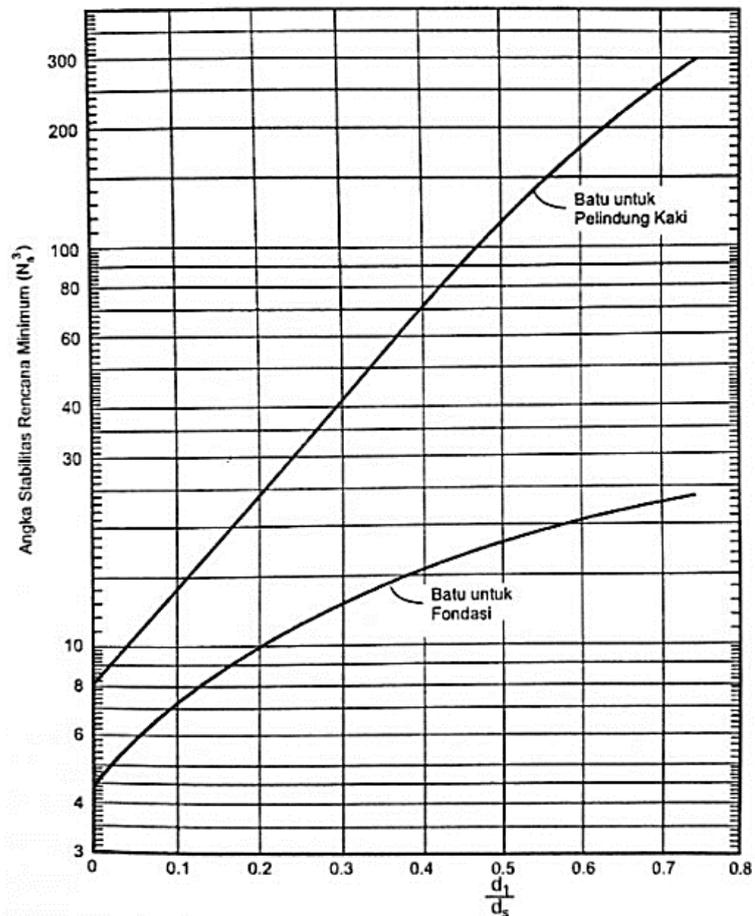
Sr = perbandingan antara berat jenis batu dan berat jenis air laut

γ_a = berat jenis air laut

N_s = angka stabilitas rencana untuk fondasi dan pelindung kaki bangunan ditunjukkan pada Gambar 5.25



Gambar 5.24 Fondasi (a) dan Pelindung Kaki (b) Dari Tumpukan Batu
Sumber: (Triatmodjo, 2016)



Gambar 5.25 Angka Stabilitas N_s Untuk Fondasi dan Pelindung Kaki
Sumber: (Triatmodjo, 2016)

5.5. Stabilitas Struktur Rigid

Bangunan sisi tegak terbuat dari dinding blok beton yang disusun secara vertikal, kaisson beton, tumpukan buis beton, dinding turap baja yang di dalamnya diisi batu, dan sebagainya. Goda (1985) memberikan rumus untuk menghitung tekanan gelombang pada dinding vertikal seperti pada Persamaan 5.40 sampai Persamaan 5.46.

$$p1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha1 + \alpha2 \cos^2 \beta) \cdot \gamma0 \cdot Hmax \quad (5.40)$$

$$p2 = \frac{p1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (5.41)$$

$$p3 = \alpha3 \cdot p1 \quad (5.42)$$

dengan:

$$\alpha1 = 0,6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right\}^2 \quad (5.43)$$

$$\alpha2 = \min \left\{ \frac{d_{bw} - h}{3 \cdot d_{bw}} \left(\frac{Hmax}{h} \right)^2, \frac{2d}{Hmax} \right\} \quad (5.44)$$

$$\alpha3 = 1 - \frac{d'}{d} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \right\} \quad (5.45)$$

$$Hmax = 1,8 Hs \quad (5.46)$$

keterangan:

d = kedalaman air di depan *breakwater*

h = kedalaman di atas lapis lindung dari fondasi tumpukan batu

d' = jarak dari elevasi muka air rencana ke dasar sis penampang tegak

d_c = jarak antara elevasi muka air rencana dan puncak bangunan

p1 = tekanan maksimum yang terjadi pada elevasi muka air rencana

p2 = tekanan yang terjadi pada tanah dasar

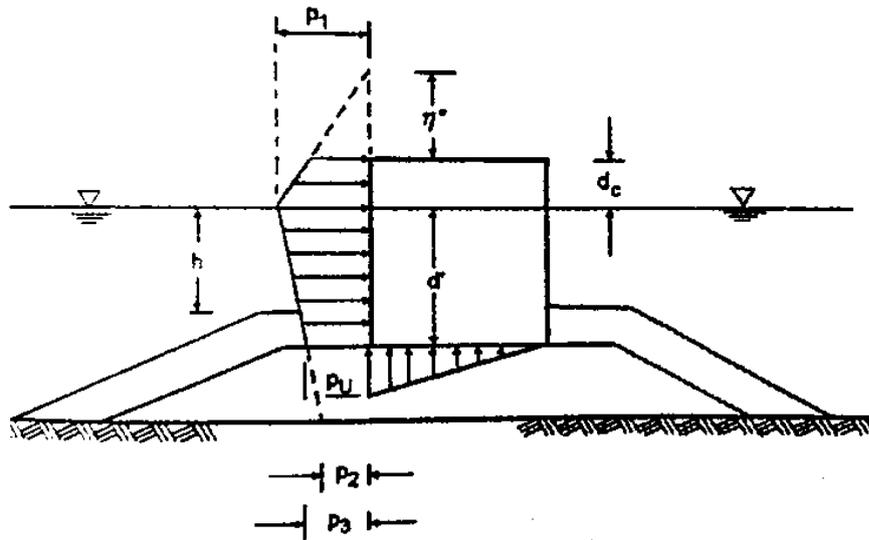
p3 = tekanan yang terjadi pada dasar dinding vertikal

d_{bw} = kedalaman air di lokasi yang berjarak 5 H_s ke arah laut dari pemecah gelombang

β = sudut antara arah gelombang datang dan garis tegak lurus pemecah gelombang

H_s = tinggi gelombang signifikan

Ilustrasi tekanan gelombang yang terjadi pada dinding vertikal ditunjukkan pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26 Tekanan Gelombang Pada Pemecah Gelombang Rigid
 Sumber: (Triatmodjo, 2016)

Elevasi maksimum di mana tekana gelombang bekerja, η^* , diberikan oleh Persamaan 5.47.

$$\eta^* = 0,75(1 + \cos \beta)Hmax \quad (5.47)$$

Tekanan apung dihitung berdasarkan berat air laut yang dipindahkan oleh pemecah gelombang. Sedang tekanan ke atas yang bekerja padadasar pemecah gelombang mempunyai bentuk distribusi segitiga degna tekanan pu pada kaki depan bangunan dan nol pada kaki belakang bangunan. Tekanan ke atas, pu, dihitung sesuai Persamaan 5.48.

$$pu = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)\alpha 1. \alpha 3. \gamma 0. Hmax \quad (5.48)$$

Dari tekanan gelombang yang sudah dihitung, dapat dihitung gaya gelombang dan momen yang ditimbulkan gelombang terhadap kaki pemecah gelombang dengan menggunakan Persamaan 5.49 dan Persamaan 5.50.

$$Rm = \frac{1}{2}(p1 + p3)d' + \frac{1}{2}(p1 + p4)dc^* \quad (5.49)$$

$$Mm = \frac{1}{6}(2p1 + p3)d'^2 + \frac{1}{2}(p1 + p4)d'.dc^* + \frac{1}{6}(p1 + 2p4)dc^{*2} \quad (5.50)$$

dengan:

$$p4 = p1 \left(1 - \frac{dc}{\eta^*}\right), \text{ jika } \eta^* > dc$$

$$p_4 = 0, \text{ jika } \eta^* \leq dc$$

$$d_c^* = \min\{\eta^*, dc\}$$

Sedangkan untuk gaya angkat dan momen terhadap kaki belakang bangunan dirumuskan pada Persamaan 5.51 dan 5.52.

$$U = \frac{1}{2} p_u \cdot B \quad (5.51)$$

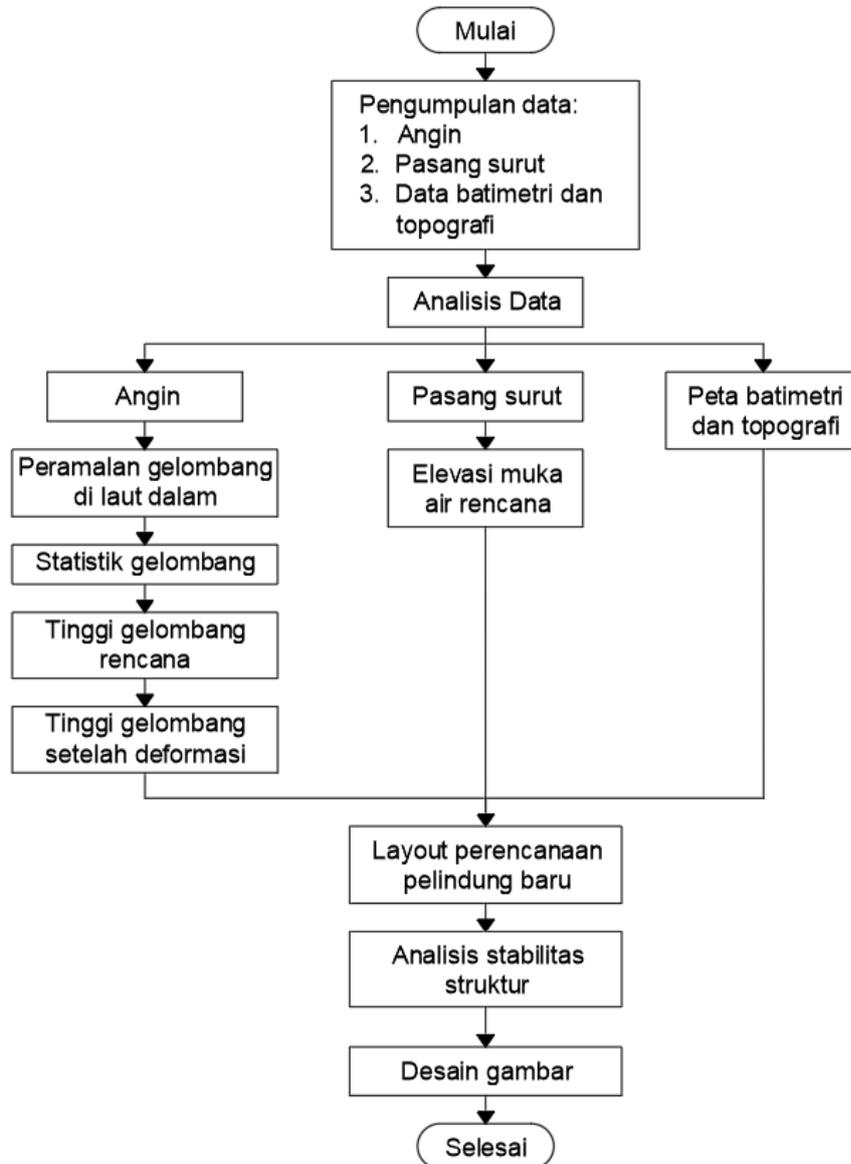
$$M_u = \frac{2}{3} \cdot U \cdot B \quad (5.52)$$

dengan:

B = lebar dasar bangunan vertikal

5.6. Diagram Alir

Berikut diagram alir untuk perencanaan struktur pelindung pantai tipe buatan



Gambar 5.27 Perencanaan Struktur Pelindung Pantai Buatan

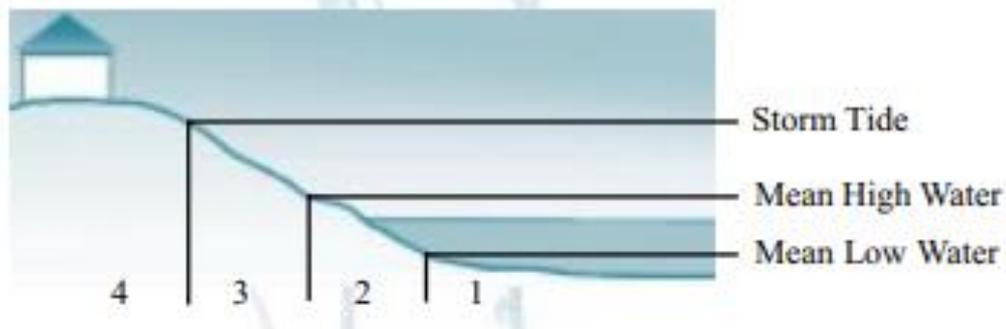
Sumber: Penulis

BAB 6

KONSEP PERENCANAAN BANGUNAN PANTAI ALAMI

6.1. Vegetasi dan Reboisasi

6.1.1. Penentuan Zona Pantai



Gambar 6.1 Persebaran Zona Pada Pantai
Sumber: (Verlinde, 2003)

Jenis tumbuhan sangatlah terpengaruh dengan kondisi elevasi lingkungan, slope, jenis tanah, cahaya matahari, hujan, dan kondisi lainnya. Pemilihan kelompok tanaman yang akan menyediakan struktur di pantai harus ditentukan dan disesuaikan dengan lingkungan garis pantai. Memilih spesies yang tepat dan memutuskan di mana akan menanamnya bergantung pada identifikasi area atau zona yang berbeda di mana kondisi menuntut karakteristik tanaman yang spesifik. Zona-zona pantai diilustrasikan pada Gambar 6.1.

Untuk membantu perencanaan, areal penanaman tepi laut di sini dibagi menjadi empat zona yang ditentukan terkait dengan ketinggian air pasang seperti pada Gambar Gambar 6.1.

1. Zona 1, adalah area di bawah rata-rata air rendah (*Mean Low Water Level*) dan hampir selalu memiliki genangan air. Zona ini mungkin tidak bervegetasi secara alami di mana terdapat energi gelombang tinggi dan / atau lereng yang curam. Di perairan yang relatif terlindungi, tumbuh-tumbuhan lahan basah yang berakar di dasar tetapi tumbuh di atas permukaan air dapat tumbuh subur di sini dan menyediakan habitat yang berharga serta manfaat kualitas air. Jika kemiringannya landai dan energi gelombang terbatas, tumbuhan yang muncul dapat hidup berdampingan dengan tembok laut atau bangunan lain yang sudah ada sebelumnya.
2. Zona 2, adalah zona intertidal antara air rata-rata rendah (*Mean Low Water Level*) dan rata-rata tinggi (*Mean High Water Level*). Zona ini terendam saat air pasang tetapi terkena udara saat air surut. Berbagai spesies lahan basah mungkin cocok untuk zona ini.
3. Zona 3, adalah area antara air tinggi rata-rata (*Mean High Water Level*) dan batas normal pasang surut badai (Storm tide). Di daerah ini, tanah biasanya terpapar udara, meskipun

secara berkala terendam selama air pasang. Tanah di daerah ini mungkin jenuh secara berkala dan mungkin memiliki kandungan garam yang relatif tinggi. Rerumputan dan semak yang mampu menahan tingkat kejenuhan tanah yang bervariasi dapat tumbuh dengan baik di sini.

4. Zona 4, adalah wilayah pantai di atas garis pasang badai normal (*Storm tide*). Meskipun daerah ini sering kali merupakan dataran tinggi, tanaman di dalamnya sangat dipengaruhi oleh proses pesisir, termasuk angin yang terus menerus dan percikan garam. Penyangga vegetasi alami (rerumputan, semak belukar, dan pepohonan) di sini penting baik untuk mencegah pencemaran air maupun melindungi lahan basah dan tanaman air yang lebih dekat dengan air. Memasukkan sengkedan atau fitur lanskap lainnya yang memungkinkan air hujan menggenang dan menyusup ke dalam tanah daripada mengalir, selanjutnya akan membantu mencegah polusi air.

6.1.2. Penentuan Faktor yang Berpengaruh

1. Vegetasi dominan, amati apa yang tumbuh secara alami di area tersebut. Spesies yang ada mungkin beradaptasi dengan baik dan asli daerah tersebut dan harus dipertimbangkan karena tidak secara sembarangan menanam tanaman asing di tempat yang spesiesnya tidak ada.
2. *Slope*, amati seberapa curam kemiringan garis pantainya. Ini membantu menentukan seberapa lebar zona intertidal dan seberapa besar area rawa yang mungkin dapat dibuat. Dalam kasus kemiringan yang relatif curam, area yang cocok untuk penanaman tanaman baru akan relatif sempit. Dalam beberapa kaki dari pantai, misalnya, air mungkin terlalu dalam untuk ditanam. Dengan kemiringan yang lebih bertahap, setiap zona tanam akan semakin lebar.
3. *Fetch*, jarak tempuh gelombang sebelum mencapai garis pantai disebut sebagai *fetch*. Semakin panjang *fetch*, semakin besar energi gelombang yang dihasilkan. Jika *fetch*-nya pendek/kecil, seperti di teluk atau rawa yang tenang, pantai mungkin cocok untuk tanaman di ke-empat zona. Namun, jika *fetch* lebih dari satu mil, energi gelombang mungkin terlalu tinggi untuk mendukung vegetasi yang muncul. Di lokasi seperti itu, vegetasi alami di atas rata-rata air tinggi mungkin sangat penting untuk stabilitas.

6.1.3. Pemilihan Tanaman

Shoreline Plant Suitability for Zones 1-4

Species Name	Common Name	Zone					Salinity Range*		
		1	2	3	4		Low	Medium	High
<i>Nymphaea odorata</i>	Fragrant water lily	✓	✓			✓			
<i>Juncus effusus</i>	Soft rush	✓	✓	✓		✓			
<i>Pontederia cordata</i>	Pickereelweed	✓	✓	✓		✓			
<i>Scirpus californicus</i>	Giant bulrush	✓	✓	✓		✓			
<i>Panicum hemitomon</i>	Maidencane	✓	✓	✓		✓			
<i>Zizaniopsis miliacea</i>	Southern wild rice	✓	✓	✓		✓			
<i>Zizania aquatica</i>	Wild rice	✓	✓	✓		✓			
<i>Crinum americanum</i>	Swamp lily	✓	✓	✓		✓			
<i>Iris virginica</i>	Blue flag	✓	✓	✓		✓			
<i>Scirpus americanus</i>	Three square	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Sagittaria lancifolia</i>	Lance-leaf arrowhead	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Cladium jamaicense</i>	Sawgrass	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Spartina patens</i>	Saltmeadow cordgrass			✓	✓	✓	✓	✓	
<i>Juncus roemerianus</i>	Black needlerush	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Spartina alterniflora</i>	Smooth cordgrass	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Paspalum distichum</i>	Knot-grass		✓	✓	✓	✓	✓		
<i>Distichlis spicata</i>	Saltgrass	✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Scirpus robustus</i>	Saltmarsh bulrush			✓	✓	✓	✓		
<i>Sporobolus virginicus</i>	Seashore dropseed			✓	✓	✓	✓		

*General water salinity tolerance ranges in parts per thousand (ppt): low = 0-5; medium = 6-15; high = 16-33.
 Note that these are general guidelines for average conditions. Actual salinity ranges often vary widely.

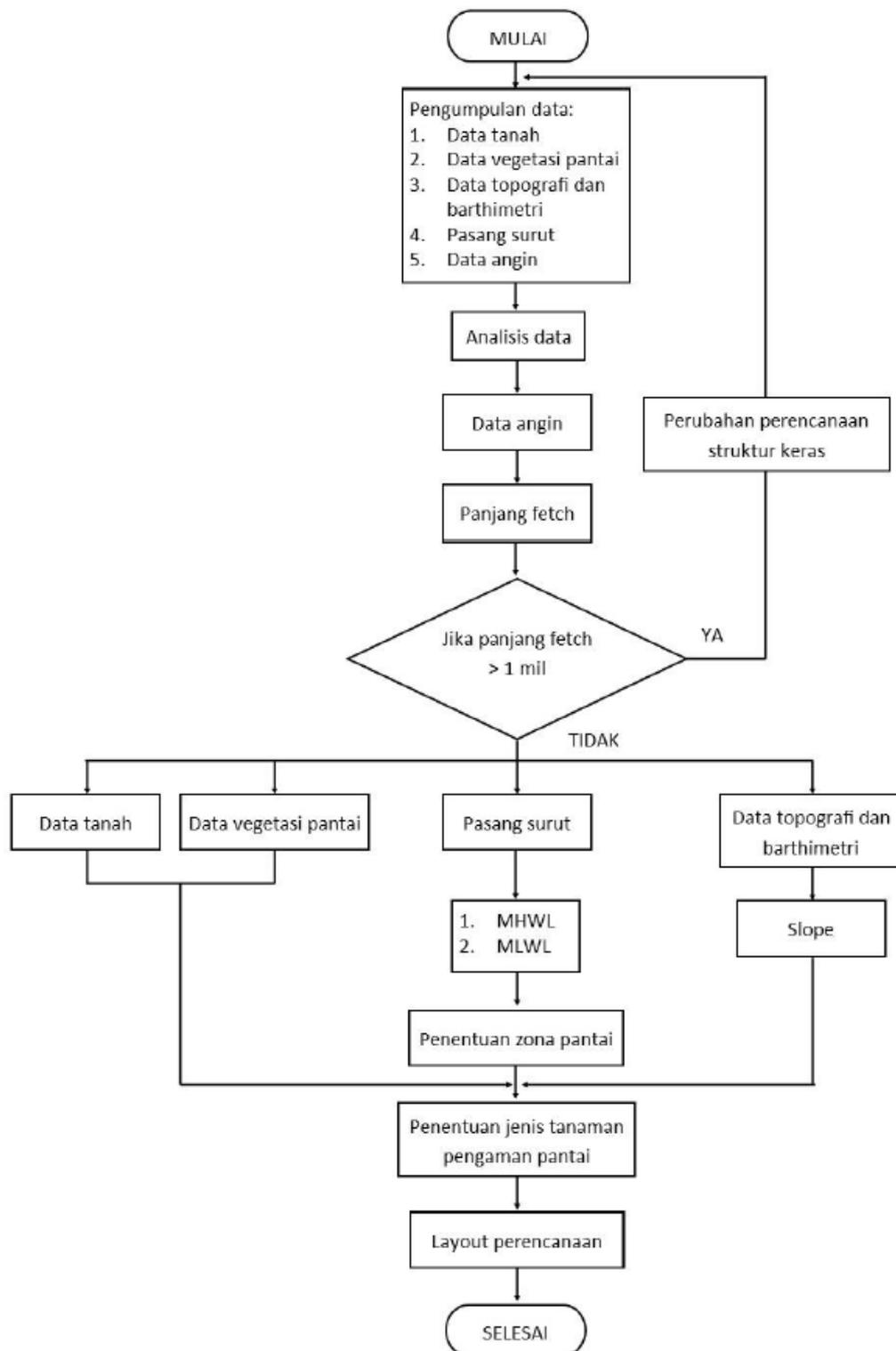
Gambar 6.2 Matriks Penentuan Jenis Tanaman
 Sumber: (Verlinde, 2003)

Upland Shoreline Plants (all appropriate for Zone 4)		
<i>Species suitability depends on soil types and ecosystems. Consult county extension representatives and nurseries for details.</i>		
Species Name	Common Name	Type
<i>Schizachyrium</i> spp.	Bluestem	Grass
<i>Muhlenbergia capillaris</i>	Muhly grass	Grass
<i>Aristida stricta</i>	Wiregrass	Grass
<i>Verbena</i> spp.	Roadside verbena	Ground cover
<i>Asclepias</i> spp.	Butterfly weed (milkweed)	Ground cover
<i>Ipomoea</i> spp.	Morning-glory	Flowering vine
<i>Solidago</i> spp.	Goldenrod	Flowering bush
<i>Hypericum</i> spp.	St. John's wort	Shrub
<i>Vaccinium arboreum</i>	Sparkleberry	Shrub
<i>Serenoa repens</i>	Saw palmetto	Shrub
<i>Baccharis</i> spp.	Saltbush	Shrub
<i>Ilex vomitoria</i>	Yaupon holly	Shrub/small tree
<i>Illicium floridanum</i>	Florida anise	Shrub/small tree
<i>Myrica cerifera</i>	Wax myrtle	Shrub/small tree
<i>Quercus myrtifolia</i>	Myrtle oak	Shrub/small tree
<i>Callicarpa americana</i>	Beautyberry	Shrub/small tree
<i>Quercus chapmanii</i>	Chapman's oak	Shrub/small tree
<i>Ilex opaca</i>	American holly	Shrub/small tree
<i>Osmanthus americanus</i>	Wild olive	Shrub/small tree
<i>Cephalanthus occidentalis</i>	Button bush	Small tree
<i>Cornus florida</i>	Flowering dogwood	Small tree
<i>Quercus margaretta</i>	Sand post oak	Small tree
<i>Quercus incana</i>	Bluejack oak	Small tree
<i>Quercus geminata</i>	Sand live oak	Small tree
<i>Quercus marilandica</i>	Blackjack oak	Small/medium tree
<i>Quercus laevis</i>	Turkey oak	Small/medium tree
<i>Persea borbonia</i>	Redbay	Medium tree
<i>Prunus serotina</i>	Black cherry	Medium tree
<i>Diospyros virginiana</i>	Persimmon	Medium tree
<i>Acer rubrum</i>	Red maple	Medium/large tree
<i>Quercus falcata</i>	Red oak	Medium/large tree
<i>Pinus elliotii</i>	Slash pine	Medium/large tree
<i>Pinus clausa</i>	Sand pine	Medium/large tree
<i>Carya glabra</i>	Pignut hickory	Medium/large tree
<i>Quercus hemisphaerica</i>	Laurel oak	Large tree
<i>Quercus virginiana</i>	Live oak	Large tree
<i>Pinus palustris</i>	Longleaf pine	Large tree
<i>Magnolia grandiflora</i>	Southern magnolia	Large tree
<i>Juniperus silicicola</i>	Southern red cedar	Large tree

Gambar 6.3 Jenis Tanaman Untuk Zona 4
 Sumber: (Verlinde, 2003)

Pemilihan jenis tanaman berdasarkan kategori pada Gambar 6.2 dan Gambar 6.3 merupakan contoh dan belum tentu dapat diterapkan di iklim Indonesia karena sumber berasal dari Amerika yang memiliki iklim berbeda.

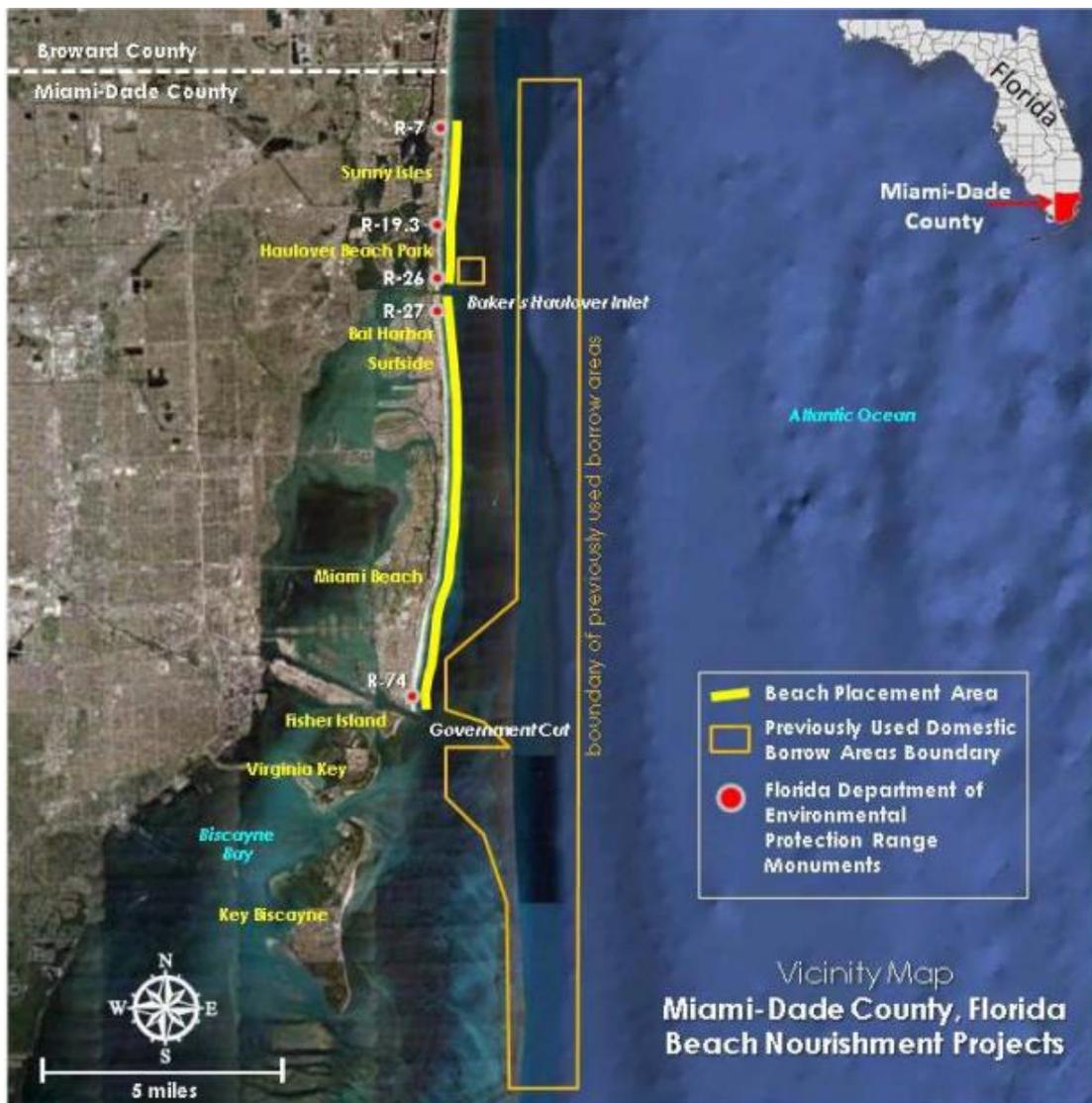
6.1.4. Diagram Alir Perencanaan



Gambar 6.4 Tahapan Pemodelan Transpor Sedimen
Sumber: Penulis

6.2. Sand Nourishment

Metode perhitungan pada subbab ini membahas tentang proyek *sand nourishment* pada Dade, Florida. Proyek ini membahas tentang evaluasi dari sumber pasir untuk *sand nourishment* ulang di masa depan. Lokasi proyek ini ditunjukkan pada Gambar 6.5.



Gambar 6.5 Lokasi Proyek
Sumber: (USACE, 2015)

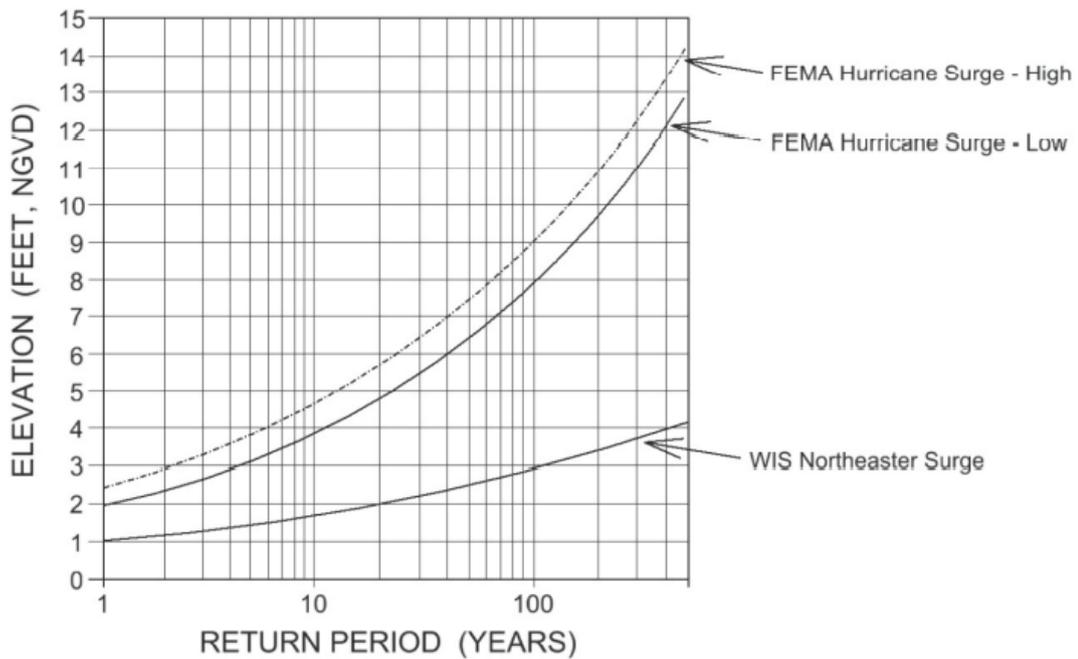
Dibutuhkan beberapa data dalam perhitungan ini untuk melakukan analisisnya. Data pertama adalah elevasi muka air laut. Perubahan elevasi muka air laut di Dade, Florida sebagian besar disebabkan oleh pasang surut astronomik, *storm surges*, dan kenaikan muka air laut jangka panjang. Naiknya elevasi muka air laut merupakan hal yang penting untuk dianalisis karena potensi banjir pada daerah pantai, lokasi gelombang pecah yang mendekat ke pantai yang dapat menyebabkan kerusakan, dan *scouring* atau *shoaling* akibat arus pasang surut. Untuk mengetahui karakter pasang surut di daerah Dade, dipakailah data dari *National Oceanic*

and Atmospheric Administrations, NOAA. Pasang surut yang terjadi pada daerah pantai Dade bertipe semidirunal yang artinya ada dua pasang dan dua surut pada satu periode 24 jam. Selain mengetahui tipe pasang surut, dihitung juga datum elevasi muka air lautnya yang ditunjukkan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Elevasi Muka Air Laut
Sumber: (USACE, 2015)

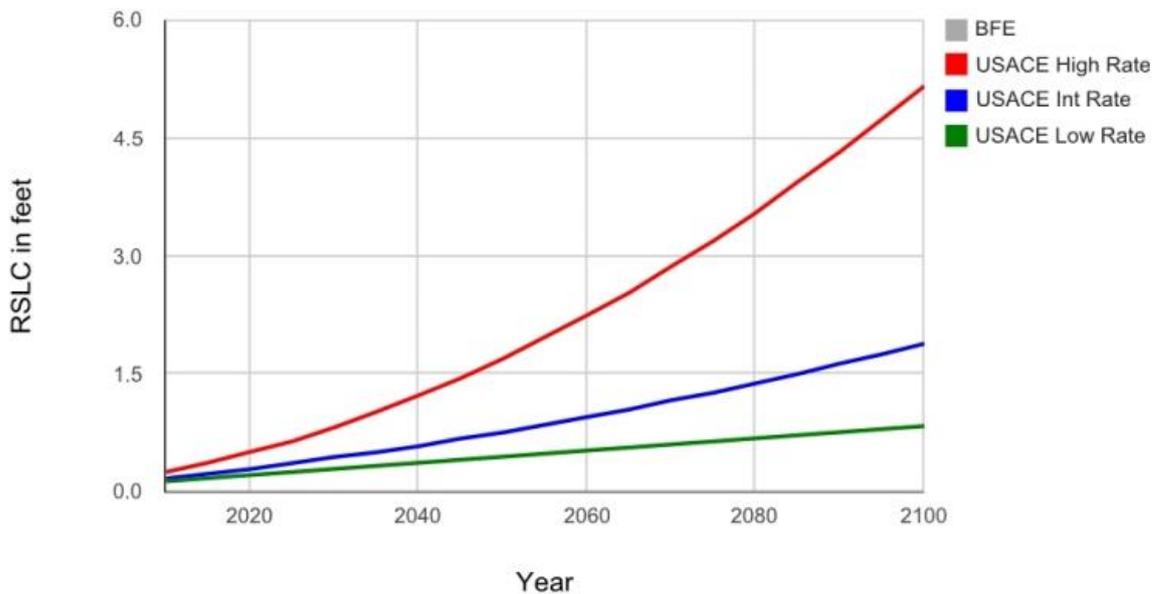
Elevasi Muka Air Laut	(feet)
Highest Observed Water Level (24 Oct 2005)	4.76
Mean Higher High Water (MHHW)	2.19
Mean High Water (MHW)	2.13
North American Vertical Datum 1988 (NAVD88)	1.97
Mean Tide Level (MTL)	1.12
Mean Sea Level (MSL)	1.10
Mean Low Water (MLW)	0.11
Mean Lower Low Water (MLLW)	0.00
Lowest Observed Water Level (29 Mar 94)	-1.31

Elevasi muka air laut juga dipengaruhi *storm surge*. *Storm surge* terjadi karena rendahnya tekanan udara pada pusat badai sehingga permukaan air laut terangkat dan ikut terbawa bersama jalannya badai. Kecepatan angin yang sangat tinggi digabung tekanan udara yang sangat rendah membuat *storm surge* yang terjadi semakin tinggi. Daerah Dade, Florida pernah mengalami *storm surge* setinggi 8,6 kaki akibat Badai Andrew pada tahun 1992. *Federal Emergency Management Agency*, FEMA, membuat grafik antara ketinggian *storm surge* dan juga frekuensinya. Metode yang dikembangkan oleh *National Academy of Sciences* yang akhirnya menimbulkan *storm surge* periode ulang. Dua jenis kurva pada Gambar 6.6 menunjukkan kemungkinan lokasi terjadinya *storm surge* dengan karakter seperti pada grafik. Kurva “FEMA Hurricane Surge – High” ditujukan untuk daerah selatan Dade, Florida dan “FEMA Hurricane Surge – Low” untuk daerah utaranya.



Gambar 6.6 Periode Ulang Storm Surge
 Sumber: (USACE, 2015)

Data kedua adalah mengenai proyeksi kenaikan muka air laut. Kenaikan muka air laut dalam kasus ini dipengaruhi oleh penambahan volume air global yang diakibatkan ekspansi termal, volume gletser, atau perubahan lempeng tektonik. Perhitungan kenaikan muka air laut ini menggunakan metode dari *The Corps of Engineers* yang menghasilkan tiga kondisi yaitu *low*, *intermediate*, dan *high*. Grafik proyeksi kenaikan muka air laut dapat dilihat di Gambar 6.7 dan rincian kenaikannya pada Gambar 6.8.



Gambar 6.7 Grafik Proyeksi Kenaikan Muka Air Laut USACE
 Sumber: (USACE, 2015)

Table 2								
USACE SLR Curves - ER 1100-2-8162								
SLR Curve	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2038	2040
USACE - Low	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30	0.34	0.36	0.38
USACE - Intermediate	0.17	0.23	0.29	0.36	0.43	0.50	0.55	0.58
USACE - High	0.26	0.38	0.51	0.66	0.83	1.02	1.15	1.23

Gambar 6.8 Kenaikan Muka Air Laut Ketiga Kondisi
Sumber: (USACE, 2015)

Saat muka air laut naik atau turun, pantai akan menyesuaikan berusaha mencapai titik ekuilibriumnya. Per Bruun mencetuskan persamaan matematis untuk menghitung resesi pada garis pantai akibat fluktuasi muka air laut. Prinsip dari metode Bruun adalah kedalaman air pada pantai relatif dengan permukaan air akan selalu sama. Akibatnya garis pantai akan bergerak menuju dan meninggalkan laut. Persamaan Bruun ditunjukkan pada Persamaan 6.1. Hasil perhitungan resesi pantai pada Dade, Florida ditampilkan pada Gambar 6.9.

$$X = \frac{-SW_*}{(h_* + B)} \quad (6.1)$$

keterangan:

S = rentang kenaikan muka air laut

B = tinggi berm di atas datum

h_* = *depth of closure*

W_* = panjang garis pantai

Table 3								
Shoreline Recession - Per Bruun Equation (ft)								
SLR Curve	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2038	2040
USACE - Low	-5.4	-7.0	-8.5	-10.1	-11.6	-13.2	-13.9	-14.7
USACE - Intermediate	-6.6	-8.9	-11.2	-13.9	-16.6	-19.4	-21.3	-22.5
USACE - High	-10.1	-14.7	-19.7	-25.5	-32.1	-39.5	-44.5	-47.6

Gambar 6.9 Resesi Pantai Dade, Florida Menggunakan Metode Bruun
Sumber: (USACE, 2015)

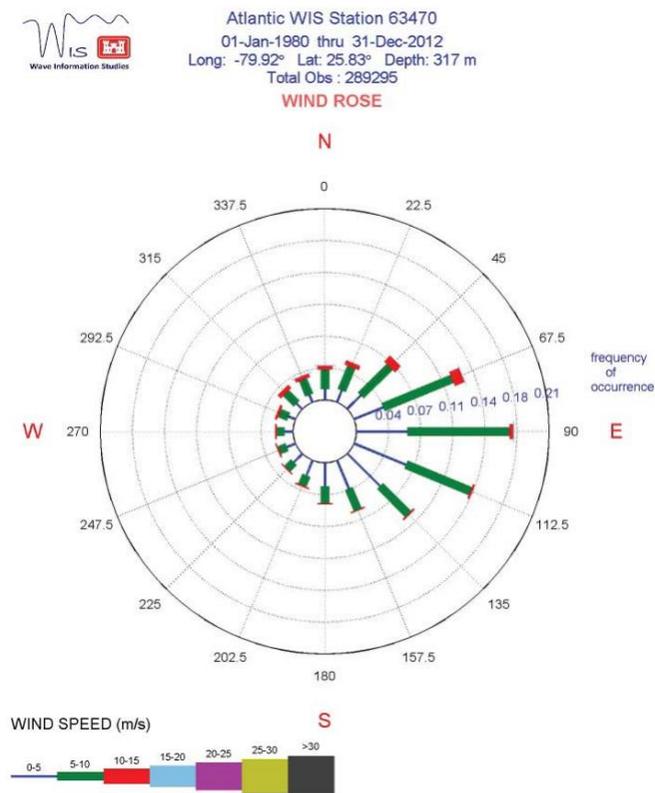
Kemudian, dari hasil besarnya resesi pantai yang terjadi bisa dicari volume pasir yang hilang per satuan panjang garis pantai menggunakan Persamaan 6.2. Hasilnya perhitungan ditunjukkan pada Gambar 6.10.

$$V = (h_* + B)X \quad (6.2)$$

SLR Curve	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2038	2040
USACE - Low	6.2	8.0	9.8	11.6	13.3	15.1	16.0	16.9
USACE - Intermediate	7.6	10.2	12.9	16.0	19.1	22.2	24.4	25.8
USACE - High	11.6	16.9	22.7	29.3	36.9	45.3	51.1	54.7

Gambar 6.10 Volume Pasir Resesi Pantai Dade, Florida Menggunakan Metode Bruun
Sumber: (USACE, 2015)

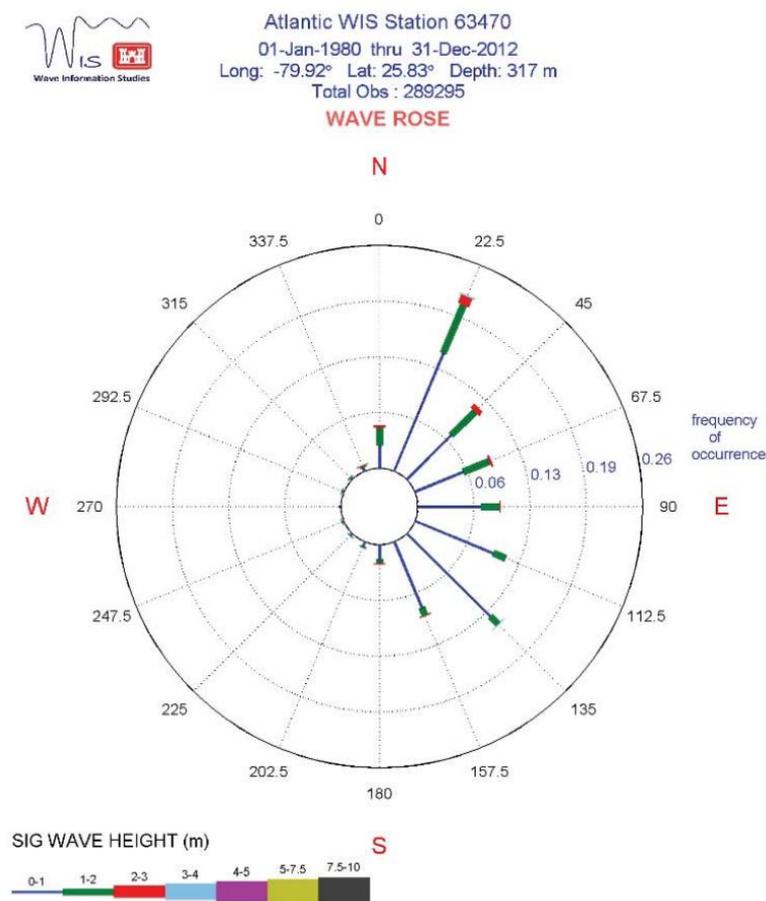
Data ketiga yang berperan dalam analisis ini adalah data angin. Angin lokal di daerah Pantai Dade-Miami menciptakan gelombang beramplitudo pendek dan singkat yang sering melanda Florida selatan. Wilayah Dade-Miami terletak di 26° Lintang Utara. Sebagian besar angin di daerah ini berasal dari timur laut, timur, dan tenggara dengan angin berkecepatan tinggi berasal dari timur laut di saat musim dingin. *Wind rose* daerah Dade-Miami ditampilkan pada Gambar 6.11.



Gambar 6.11 Wind Rose
Sumber: (USACE, 2015)

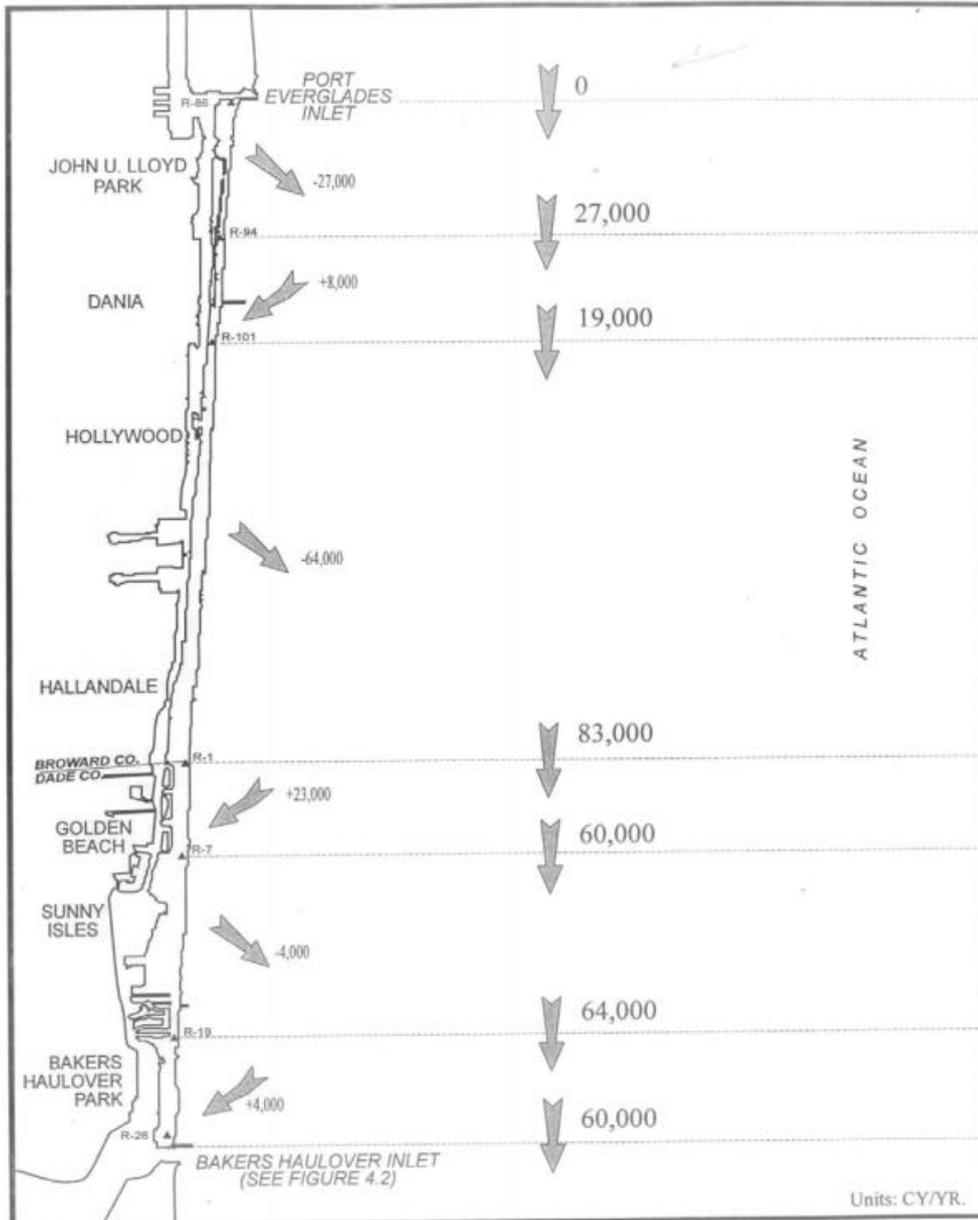
Selama Februari – September, angin berasal dari timur dengan mayoritas angin datang dari arah tenggara selama Maret – Agustus. Selama Oktober – Januari, angin berasal dari timur laut. Angin ini menciptakan gelombang berenergi tinggi yang menimbulkan transpor sedimen dan mengerosi garis pantai Dade-Miami.

Sesuai dengan *wind rose*, maka daerah Dade-Miami rentan terhadap gelombang dari arah timur. Gelombang besar yang terjadi di daerah ini berasal dari badai tropis. Peramalan gelombang di laut dalam mengambil data dari tiga stasiun di sepanjang pantai tenggara Florida. Hasil peramalan gelombang menunjukkan bahwa gelombang yang terjadi di daerah pantai tenggara Florida dipengaruhi kuat oleh musim dan hal ini berkorelasi dengan data angin. Gelombang yang terjadi saat musim panas lebih rendah daripada yang terjadi saat musim dingin. Pada musim panas, tinggi gelombang yang terjadi jarang melebihi rentang 1 – 2 kaki dan berasal dari timur atau timur laut. Gelombang pada musim panas memiliki frekuensi terbesar dalam satu tahun. Sedangkan saat musim dingin, gelombang yang terjadi berada di rentang 2 – 3,99 kaki. Hasil peramalan gelombang di laut dalam ditunjukkan pada Gambar 6.12.

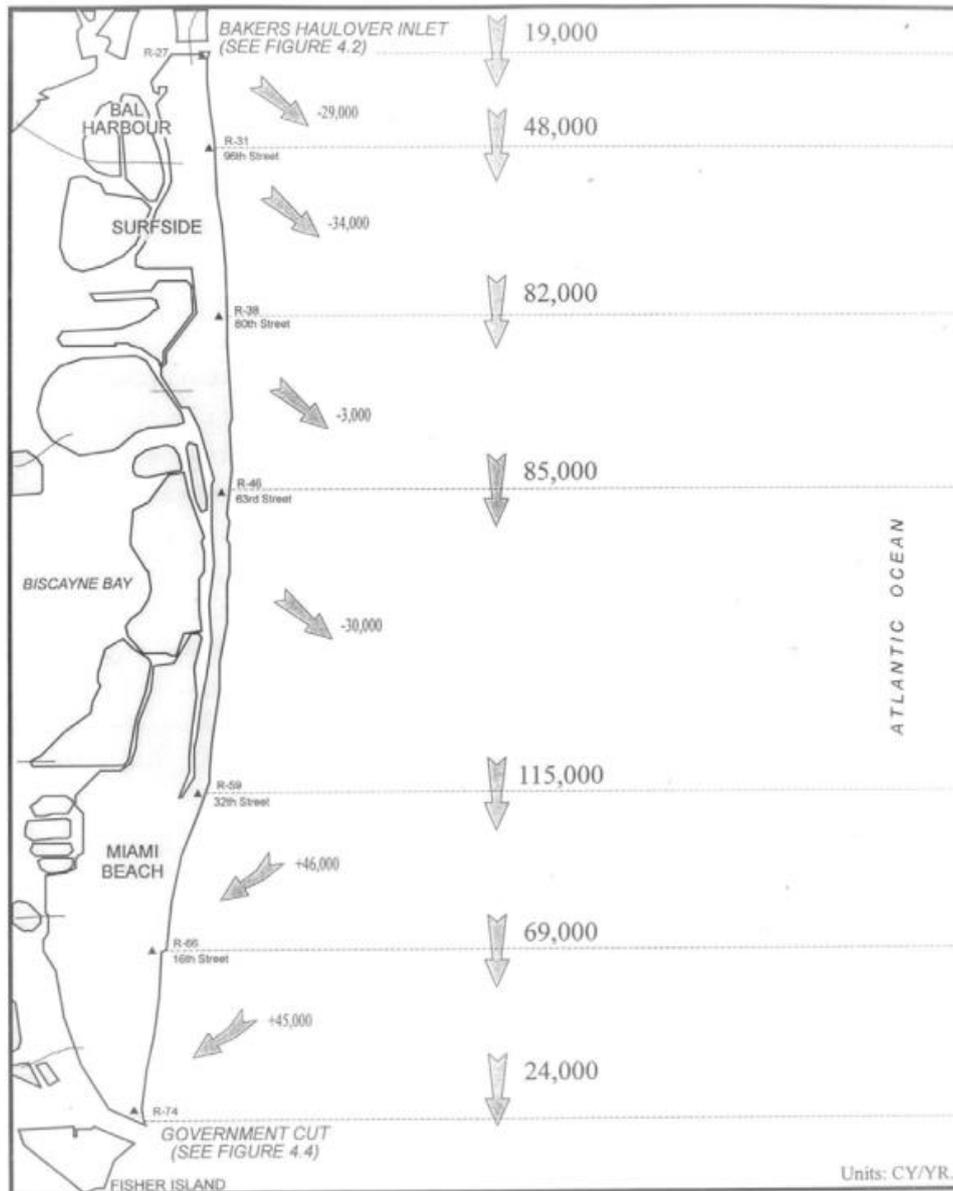


Gambar 6.12 Wave Rose
 Sumber: (USACE, 2015)

Untuk melihat dan mengetahui besarnya pergerakan sedimen di sepanjang Pantai Dade-Miami, dibuatlah beberapa pemodelan sedimen. Gambar 6.13 dan Gambar 6.14 menunjukkan hasil pemodelan transpor sedimen.



Gambar 6.13 Hasil Perhitungan Sediment Budget di Sisi Utara Dade
 Sumber: (USACE, 2015)



Gambar 6.14 Hasil Perhitungan Sediment Budget di Sisi Selatan Dade
 Sumber: (USACE, 2015)

Terlihat pada Gambar 6.13 dan Gambar 6.14 bahwa transpor sedimen netto berada di rentang 60.000 – 80.000 cy/tahun. Perlu diketahui bahwa transpor sedimen kotor bisa lebih dari netto karena adanya pergerakan sedimen ke arah utara yang disebabkan oleh angin dan gelombang pada musim panas. Wilayah dengan transpor sedimen netto terkecil berada di Bakers Haulover Inlet yang disebabkan oleh inlet itu sendiri. Wilayah dengan transpor sedimen netto terbesar berada di 32nd St di Pantai Miami yang disebabkan arah gelombang pecah yang lebih curam terhadap garis pantai. Gambar 6.13 dan Gambar 6.14 menunjukkan bahwa sebagian besar bagian Pantai Dade-Miami mengalami erosi. Volume sedimen yang terendapkan atau terpindahkan dihitung berdasarkan survei monitoring dan analisis erosi dan sedimentasi. Hasilnya dapat dilihat di Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Erosi Tahunan
 Sumber: (USACE, 2015)

Segmen	Tingkat Erosi Tahunan (cy/tahun)
Sunny Isles	50.000
Haulover Park	15.000
Bal Harbour	55.000
Surfside	45.0000
Miami Beach (HS)	50.000
Miami Beach (NHS)	25.000
TOTAL	240.000

Survei monitoring kali terakhir dilakukan pada Januari 2014. Survei ini dilakukan sebagai dasar penentuan kondisi terkini proyek dan sebagai dasar proyeksi kebutuhan *sand nourishment* di masa depan. Survei tahun 2014 digunakan untuk menentukan volume pasir yang dibutuhkan untuk merestorasi *template* proyek. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 6.3.

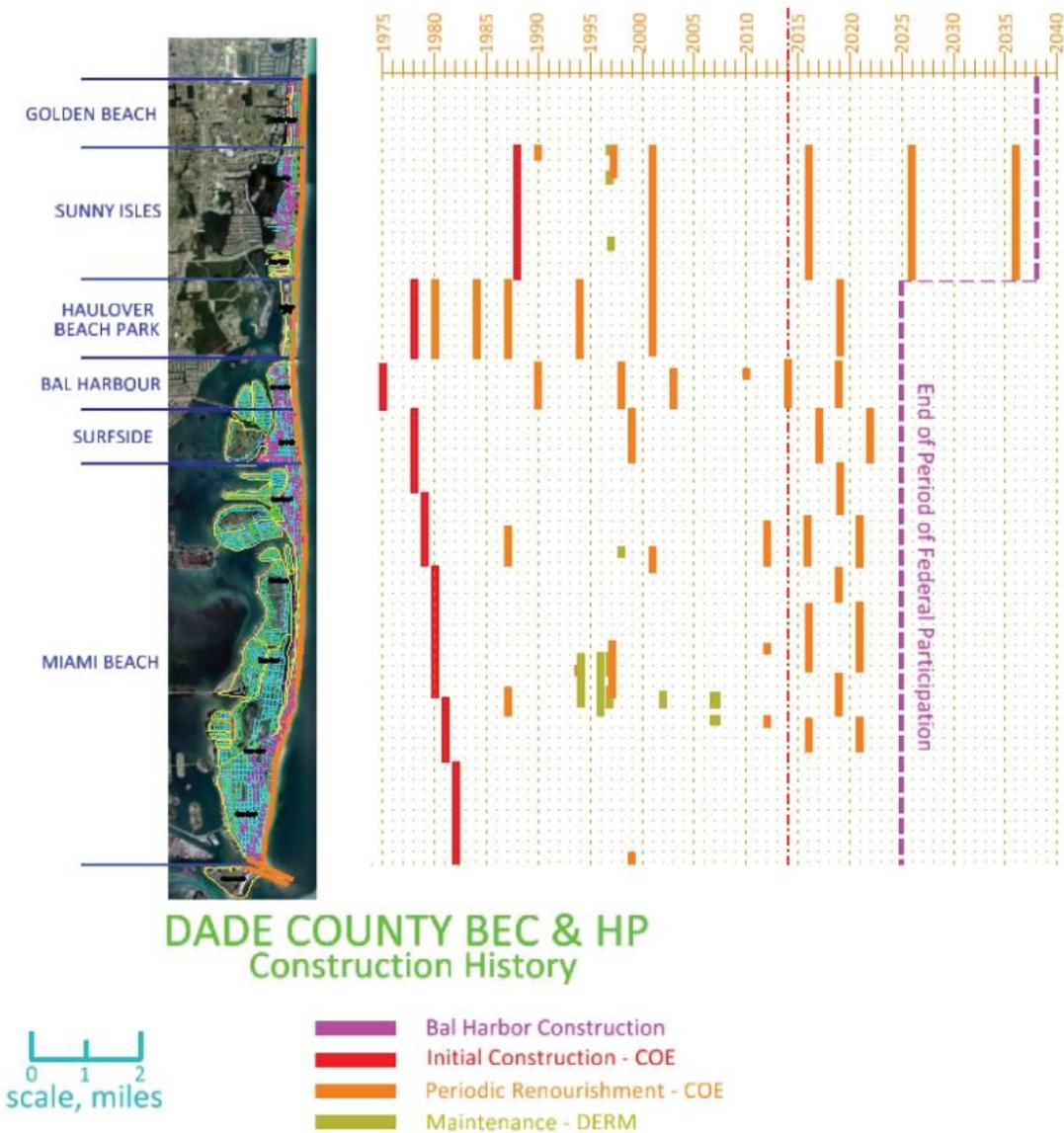
Tabel 6.3 Volume Pasir Merestorasi Proyek Sebelumnya
 Sumber: (USACE, 2015)

Segmen	Volume (cubic yard)
Sunny Isles	447.330
Haulover Park	0
Bal Harbour	0
Surfside	425.460
Miami Beach (HS)	402.250
Miami Beach (NHS)	606.100
TOTAL	1.881.140

Setelah pasir di lokasi proyek berhasil direstorasi, barulah dibuat *timeline sand nourishment* di masa depan. Volume pasir yang dibutuhkan berasal dari perhitungan volume pasir yang dibutuhkan untuk mengembalikan pantai dalam kondisi seimbang dan kebutuhan pasir untuk proyeksi beberapa tahun kedepan. Perhitungan ini juga mengacu pada tingkat erosi tahunan pada Tabel 6.2. Hasil analisisnya ditunjukkan pada Tabel 6.4 dan Gambar 6.15.

Tabel 6.4 Timeline Penambahan Volume Pasir Pantai Dade
 Sumber: (USACE, 2015)

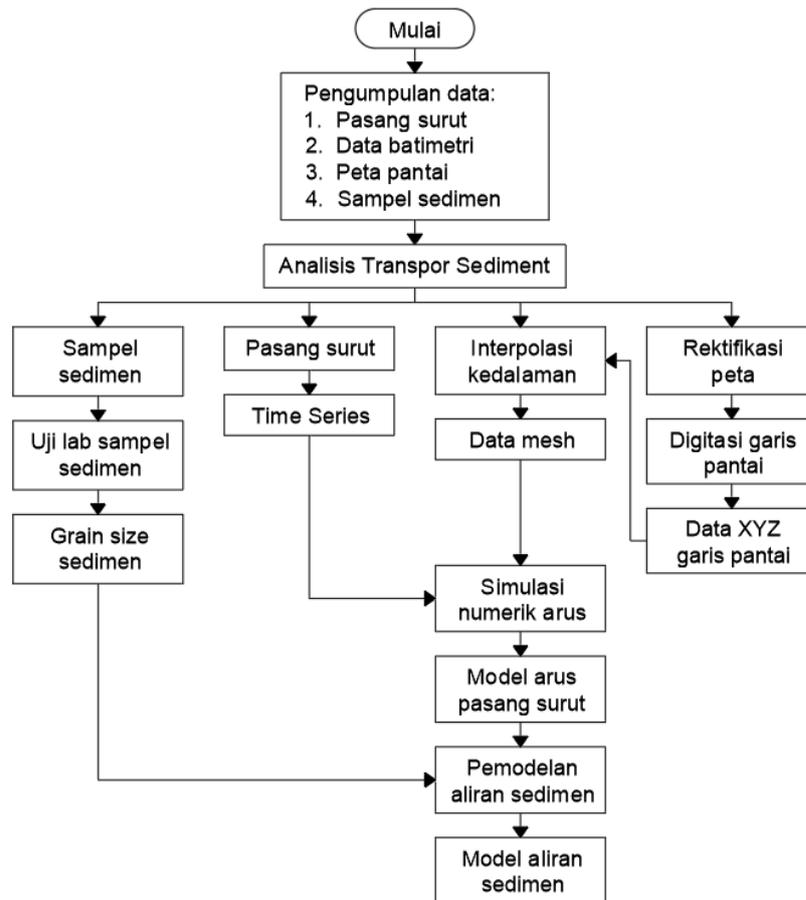
Tahun	Segmen	Volume (cubic yard)
2016	Sunny Isles, Miami Beach (HS)	1.104.060
2017	Surfside	560.460
-2019	Haulover, Bal Harbour, Miami Beach (NHS)	1.026.100
2021	Miami Beach (HS)	200.000
2022	Surfside	135.000
2026	Sunny Isles	500.000
2036	Sunny Isles	100.000
TOTAL		3.625.620



Gambar 6.15 Timeline dan Lokasi Penambahan Pasir Pantai Dade
 Sumber: (USACE, 2015)

6.3. Sand Motor

Sand motor merupakan salah satu metode yang digunakan dalam menanggulangi masalah sedimen pantai. Metode ini diterapkan di pantai utara dari Belanda Selatan. Prinsip utama dari *sand motor* adalah menimbun pasir di satu pantai dan biarkan pasir itu terbawa oleh arus ke bagian pantai lainnya. Akibatnya, bagian pantai lainnya yang tererosi bisa secara alami mendapat tambahan dari timbunan pasir buatan.



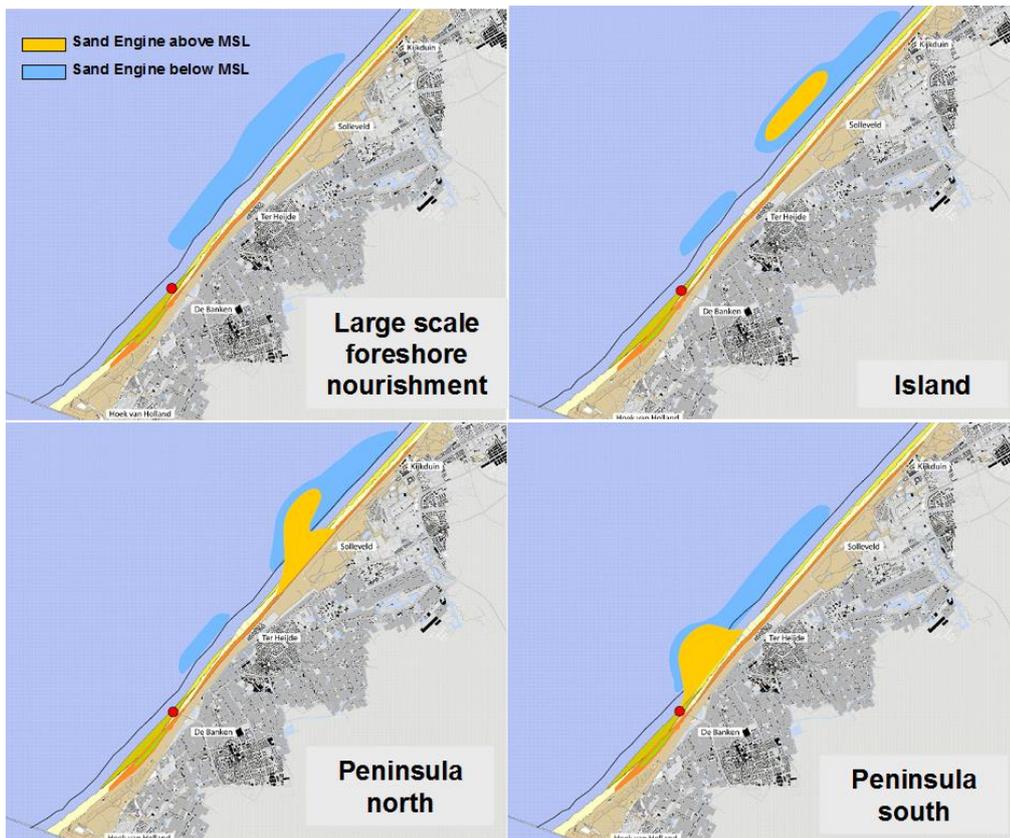
Gambar 6.16 Tahapan Pemodelan Transpor Sedimen
Sumber: Penulis

Pada tahap awal, dilakukan pemodelan transpor sedimennya. Tahapan pemodelan transpor sedimennya ditampilkan pada Gambar 6.16. Langkah awal dalam pemodelan arus adalah pembuatan boundary atau batas yang membedakan wilayah darat dan laut. Pembuatan boundary ini meliputi proses rektifikasi peta, digitasi garis pantai dan konversi file. Rektifikasi adalah proses transformasi dari suatu sistem koordinat ke dalam sistem koordinat lain. Data vektor hasil digitasi garis pantai selanjutnya dikonversikan ke dalam format (.xyz) untuk digunakan dalam software pengolah arus. Data bathimetri berupa data hasil pengukuran kedalaman dengan atribut koordinat x, y dan z. Atribut x,y menyatakan koordinat horizontal dalam sistem UTM dan z menyatakan kedalaman. Data digitasi garis pantai dan data bathimetri

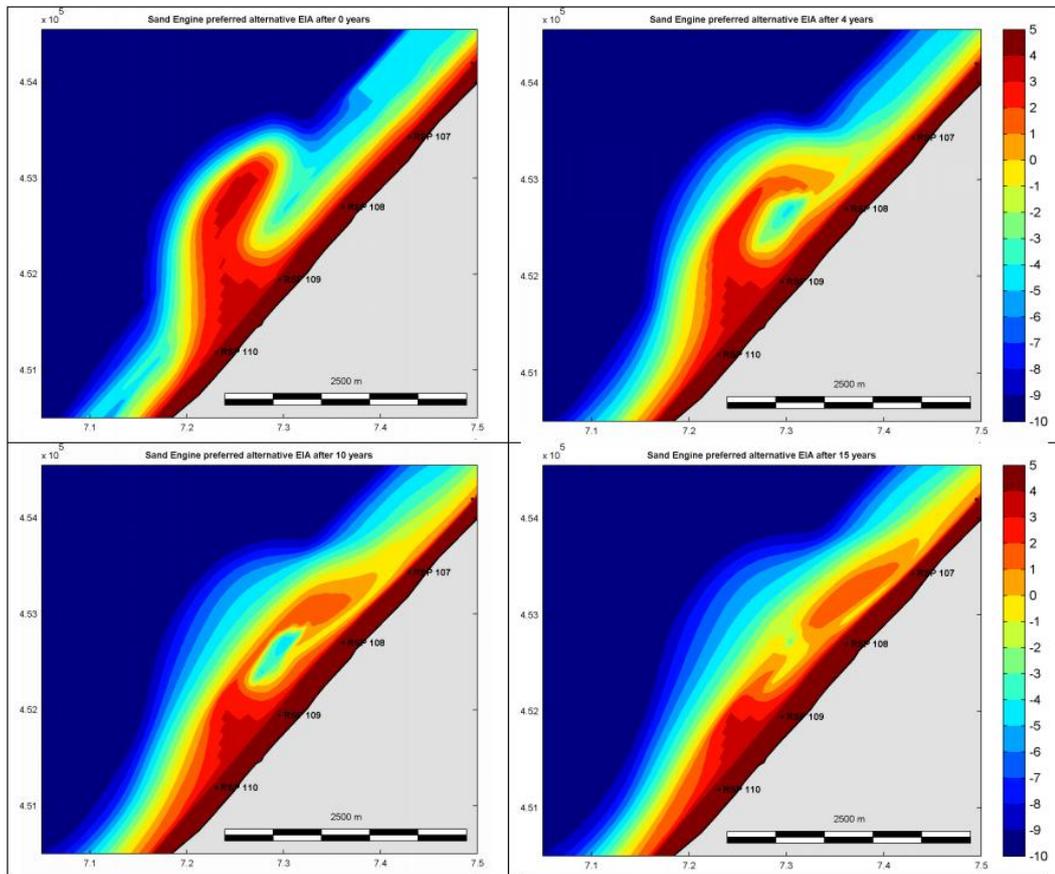
selanjutnya diolah pada modul *mesh generator* untuk membuat data *mesh* yang berupa kontur dasar laut dari perairan pelabuhan. Proses *meshing* meliputi pendefinisian batas, input data bathimetri, pembuatan jaring-jaring triangulasi dan interpolasi kedalaman. Pendefinisian batas daratan dan perairan dilakukan dengan menggunakan data digitasi garis pantai. Setelah memasukan data kedalaman dan batas, dilakukan pembuatan jaring-jaring triangulasi. Selanjutnya dilakukan interpolasi kedalaman pada titik-titik triangulasi untuk membentuk kontur dasar laut. Data pasang surut perairan disusun pada modul *time series* untuk membuat grafik kenaikan pasang surut terhadap waktu. Pemodelan arus dijalankan dengan domain kontur dasar laut perairan dengan parameter pasang surut air laut. Pemodelan menggunakan metode simulasi numerik berdasarkan persamaan kekekalan massa (kontinuitas) dan persamaan kekekalan momentum. Hasil simulasi model berupa kecepatan dan arah arus pada sumbu x dan sumbu y. Pola arus hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk memodelkan aliran sedimen dengan tambahan informasi *grain size* hasil uji sampel sedimen. Pemodelan aliran sedimen dilakukan dengan menggunakan persamaan Engelund-Hansen. Hasil simulasi sedimen berupa nilai *solid flux* dan arah aliran sedimen pada sumbu x dan y. Berdasarkan hasil perhitungannya, setiap tahun terdapat 20 Mm³ sedimen yang hilang dari pantai. Sehingga untuk mencapai kestabilan pantai diperlukan transpor dari *sand motor* sebanyak 12 Mm³ – 20 Mm³ per tahunnya

Berikutnya adalah tahap pendesainan. Ada beberapa solusi yang dibuat untuk mengatasi masalah ini. Yang pertama ada *foreshore nourishment* berupa timbunan pasir yang berada di bawah MSL. Dibutuhkan penimbunan pasir berulang dengan skala besar selama 4 – 5 tahun sekali. Alternatif berikutnya adalah *sand motor*. Perbedaannya adalah dengan adanya *sand motor* ini, perawatan yang dilakukan setiap 4 – 5 tahun sekali tidak sebanyak *foreshore nourishment*. *Sand motor* ini dibuat dengan tiga alternatif. Yang pertama berupa pulau terpisah berjarak 1 km dari tepi pantai. Yang kedua adalah tanjung dengan bentuk kait. Dan alternatif ketiga merupakan tanjung berbentuk tonjolan. Gambar 6.17 menunjukkan alternatif yang dibuat.

Keempat alternatif desain dievaluasi berdasarkan gelombang, transpor sedimen, perubahan morfologi, pola sedimentasi/erosi, kebutuhan volume pasir, dan pertambahan luasan pantai. Setelah diketahui berapa jumlah *net transport sediment*-nya, dibuatlah pemodelan dari *sand motor*-nya. Gambar 6.18 menunjukkan perkembangan morfologi dari alternatif tanjung berbentuk kait. Bagian atas kait memanjang ke arah utara dan bergerak menuju pantai dan menimbulkan semacam danau dengan saluran kecil untuk keluar masuknya air.



Gambar 6.17 Alternatif Desain Sand Motor
 Sumber: [Planning and design - EcoShape](#)



Gambar 6.18 Perkembangan Morfologi Alternatif Sand Motor Berbentuk Kait
 Sumber: (Mulder & Tonnon, 2011)

Simulasi tadi juga menunjukkan pertambahan luasan pantai setelah dilakukan *sand motor* dengan berbagai alternatif. Gambar 6.19 menunjukkan bahwa terjadi pertambahan luasan pantai dari semua alternatif yang diajukan

Alternative (c.f. Fig. 8)	after 1 year	after 5 years	after 10 years	after 15 years	after 20 years
Reference	0.2	2.6	6.2	10.8	17.0
Hook	1.6	6.8	13.7	22.7	32.9
Bell	1.2	7.0	16.6	28.0	38.8
Shoreface	0.3	3.5	11.0	20.1	30.6

Gambar 6.19 Penambahan Luasan Pantai Pada Setiap Alternatif
Sumber: (Mulder & Tonnon, 2011)

Semua desain alternatif dari *sand motor* menghasilkan luasan area pantai hampir dua kali lipat jika tanpa *sand motor*. Hal ini juga menambah keuntungan berupa perlindungan dari banjir.

Alternative (c.f. Fig. 8)	after 5 year	after 10 years	after 15 years	after 20 years	total maintenance	Sand volume	Engine volume
Reference	5.5	5.9	5.3	6	22.6	-	-
Hook	2.0	1.5	1.2	0.9	5.6	20	20
Bell	1.3	0.6	0.7	0.7	3.3	20	20
Shoreface	1.4	1.1	0.8	0.9	4.2	20	20

Gambar 6.20 Estimasi Volume Penambahan Pasir Setiap 5 Tahun Pada Setiap Alternatif
Sumber: (Mulder & Tonnon, 2011)

Dari Gambar 6.20 bisa ditampilkan bahwa setelah 20 tahun, penggunaan pasir pada *sand motor* dibandingkan dengan skema penambahan pasir tiap 5 tahun sekali menghasilkan jumlah pasir yang lebih banyak, 23.3 Mm³ – 25.6 Mm³ dibanding 22.6 Mm³. Jadi semua alternatif *sand motor* ini bisa mempertahankan bentuk dari pantai selama 22 – 25 tahun.

Keempat desain tadi juga dievaluasi dampaknya pada lingkungan melalui *Environmental Impact Assessment* (EIA). EIA mempertimbangkan beberapa hal dalam perencanaan dan konstruksi dari *sand motor* ini diantaranya:

1. Keamanan
2. Perkembangan dari lingkungan sekitar, dilihat dari kualitas habitat sekitar
3. Kualitas spasial, seperti kualitas pemandangan, akses ke timbunan pasir dan laut, serta aset arkelologis
4. Potensi pariwisata baru
5. Efek ekonomi, seperti biaya konstruksi dan perawatan atau pendapatan dari pariwisata

Hasil review EIA menunjukkan beberapa hal:

1. Semua alternatif *sand motor* bisa memperkuat pantai meskipun keempat pemodelan menunjukkan hasil yang berbeda
2. Pembangunan *sand motor* akan mengakibatkan gangguan yang berkepanjangan dan terjadi di area di mana pasir akan ditimbun dan area di mana pasir akan tertransportasi
3. Pembangunan *sand motor* berupa pulau atau semenanjung yang memiliki elevasi lebih tinggi daripada permukaan laut akan lebih mahal daripada penambahan pasir lepas pantai.

Setelah melalui proses desain dan evaluasi dampak terhadap lingkungan dipilihlah alternatif *sand motor* berupa semenanjung berbentuk kait seluas 128 Ha. Alternatif ini dipilih karena menimbulkan area rekreasi seluas hampir dua kali lipat dari kondisi eksisting, penambahan habitat, dan biaya perawatan *sand motor* setiap 5 tahun sekali tidak sebanyak dari metode penambahan pasir tiap 5 tahun sekali karena terdistribusinya *sand motor*.

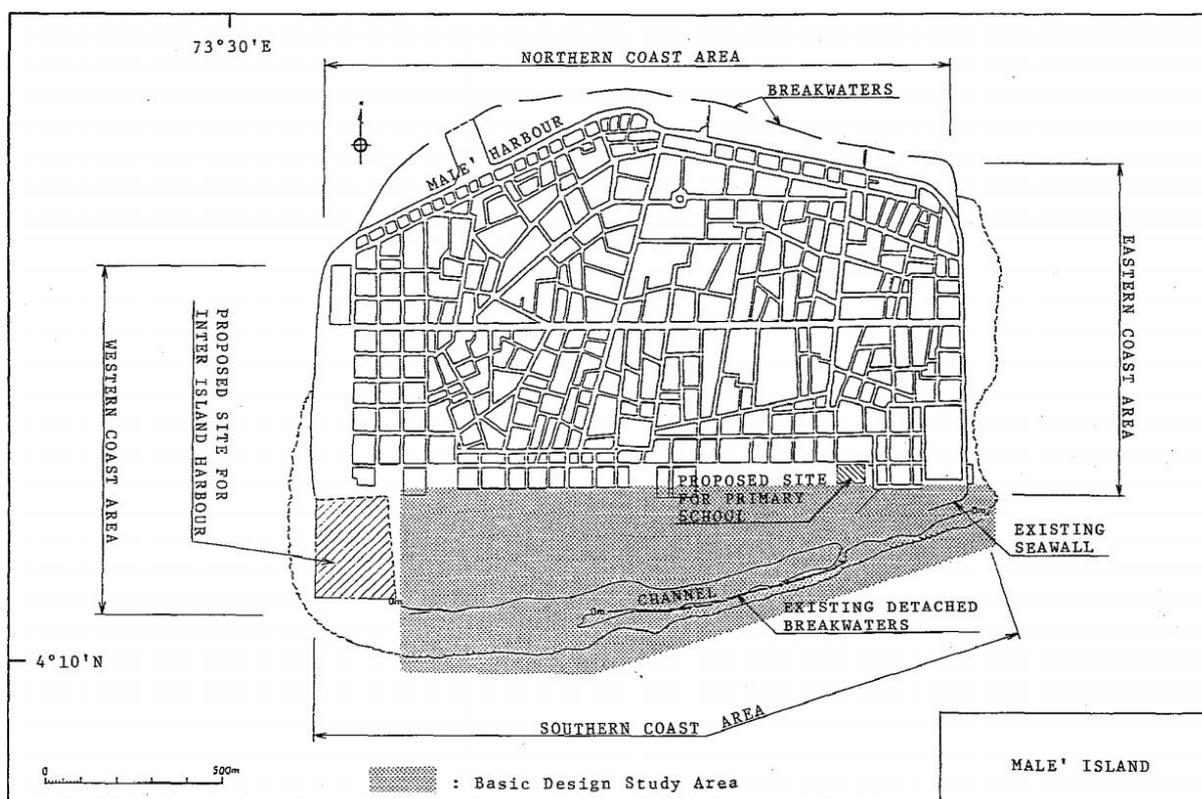
BAB 7

CONTOH PROYEK PERLINDUNGAN PANTAI

7.1. Latar Belakang

Republik Maladewa merupakan negara kepulauan dengan ibukota negara di Male'. Pusat kegiatan pemerintahan dan ekonominya terpusat di pulau utama yakni di Male' Atol. Hal ini mengakibatkan lonjakan populasi di pulau utama. Di pulau tersebut terdapat *seawall* sepanjang 100 m dengan tinggi 1,5 – 2,0 m di sisi selatan pulau. *Seawall* ini terbuat dari batu koral dan mortar. Di sisi timur pulau, terdapat *breakwater* lepas pantai sepanjang 600 m dengan tinggi 2 – 3 m. *Breakwater* ini terbuat dari batu koral dengan berat 0,1 – 3 ton. Kondisi kedua struktur ini sudah rusak dan batuannya terlepas karena gelombang. Pada April 1987, gelombang tinggi menyapu negara ini. Karena elevasi daratan hampir sama dengan MSL dan cukup landai, gelombang tinggi ini menyapu sisi selatan pulau dan menghancurkan berbagai bangunan termasuk *seawall* itu sendiri. Dengan tidak adanya perlindungan yang mumpuni bagi pulau ini, implementasi proyek ini sangatlah darurat. Pemerintahan Maladewa menjadikan perbaikan pelindung pantai sebagai proyek yang penting untuk diselesaikan.

7.2. Kondisi Eksisting Pelindung Pantai



Gambar 7.1 Peta Pulau Male'
Sumber: (JICA, 1987)

Pulau Male' memiliki perlindungan pantai di keempat sisinya seperti yang digambarkan di Gambar 7.1. Sisi selatan pulau memiliki pelindung berupa *seawall* sepanjang 100 m dari batu koral. Karena gelombang tinggi, kedua ujung *seawall* mengalami kerusakan dan semakin bertambah rusak setiap tahunnya. Tinggi *seawall* dari fondasi setinggi 2,0 m menjadikannya rentan terhadap *overtopping* saat cuaca buruk. Selain itu terdapat *breakwater* di sisi barat daya pulau sepanjang 600 m yang terbuat dari batu koral. Tetapi *breakwater* ini tidak mampu menanganinya. Kondisi *breakwater* ini sudah tercerai berai, dengan batuan yang sudah terlepas dari posisi semula.

Sisi timur pulau dan sisi barat pulau terdapat *seawall* tua dengan kondisi yang mirip dengan yang ada di sisi selatan pulau. Beton yang terpasang sudah rusak dan bagian dasar struktur sudah rusak sehingga durabilitas dan keamanan dari struktur ini harus ditingkatkan.

Sisi utara pulau terdapat *quay wall* yang membentang sepanjang Marine Drive, di depan istana kepresidenan hingga Kementerian Luar Negeri. Bagian dasar struktur ini juga mengalami kerusakan. Terdapat juga *breakwater* lepas pantai yang terbuat dari batu koral dengan tinggi dari dasar sekitar 3 – 4 m. Batuan penyusun struktur ini sudah terlepas dan mengalami kerusakan.

7.3. Outline Proyek

Proyek ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mengurangi kerusakan akibat gelombang tinggi di Male' dan mencegah terjadinya epidemi atau bencana lainnya. Kondisi geografi di Maladewa, dimana elevasi tanahnya cenderung rendah, menjadi bahaya tersendiri jika terjadi gelombang tinggi. Pelindung pantai yang dibuat diharapkan mampu menjaga stabilitas perkembangan kota. Skema dasar pelaksanaan proyek ditetapkan sebagai berikut:

1. Wilayah proyek berada di sisi selatan Male', dari sisi tenggara hingga lokasi rencana pembangunan pelabuhan internasional di sisi barat daya.
2. Struktur pelindung pantai harus bertipe *breakwater* lepas pantai yang *permeable* dengan bukaan dan dibangun di atas karang.
3. Zona sepanjang 240 m yang berada di sisi tenggara pantai menjadi prioritas pembangunan.

Wilayah proyek akan dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

1. Zona I. Zona sepanjang 240 m ini terletak di sisi tenggara pantai. Zona ini menjadi prioritas pembangunan karena:
 - a. Tanah reklamasi yang ada sudah tererosi cukup banyak hingga tepi pantai berjarak 25 – 30 m dari rumah warga. Hanya ada struktur pelindung sementara berupa gundukan tanah setinggi 1 m.
 - b. Tidak ada *breakwater* lepas pantai yang terbangun di daerah ini

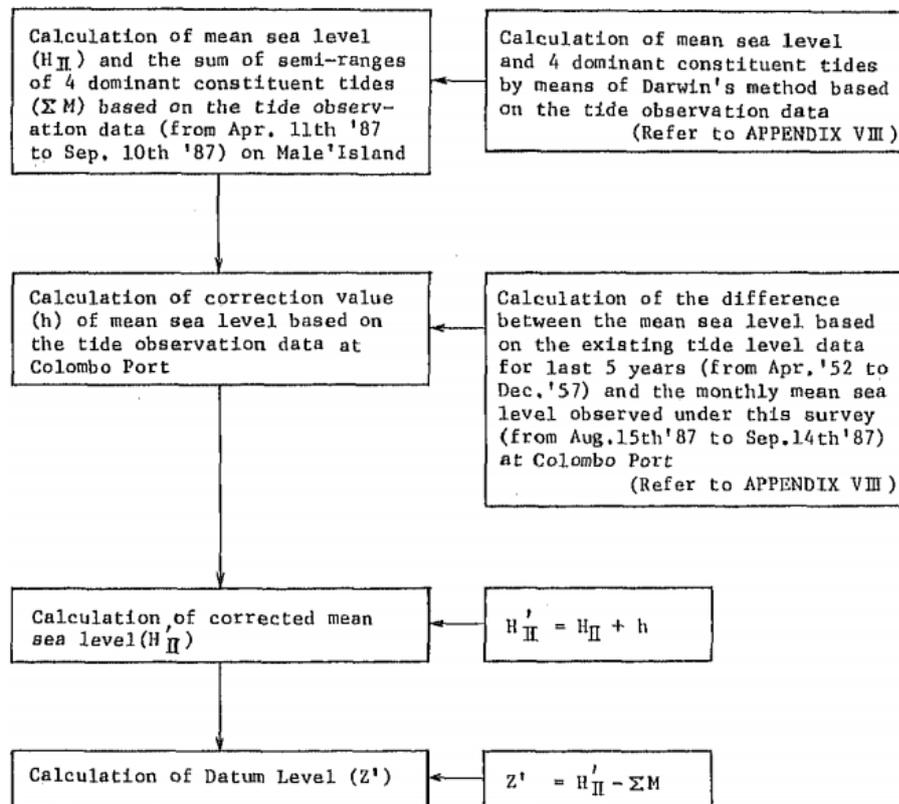
- c. Rencana pembangunan sekolah dan *power station* pulau yang akan dibangun di belakang zona I
- d. Perumahan warga yang semakin dekat ke garis pantai
- 2. Zona II. Wilayah *breakwater* eksisting dan sekitarnya sepanjang 640 m.
- 3. Zona III. Wilayah sisi barat dari *breakwater* eksisting sepanjang 640 m.

7.4. Perencanaan Breakwater

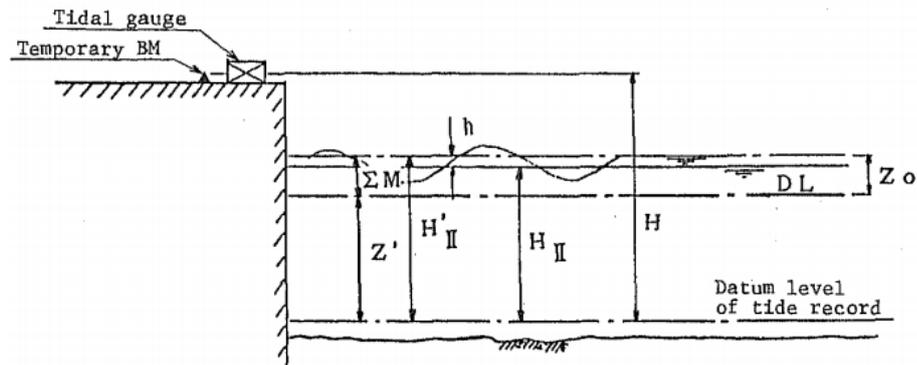
1. Penentuan datum

Datum untuk proyek ini ditentukan sebagai acuan pengerjaan proyek ini atau di masa depan.

Gambar 7.2 menunjukkan tahapan perhitungan datum.



Gambar 7.2 Flowchart Perhitungan Datum
Sumber: (JICA, 1987)



Gambar 7.3 Elevasi
Sumber: (JICA, 1987)

Berdasarkan hasil pengolahan data pasang surut, didapat elevasi pada Pulau Male' sebagai berikut:

- $H = 3,44$ m
- $H_{II} = 2,93$ m
- $h = 0,08$ m
- $\Sigma M = 0,51$ m

Dari data di atas dilakukan perhitungan datum sebagai berikut:

- $H'_{II} = H_{II} + h = 3,01$ m
- $Z' = H'_{II} - \Sigma M = 2,5$ m (0,51 m di bawah MSL)

Datum level untuk proyek dilambangkan sebagai Z_0 seperti di Gambar 7.3. Jadi, datum level yang dipakai senilai $Z_0 = 0,51$ m.

2. Elevasi HHWL

Menurut standar yang dikeluarkan oleh Jepang, elevasi muka air rencana HHWL untuk struktur pantai ditentukan dari dua metode yaitu berdasarkan data HHWL yang terobservasi atau penjumlahan.. Karena tidak ada maka dipakailah metode pertama. Metode pertama ini bisa dicari menggunakan dua metode.

- Elevasi muka air laut berdasarkan penjumlahan konstanta pasang surut

Untuk menghitung HHWL dipakai rumus sebagai berikut:

$$HHWL = MSL + (O1 + K1 + S2 + M2)$$

Berdasarkan perhitungan di subbab penentuan datum, $MSL = DL + 0,51$

Perhitungan konstanta pasang surut juga menghasilkan nilai amplitudo sebagai berikut:

- O1 (*principal lunar semi-diurnal*) : 0,04 m
- K1 (*lunar-solar semi-diurnal*) : 0,11 m
- S2 (*principal solar semi-diurnal*) : 0,13 m
- M2 (*large lunar elliptic semi-diurnal*) : 0,23 m

Maka nilai HHWL bisa dihitung sebagai berikut:

$$HHWL = MSL + (O1 + K1 + S2 + M2)$$

$$HHWL = DL + 0,51 + (0,04 + 0,11 + 0,13 + 0,23)$$

$$HHWL = DL + 1,02 \text{ m}$$

- b. Elevasi muka air tertinggi berdasarkan *trace survey* dari anomali pasang surut April 1987 Hasil *trace survey* pasang surut di lapangan ditampilkan pada . *Trace survey* dilakukan pada tiga titik.

Tabel 7.1 Hasil Trace Survey
Sumber: (JICA, 1987)

Titik survei	Trace level (m)
A	DL + 1,73
B	DL + 1,60
C	DL + 1,63

Berdasarkan hasil *trace survey*, ditetapkan HHWL sebesar DL + 1,8 m

Dari kedua metode untuk menghitung HHWL, dipilih nilai HHWL terbesar yaitu DL + 1,8 m

3. Untuk kedalaman dasar dari *breakwater* ditentukan sedalam DL – 0,7 m sampai DL + 0,3 m
4. Berat jenis material penyusun

Struktur ini direncanakan tersusun dari batu koral. Berat jenis beton dipakai sebesar 2,3 t/m³. Batu koral yang akan dijadikan material penyusun diambil sampelnya dan dibawa ke Jepang untuk diuji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis batu koral yang dipakai sebesar 2,3 t/m³.

5. Gelombang rencana

- a. Tinggi gelombang dan periode

Perhitungan tinggi gelombang rencana untuk struktur ini dilakukan dengan dua metode. Periode gelombang rencana yang dipakai sebesar 14 detik yang berasal dari rata-rata periode gelombang (10 – 11 detik) dan investigasi lapangan oleh tim (13 – 14 detik)

- Estimasi tinggi gelombang di zona gelombang pecah

Secara umum, tinggi gelombang pecah diambil sebesar $H_D = 0,78h$ dimana h adalah kedalaman kaki *breakwater*. Karena sudah diperkirakan kedalaman kaki *breakwater* di $DL - 0,7$ sampai $DL + 0,3$ m dan $HHWL = DL + 1,8$ m, maka kedalaman kaki *breakwater* dihitung sebagai berikut:

$$h = 1,8 - (-0,7 \text{ sampai } 0,3) = 1,5 \text{ m sampai } 2,5 \text{ m}$$

Sehingga ketinggian gelombang pecah diperkirakan sebesar:

$$H_D = 0,78 \times (1,5 \text{ sampai } 2,5) = 1,17 \text{ m sampai } 1,95 \text{ m}$$

- Estimasi tinggi gelombang berdasarkan *Research Paper of Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan*

Metode yang digunakan *paper* ini membutuhkan data tinggi gelombang lepas pantai. Karena tidak ada data yang tersedia maka dilakukan observasi visual dari kapal dan didapat tinggi gelombang 6,5 m. Setelah itu dihitunglah $H_{1/3}$ dengan rumus dari *Ocean Wave Statistics*.

$$H_{1/3} = 1,23 + 0,44 \times \text{tinggi gelombang hasil observasi visual}$$

$$H_{1/3} = 1,23 + 0,44 \times 6,5$$

$$H_{1/3} = 4,1 \text{ m}$$

Setelah itu menghitung tinggi gelombang tepat di depan struktur. Dipakailah grafik pada Gambar 7.4.

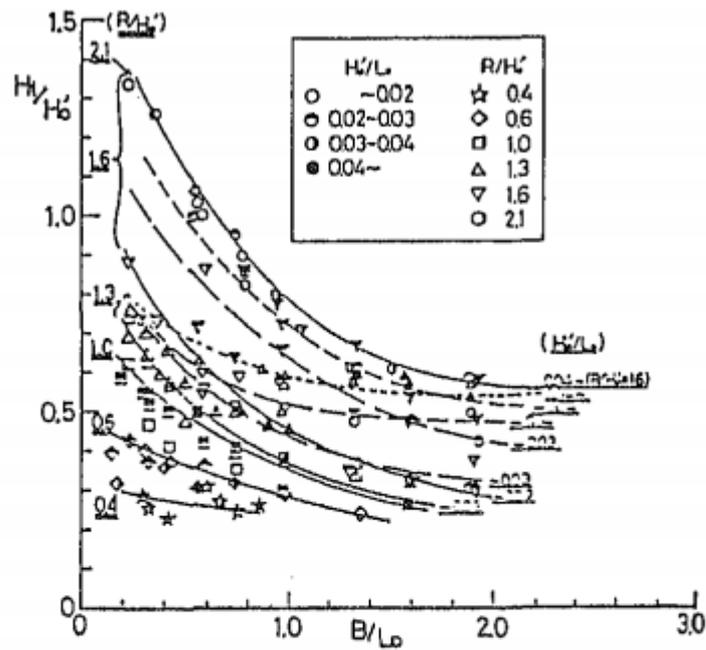


Fig. 5-4 Wave transmission coefficient due to artificial reef.

where, H_0' : equivalent offshore wave height (m)
 L_0 : offshore wavelength (m)
 R : water depth at toe of structure (m)
 B : width of the coral reef (m)
 H_t : transmitted wave height (m)

Gambar 7.4 Grafik Koefisien Transmisi, K_t , Karena Karang Buatan
 Sumber: (JICA, 1987)

$$H_0' = 4,1 \text{ m}$$

$$L_0 = 1,56 \times 14^2 = 306 \text{ m}$$

$$R = 2,5 \text{ m}$$

$$B = 30 \text{ m}$$

Sehingga:

$$H_0' / L_0 = 4,1/306 = 0,013$$

$$R / H_0' = 2,5 / 4,1 = 0,61$$

$$B / L_0 = 30 / 306 = 0,1$$

Setelah diplot pada grafik di Gambar 7.4 didapat nilai H_t / H_0' sebesar 0,47. Maka tinggi gelombang di depan struktur sebesar

$$H_t = 0,47 \times 4,1 = 1,93 \text{ m}$$

Dari dua metode tadi didapat tinggi gelombang di depan struktur setinggi 1,17 – 1,95 m dan 1,93 m. Dipakailah nilai tinggi gelombang rencana setinggi 2,0 m

b. Arah gelombang

Berdasarkan laporan yang *Tidal Wave Disaster Assessment* yang disusun Jepang dan Belanda, arah gelombang dominan berasal dari tenggara. Kemudian saat melakukan survei lapangan, tim memang menemukan bahwa gelombang berasal dari tenggara. Tetapi pada struktur eksisting, gelombang yang datang membentuk sudut tegak lurus. Dokumen yang lain yang mendukung pendapat ini berasal dari foto udara pada buku *Maldives A Nation of Islands* yang menunjukkan bahwa gelombang yang datang juga tegak lurus struktur. Jadi, diputuskan bahwa gelombang yang datang pada struktur membentuk sudut tegak lurus.

6. Panjang *breakwater*

Berdasarkan standar Jepang, tinggi gelombang di belakang struktur menjadi konstan jika panjang *breakwater* tidak lebih kecil dari 1,5 kali panjang gelombang. Panjang gelombang yang terjadi sebesar $L = \sqrt{g \cdot h} \cdot T_D = 69,3 \text{ m}$. Sehingga panjang *breakwater* menjadi:

$$l = 1,5L = 1,5 \times 69,3 = 104 \text{ m}$$

Dipakailah panjang *breakwater* sebesar 100 m

7. Jarak antar *breakwater*

Berdasarkan standar Jepang, lebar bukaan pada *breakwater* lepas pantai tidak kurang dari 0,6 kali panjang gelombang. Sehingga lebar bukaan menjadi:

$$l' = 0,6L = 0,65 \times 69,3 = 41,6 \text{ m}$$

Dipakailah jarak antar *breakwater* sebesar 40 m

8. Elevasi puncak

Ada beberapa kondisi yang menjadi pertimbangan dalam menentukan elevasi puncak yaitu:

- a. Tinggi gelombang di belakang *breakwater*
- b. *Overtopping rate* pada *seawall* di belakang *breakwater*
- c. Akurasi perhitungan *highest high water level*, HHWL dan tinggi gelombang dan periodenya
- d. Keandalan *breakwater* terhadap *overtopping*

Maka dari itu diputuskan bahwa elevasi puncak merupakan penjumlahan dari HHWL dan tinggi gelombang rencana

9. Lebar puncak

Lebar puncak dari *breakwater* adalah panjang dari tiga unit lapisan pelindung

10. Susunan *breakwater*

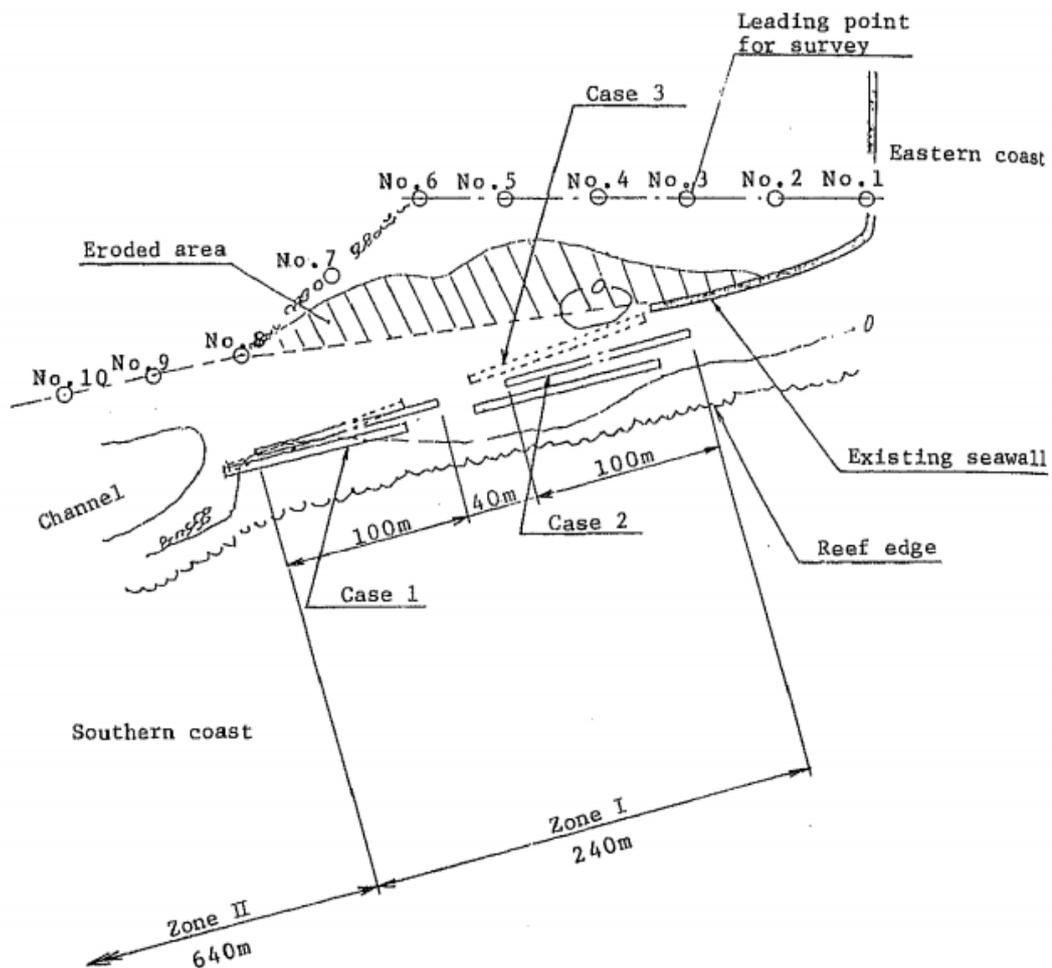
Penyusunan *breakwater* mempertimbangkan zonasi yang sudah ditentukan di awal yang mengakibatkan perbedaan pada setiap zona.

- a. Zona I

Zona I merupakan zona dengan urgensi tertinggi maka dari itu perlu dicari susunan *breakwater* paling optimum. Disusunlah tiga skenario untuk Zona I. Skenario ini menunjukkan perbedaan penyusunan *breakwater*. Perbedaan penyusunan ketiga skenario ditampilkan pada Berikut penjabarannya:

- Skenario 1. *Breakwater* berjarak sekitar 30 m dari karang dan dibangun sejajar dengan *seawall* eksisting. Wilayah laut di belakang *breakwater* dibuat seluas mungkin
- Skenario 2. *Breakwater* dibangun menumpuk dengan *seawall* lama sehingga tinggi gelombang menurun menjadi 0,7 – 0,8 m di sisi barat dari *seawall* lama. Penyusunan *breakwater* yang agak miring membuat efek difraksi gelombang bisa berkurang.
- Skenario 3. Sisi timur dari *breakwater* dibangun dekat dengan *seawall* eksisting untuk mengurangi efek gelombang yang datang dari arah tenggara.

Komparasi ketiga skenario ditampilkan pada Tabel 7.2. dan Gambar 7.5.



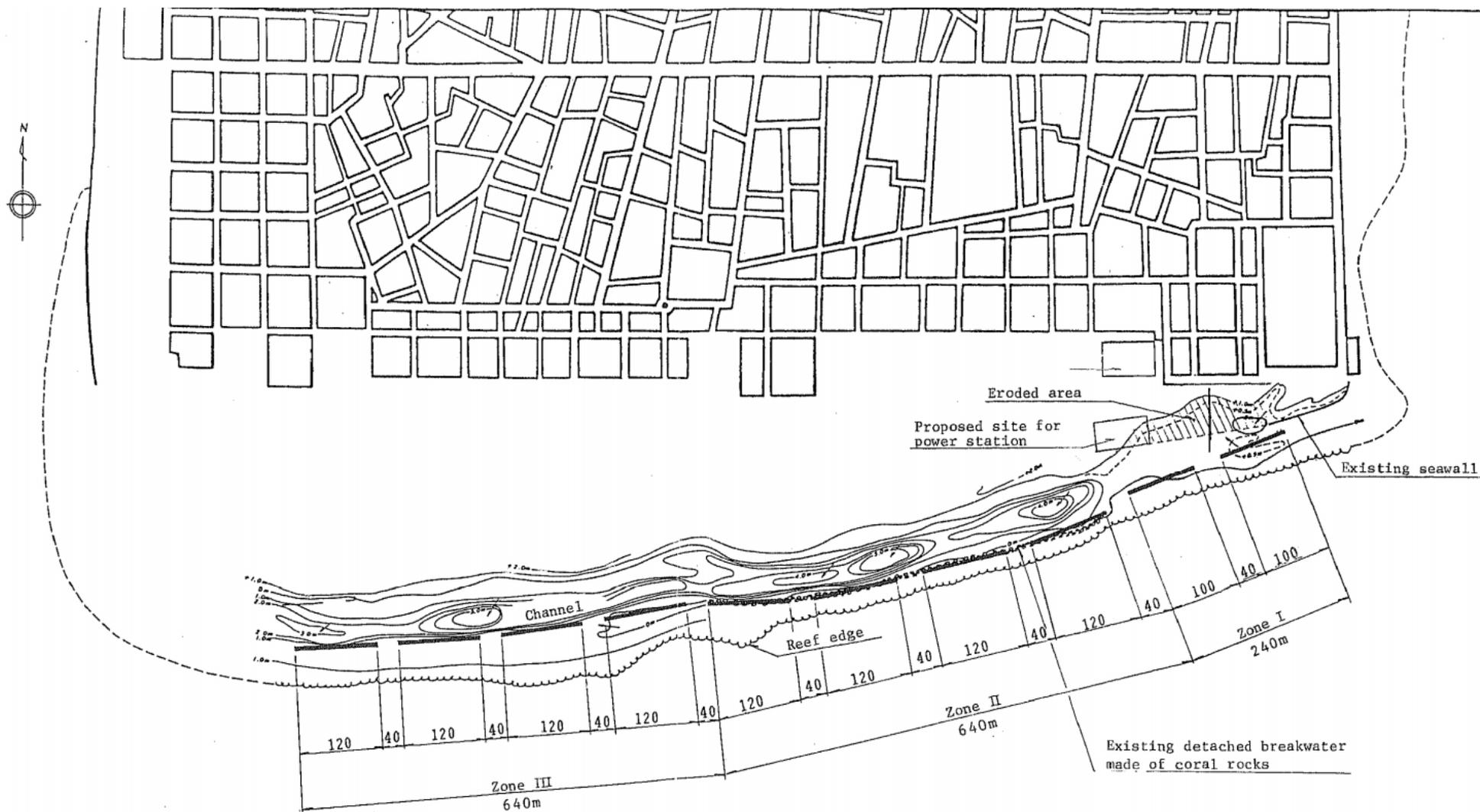
Gambar 7.5 Penyusunan Breakwater Berdasarkan Tiga Skenario
Sumber: (JICA, 1987)

Tabel 7.2 Perbedaan Skenario Pada Zona I
Sumber: (JICA, 1987)

Skenario Spesifikasi	1	2	3
Biaya konstruksi relatif	1	1	1
Durasi konstruksi relatif	1	1	1
Tinggi gelombang sepanjang <i>breakwater</i> (m)	1,6 – 1,9	1,5 – 1,9	1,4 – 1,9
Perlindungan terhadap <i>seawall</i> eksisting	Sama seperti sebelumnya	Ada	Belum bisa mencukupi
Distribusi tinggi gelombang pada <i>seawall</i>			
<i>Overtopping rate</i> maksimum (m ³ /m.det)	3 x 10 ²	1,6 x 10 ²	5 x 10 ²
<i>Overtopping rate</i> izin (m ³ /m.det)	2,0 x 10 ²		
Tingkat kecocokan	3	1	2

b. Zona II dan III

Menimbang kondisi topografi, jarak ke karang, rencana reklamasi, rute navigasi, dan kemudahan metode konstruksi penyusunan *breakwater* baru akan mirip dengan yang lama. *Breakwater* akan disusun untuk melindungi daerah di belakangnya seefektif mungkin dan dengan panjang *breakwater* seminim mungkin. Dimensi *breakwater* menjadi panjang 120 m dan berjarak 40 m. Keseluruhan susunan *breakwater* untuk ditampilkan pada Gambar 7.6.



Gambar 7.6 Penyusunan Breakwater Pada Setiap Zona
 Sumber: (JICA, 1987)

11. Lapisan *breakwater*

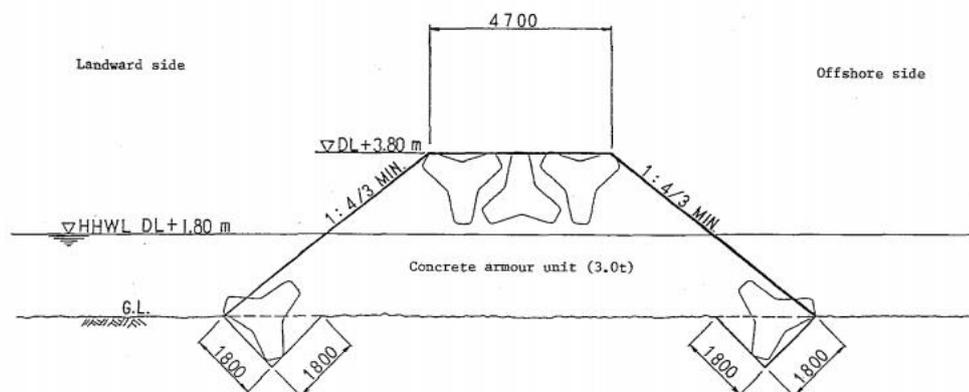
Jenis struktur yang dipakai pada proyek ini adalah *rubble-mound breakwater*. Jenis ini terdiri tumpukan batu atau struktur buatan dengan berbagai ukuran. Perhitungan dilakukan untuk menentukan berat per unit dari lapisan pelindung terluar. Rumus yang digunakan adalah rumus Hudson. Berikut perhitungannya:

$$W = \frac{\gamma \cdot H^3}{K_D \left(\frac{\gamma}{W-1} \right)^3 \cdot \cot \alpha} \times FS$$

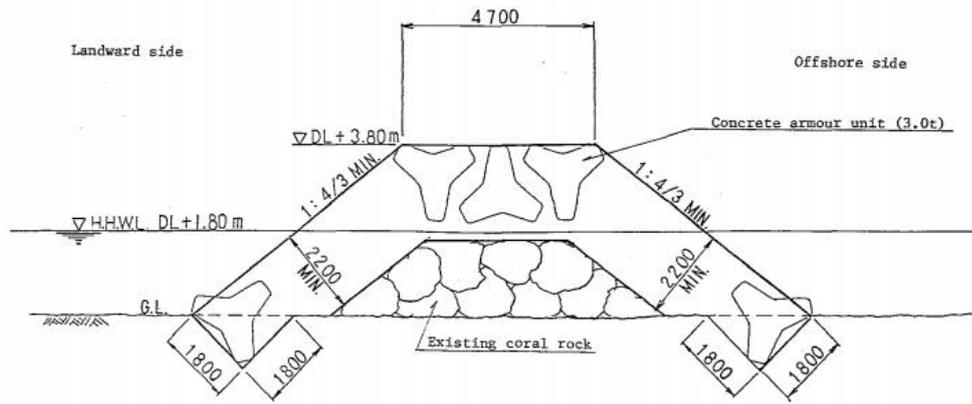
$$W = \frac{2,3 \times 2^3}{8,3 \left(\frac{2,3}{\frac{2,03}{1,03} - 1} \right)^3 \cdot \cot 36,52} \times 1,5$$

$$W = 1,34 \text{ ton} \rightarrow 2 \text{ ton}$$

Meskipun berat minimal per unit adalah 2 ton, berat nominal 3 ton dipakai dengan pertimbangan keamanan, durabilitas, dan biaya pekerjaan konstruksi. Zona I seluruhnya terdiri dari *armor unit* dengan berat yang sudah ditentukan. Zona II memakai batu karang yang ada sebagai lapisan intinya dan memakai lapisan pelindung dari beton di sisi luarnya. Zona III memakai struktur lapisan yang sama seperti Zona I. Untuk melindungi kaki *breakwater* dari gelombang dan arus maka unit terbawah ditanam lebih dalam pada lantai laut. Penampang melintang dari setiap zona ditampilkan pada Gambar 7.7 dan Gambar 7.8 dan foto asli dari *breakwater* ditampilkan pada Gambar 7.9.



Gambar 7.7 Penampang Melintang Breakwater Pada Zona I dan Zona III
Sumber: (JICA, 1987)



Gambar 7.8 Penampang Melintang Breakwater Pada Zona II
 Sumber: (JICA, 1987)



Gambar 7.9 Tampak Atas Pembangunan Breakwater Pada Pantai Selatan Pulau Male, Maladewa
 Sumber: [Male' Breakwater Project \(maga.lk\)](http://maga.lk)

BAB 8

PENUTUP

8.1. Kesimpulan

Ada beberapa kesimpulan yang bisa diambil dari tugas pengganti kerja praktek ini.

1. Wilayah pantai pada umumnya memiliki beberapa karakteristik seperti fenomena-fenomena yang terjadi di wilayah pantai, pembangkitan gelombang, perubahan elevasi muka air laut, dan arus
2. Proses-proses yang terjadi di pantai erat kaitannya dengan perubahan garis pantai secara fisik yang disebabkan oleh pergerakan sedimen tegak lurus pantai, pergerakan sedimen sejajar pantai, abrasi, dan akresi
3. Bangunan pantai terdiri dari dua jenis yaitu *hard structure* dan *soft structure*. *Hard structure* pada merupakan bangunan pantai buatan manusia yang bisa terbuat dari butiran-butiran batu, kayu, *sheet pile*, atau beton. Sedangkan *soft structure* merupakan bangunan pantai yang menggunakan proses alam untuk melindungi pantai seperti reboisasi atau penambahan dan suplai pasir tambahan.
4. Konsep perencanaan struktur bangunan pantai terdiri dari beberapa tahapan seperti: analisis data gelombang yang menghasilkan gelombang periode ulang, penentuan elevasi muka air laut yang menghasilkan elevasi muka air rencana, penentuan gelombang hasil deformasi untuk menentukan tinggi gelombang rencana, dan perhitungan stabilitas struktur baik *rigid* atau *flexible* untuk menentukan kekuatan struktur terhadap gelombang.
5. Konsep perencanaan bangunan pantai alami untuk reboisasi mempertimbangkan jenis tanaman yang mampu melindungi pantai dan zonasi penanamannya. Sedangkan untuk *sand motor* atau *sand nourishment* memperhitungkan jumlah sedimen yang tererosi dan terendapkan dalam jangka waktu yang panjang untuk menentukan volume pasir yang perlu ditambah setiap periode tahun tertentu.

8.2. Saran

1. Data mengenai contoh proyek perlindungan pantai tidak bisa didapatkan secara lengkap karena proyek yang dilakukan berada di luar negeri dan berbahasa asing. Perlu dilakukan pencarian data proyek dan pemahaman yang lebih mendalam.
2. Prinsip perencanaan reboisasi menggunakan peraturan dari Amerika Serikat. Perlu dilakukan studi mendalam mengenai jenis-jenis tumbuhan yang cocok untuk reboisasi di pantai Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Bernawis, L. I., 2000. Temperature and Pressure Responses on El-Nino 1997 and La-Nina 1998 in Lombok Strait. *Proc. The JSPS-DGHE International Symposium on Fisheries Science in Tropical Area*.
- Bruun, P., 1954. Coastal Erosion and the Development of Beach Profiles. In: *Beach Erosion Board Technical Memorandum No. 44, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*. Vicksburg: s.n.
- BS 6349, 1991. *Maritime Structures - Part 7: Guide to design and construction of breakwaters*. s.l.:British Standard.
- CERC, 1984. *Shore Protection Manual Volume I*. Washington D.C.: Department of Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineer, Coastal Engineering Research Center.
- Chandra, W., 2015. *Beginilah Semangat Perempuan Lampung Selsel Menjaga Pantainya*. [Online]
Available at: <https://www.mongabay.co.id/2015/08/12/beginilah-semangat-perempuan-lampung-selsel-menjaga-pantainya/>
[Diakses 12 Juli 2021].
- d'Angremond, K., Span, H. T., van der Weide, J. & Waestenenk, A. J., 1970. Use of Asphalt in Breakwater Construction. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(12), pp. 1601 - 1628.
- Dean, R. G., 1977. *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Newark: Dept. of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware.
- Dean, R. G., 1987. *Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Dean, R. G., Kriebel, D. L. & Walton, T. L., 2008. *Coastal Engineering Manual - Part III*. s.l.:U.S. Army Corps of Engineers.
- Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng, 2019. *Pentingnya Hutan Mangrove Bagi Lingkungan Hidup*. [Online]
Available at: <https://dlh.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/pentingnya-hutan-mangrove-bagi-lingkungan-hidup-37>
[Diakses 12 Juli 2021].
- Djabar, B. G., Djamaluddin, R. & Rampengan, R. M., 2017. Morfometri Lereng Kawasan Sub-Litoral Pantai Malalayang II Kota Manado. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 2(1), pp. 56 - 63.

- Emanuel, K., t.thn. *Papers, Data, and Graphics Pertaining to Tropical Cyclone Trends and Variability*. [Online]
Available at: <https://emanuel.mit.edu/papers-data-and-graphics-pertaining-tropical-cyclone-trends-and-variability>
[Diakses 17 Juli 2021].
- Garrison, T. & Ellis, R., 2016. *Essential of Oceanography*. Boston: Cengage Learning.
- Gross, M. G., 1990. *Oceanography: A View of Earth*. s.l.:Prentice Hall.
- Hutabarat, S. & Evans, S. M., 2006. *Pengantar Oseanografi*. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- JICA, 1987. *Basic Design Study Report on The Project for Constructing Breakwaters on Southern Coast of Male' in The Republic of Maldives*, s.l.: Japan International Cooperation Agency.
- Karamma, R. & Sukri, A. S., 2018. Pemodelan Pasang Surut Terhadap Surf Zone Menggunakan Surfer, Fortran C++ dan GIS Pada Pantai Kota Makassar. *semanTIK*, 4(2), pp. 47 - 56.
- Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman , 2019. *Percepatan Pemulihan Ekosistem Mangrove*. [Online]
Available at: <https://seminar.bio.unsoed.ac.id/index.php/ICoMIRE/ICoMIRE-2019/paper/viewFile/606/20>
[Diakses 12 Juli 2021].
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J. & Tasa, D. G., 2013. *Atmosphere, The: An Introduction to Meteorology*. 12 penyunt. s.l.:Pearson.
- Maia, A. et al., 2017. *A web platform for the systematic monitoring of coastal structures*. s.l., 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management.
- Mangor, K., 2020. *Shore Nourishment*. [Online]
Available at: http://marinespecies.org/introduced/wiki/Shore_nourishment
[Diakses 17 Desember 2020].
- Mangor, K., Drønen, N. K., Kærgaard, K. H. & Kristensen, S. E., 2017. *Shoreline Management Guidelines*. 4 penyunt. s.l.:DHI.
- Marchand, M., Long, T. T. & Sawarendo, 2012. *Adaptive water management for Delta regions: Towards GREEN water defense in East Asia*. s.l.:s.n.
- Moore, B. D., 1982. *Beach Profile Evolution in Response to Changes to Water Level and Wave Height*, Newark: Department of Civil Engineering, University of Delaware.

- Mulder, J. P. & Tonnon, P. K., 2011. "Sand Engine": Background and Design of A Mega-Nourishment Pilot in The Netherlands. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32).
- National Park Service, 2019. *Groins and Jetties*. [Online] Available at: <https://www.nps.gov/articles/groins-and-jetties.htm> [Diakses 18 Juli 2021].
- Ningsih, N. S., 2002. *Gelombang Laut*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- NOAA, 2020. *National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center*. [Online] Available at: <https://www.nhc.noaa.gov/surge/> [Diakses 15 Desember 2020].
- NOAA, 2020. *National Ocean Service*. [Online] Available at: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/stormsurge-stormtide.html> [Diakses 15 Desember 2020].
- O'Neill, C. R., 1986. *Structural Methods for Controlling Coastal Erosion*. Ithaca: Cornell Cooperative Extension.
- Ongkosongo, O., 1989. *Pasang-Surut*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Oumeraci, H. & Kortenhaus, A., 2011. Core made of geotextile sand containers for rubble mound breakwaters and seawalls: Effect on armour stability and hydraulic performance. *Ocean Engineering*, 38(1), pp. 159 - 170.
- Pickard, G. L. & Pond, S., 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*. New York: Pergamon Press.
- Poerbandono, 1999. *Hidrografi Dasar*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Purwanto, et al., 2020. Analisis Peramalan dan Periode Ulang Gelombang di Perairan Bagian Timur Pulau Lirang, Maluku Barat Daya. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(1), pp. 80-89.
- Qingdao Haisan New Energy Co., L., 2017. [Online] Available at: <https://haisan.en.made-in-china.com/product/VXOEjzNxnuYk/China-Gabion-Box-Drainage-Box-Using-for-Breakwater-Wall.html> [Diakses 15 Maret 2021].
- Rao, N. & Mazumdar, S., 1966. A technique for forecasting storm waves. *Indian J. Meteorol. Geophys.*, Volume 17, pp. 333 - 346.
- Robertson, B., Hall, K. R., Zytner, R. G. & Nistor, I., 2013. Breaking Waves: Review of Characteristic Relationships. *Coastal Engineering Journal*, 55(1), pp. 1 - 40.

- Safitri, Y., 2016. *Definisi dari Groin, Jetty, Seawaall, Revetment, Sand Bypassing, Polder, dan Peat*. Semarang: s.n.
- Schwartz, M. L., 2005. *Encyclopedia of Coastal Science*. Dodrecht: Springer.
- Silvester, R., 1971. *Computation of storm surge. Proceedings of the 12th Conference on Coastal Engineering*. New York, ASCE.
- Sleath, 1982. *Sea Bed Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Sorensen, R. M., 1978. *Basic Coastal Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Triatmodjo, B., 2016. *Teknik Pantai*. 8 ed. Yogyakarta: Beta Offset.
- USACE, 2015. *Beach Erosion Control & Hurricane Protection Project: Limited Reevaluation Report Engineering Appendix A*, Jacksonville : U.S. Army Corps of Engineers, Jacksonville District.
- Verlinde, C., 2003. *Shoreline Protection and Restoration*. Havana: Northwest Florida Water Management District.
- Victoria, H., 2020. *Bluestone Seawall at Brighton Beach in Melbourne*. [Online] Available at: <https://www.abc.net.au/news/2020-01-08/bluestone-seawall-at-brighton-beach-in-melbourne-2009-1/11799148?nw=0>
[Diakses 12 Juli 2021].
- WMO, 2011. *Guide to Storm Surge Forecasting*. Geneva: World Meteorological Organization.