



DASAR-DASAR TEKNIK PANTAI: HIDRODINAMIKA, STRUKTUR, DAN PENGELOLAAN

PENULIS :

Imam Rohani, Andi Imran Anshari, Yusman, Irwan, Lulut Alfari, Budiman

DASAR-DASAR TEKNIK PANTAI: HIDRODINAMIKA, STRUKTUR, DAN PENGELOLAAN

**Imam Rohani
Andi Imran Anshari
Yusman
Irwan
Lulut Alfaris
Budiman**



GET PRESS INDONESIA

DASAR-DASAR TEKNIK PANTAI: HIDRODINAMIKA, STRUKTUR, DAN PENGELOLAAN

Penulis :

Imam Rohani
Andi Imran Anshari
Yusman
Irwan
Lulut Alfaris
Budiman

ISBN : 978-634-255-179-0

Editor : Ari Yanto., M.Pd

Penyunting : Tri Puti Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, November 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Dasar-Dasar Teknik Pantai: Hidrodinamika, Struktur, Dan Pengelolaan ini.

Buku Ini Membahas Pengantar Teknik Pantai, Hidrodinamika Pantai, Transportasi Sedimen Pantai, Pengukuran dan Analisis Data Gelombang, Struktur Pemecah Gelombang (*Breakwater*), Struktur Groin, Dinding Laut (*Seawall*) dan Revetment.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, November 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 PENGANTAR TEKNIK PANTAI	1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Teknik Pantai.....	1
1.2 Pentingnya Pengelolaan Wilayah Pesisir	4
1.3 Permasalahan Pantai di Indonesia dan Global	6
1.4 Prinsip-prinsip Pengelolaan Pantai Terpadu (ICM)	9
DAFTAR PUSTAKA.....	12
BAB 2 HIDRODINAMIKA PANTAI.....	17
2.1 Teori Gelombang.....	17
2.1.1 Gelombang Linier (<i>Airy Wave Theory</i>)	17
2.1.2 Gelombang Stokes.....	18
2.1.3 Gelombang Cnoidal	19
2.2 Karakteristik Gelombang	21
2.2.1 Tinggi Gelombang	21
2.2.2 Panjang Gelombang	22
2.2.3 Periode Gelombang.....	22
2.2.4 Kecepatan Rambat Gelombang	22
2.3 Transformasi Gelombang	25
2.3.1 Refraksi	25
2.3.2 Difraksi	25
2.3.3 Refleksi	26
2.3.4 Gelombang Pecah	26
2.4 Pasang Surut.....	28
2.4.1 Konsep Dasar Pasang Surut	28
2.4.2 Jenis Pasang Surut.....	28
2.4.3 Gaya Pembangkit Pasang Surut	31
2.4.4 Analisis Harmonik Pasang Surut.....	31
2.5 Arus Pantai	33
2.5.1 Arus Susur Pantai (<i>Longshore Current</i>)	33
2.5.2 Arus Tegak Lurus Pantai (<i>Rip Current</i>).....	35
2.5.3 Peran Arus Pantai dalam Dinamika Pesisir.....	37
DAFTAR PUSTAKA.....	38

BAB 3 TRANSPORT SEDIMEN PANTAI.....	41
3.1 Konsep Dasar Transport Sedimen	41
3.2 Mekanisme Transportasi Sedimen	42
3.3 Metode Analisis dan Perhitungan.....	43
3.4 Implikasi terhadap Perubahan Garis Pantai.....	45
DAFTAR PUSTAKA	47
BAB 4 PENGUKURAN DAN ANALISIS DATA	
GELOMBANG	49
4.1 Ruang Lingkup Pengukuran dan Analisis Gelombang....	50
4.2 Relevansi dalam Teknik Kelautan	50
4.3 Dasar Teori Gelombang.....	51
4.3.1 Definisi Gelombang Laut.....	51
4.3.2 Klasifikasi Gelombang.....	51
4.3.3 Parameter Utama Gelombang.....	52
4.3.4 Teori Gelombang Linier (<i>Airy Wave Theory</i>)	53
4.3.5 Energi dan Fluks Gelombang.....	53
4.3.6 Spektrum Energi Gelombang.....	54
4.4 Teknik Pengukuran Gelombang	54
4.4.1 Metode Pengukuran Gelombang	55
4.4.2 Kalibrasi dan Validasi Instrumen	57
4.4.3 Pengambilan Data Lapangan	57
4.4.4 Contoh Studi Kasus: Pengukuran di Perairan Dangkal.....	57
4.5 Pengolahan Dan Analisis Data Gelombang.....	58
4.5.1 Pra-Pemrosesan Data.....	58
4.5.2 Analisis Domain Waktu (<i>Time Domain Analysis</i>)	59
4.5.3 Analisis Domain Frekuensi (<i>Spectral Analysis</i>).....	59
4.5.4 Analisis Spektrum Energi Gelombang.....	60
4.5.5 Analisis Arah Gelombang.....	61
4.5.6 Contoh Analisis Data Gelombang.....	61
4.5.7 Pengolahan Data dengan MATLAB / Python.....	62
4.6 Interpretasi Dan Aplikasi Data Gelombang.....	62
4.6.1 Parameter Kunci dalam Desain Teknik Kelautan ...	63
4.6.2 Analisis Statistik Ekstrem Gelombang.....	63
4.6.3 Penerapan dalam Desain Struktur Pantai	64
4.6.4 Aplikasi dalam Desain Pelabuhan	65
4.6.5 Pemanfaatan Energi Gelombang Laut	65

4.6.6 Studi Kasus: Analisis Gelombang untuk Perencanaan Breakwater di Perairan Lombok.....	66
4.7 Kesimpulan.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
BAB 5 STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG	69
5.1 Pendahuluan.....	69
5.2 Bagian Inti (<i>Core</i>)	70
5.3 Lapisan Filter (<i>Filter Layer</i>)	72
5.4 Lapisan Pelindung (<i>Armor Layer</i>)	74
5.5 Lapisan Penunjang (<i>Secondary Layer</i>)	76
5.6 Pondasi dan Perlindungan Dasar	78
5.7 Mahkota (<i>Crest</i>) dan Jalan Inspeksi.....	80
5.8 Struktur Tambahan	82
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BAB 6 STRUKTUR GROIN	89
6.1 Konsep Dasar Groin.....	89
6.2 Teori Dasar Perencanaan Groin	91
6.4 Jenis dan Material Groin.....	93
6.5 Prosedur Desain Struktur Groin	94
6.6 Dampak Lingkungan dan Ekologis	95
6.7 Evaluasi Efektivitas Struktur Groin	96
6.8 Pemodelan Hidrodinamika dan Sedimen.....	97
6.9 Standar dan Regulasi Desain Groin	98
DAFTAR PUSTAKA.....	100
BAB 7 SEAWALL DAN REVETMENT	101
7.1 Sejarah Seawall	101
7.2 Definisi Seawall.....	104
7.3 Jenis – Jenis Tanggul.....	105
7.3.1 Tembok Vertikal/Bulkhead	105
7.3.2 Struktur Miring/Melengkung.....	106
7.3.3 Gundukan/Rubble Mound.....	107
7.4 Revetmen.....	109
7.4.1 Tipe revetmen	113
7.4.2 Stabilitas revetmen.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....	122
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Ringkasan Pentingnya Pengelolaan Wilayah Pesisir	5
Tabel 1.2. Permasalahan Pantai Indonesia dan Global (2014–2024).....	9
Tabel 2.1. Perbandingan teori gelombang.....	21
Tabel 2.2. Perbandingan karakteristik gelombang di laut dalam dan perairan dangkal.....	23
Tabel 2.3. Ringkasan Perbedaan Fenomena.....	28
Tabel 2.4. Jenis-jenis pasang surut dan karakteristiknya.....	29
Tabel 2.5. Jenis, periode, dan penyebab konstituen pasang surut utama	33
Tabel 2.6. Nilai (K) Berdasarkan jenis pantai dan kondisi gelombang.....	34
Tabel 2.7. Perbandingan arus susur pantai dan tegak lurus pantai.....	37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Definisi Zona pantai dan Laut.....	2
Gambar 1.2. Skematisasi pengelolaan struktur dan ekosistem laut.....	4
Gambar 1.3. Skema interaksi ekologi, ekonomi, dan sosial dalam ICZM.....	6
Gambar 1.4. Diagram Prinsip ICM	10
Gambar 2.1. Perbandingan bentuk gelombang; Airy vs Stokes vs Cnoidal	20
Gambar 2.2. Profil gelombang laut perairan dalam dan perairan dangkal.	24
Gambar 2.3. Ilustrasi perilaku gelombang.....	27
Gambar 2.4. Pola pasang surut (diurnal, semi-diurnal, campuran).	29
Gambar 2.5. Siklus spring tide dan neap tide.	30
Gambar 2.6. Contoh grafik hasil analisis harmonik pasang surut.....	32
Gambar 2.7. Arus susur pantai dan tegak lurus pantai.....	36
Gambar 5.1. Pemecah gelombang sisi miring	71
Gambar 5.2. Susunan lapisan pemecah gelombang sisi miring.....	73
Gambar 5.3. Jenis-jenis lapisan pelindung.....	75
Gambar 6.1. Skematisasi aliran air dari groin.....	91
Gambar 7.1. Penampang melintang pemecah gelombang utama.....	101
Gambar 7.2. Tembok laut di Vancouver	103
Gambar 7.3. Pembangunan Giant Sea Wall di Jakarta.....	104
Gambar 7.4. Sketsa dan contoh tembok vertikal.....	106
Gambar 7.5. Sketsa dan contoh struktur miring/ melengkung.....	107
Gambar 7.6. Sketsa dan contoh gundukan/ <i>rubble mound</i>	108
Gambar 7.7. <i>Revetment</i> (dinding pantai) sebagai pelindung erosi pantai	110
Gambar 7.8. Gelombang pecah menghantam dinding.....	112

Gambar 7.9. Revetmen Tipe Rubble Mound.....	114
Gambar 7.10. Revetment dari susunan blok beton1.....	15
Gambar 7.11. Revetment dari fondasi tiang dan turap baja.....	115
Gambar 7.12. Revetment sisi tegak dari turap baja dan tiang kayu	116
Gambar 7.13. Revetment tipe bronjong.....	117
Gambar 7.14. Revetment dari tumpukan batu pecah.....	117
Gambar 7.15a dan 7.15b. Revetment dari pipa (<i>buis</i>) beton.....	118

BAB 1

PENGANTAR TEKNIK PANTAI

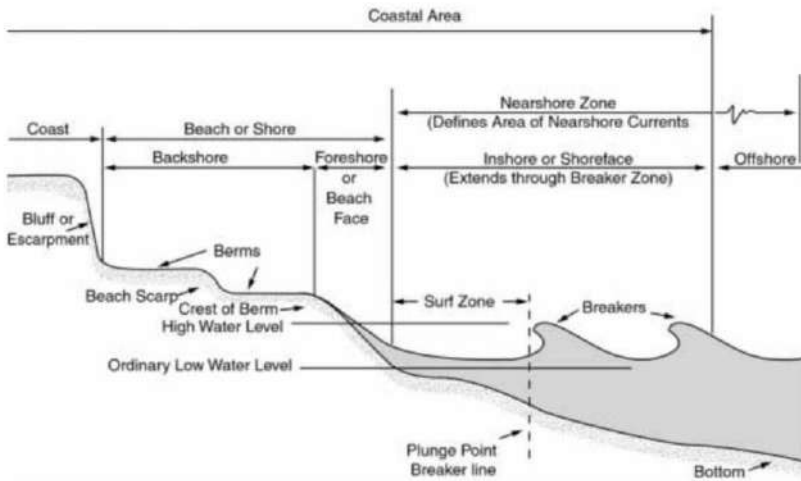
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Teknik Pantai

Teknik pantai adalah bidang multidisipliner yang berfokus pada perlindungan, pengelolaan, dan pemulihan wilayah pesisir dari ancaman erosi, banjir, dan perubahan iklim, dengan mengintegrasikan aspek fisik, lingkungan, sosial, dan teknologi mutakhir (Splinter, 2020; Tschirky, 2020; Neelamani, 2021; Turner *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2025).

Teknik pantai mencakup perencanaan, perancangan, pembangunan, dan pengelolaan infrastruktur di zona pesisir untuk melindungi aset dan masyarakat dari erosi pantai, banjir, serta dampak bencana laut. Dalam dekade terakhir, penekanan besar diberikan pada ketahanan (*resilience*) dan adaptasi terhadap perubahan lingkungan, serta perlunya pendekatan lintas disiplin dalam pengelolaan pesisir (Splinter, 2020; Tschirky, 2020; Neelamani, 2021; Zhou *et al.*, 2025).

1. **Resilience:** Kemampuan sistem pesisir (alam maupun buatan) untuk pulih dari gangguan ekstrem seperti badai atau kenaikan muka air laut (Tschirky, 2020; Zhou *et al.*, 2025).
2. **Adaptasi:** Penyesuaian desain dan manajemen pantai agar tetap efektif menghadapi ketidakpastian perubahan iklim dan dinamika pesisir (Tschirky, 2020; Neelamani, 2021).

Salah satu aspek penting dalam studi teknik pantai adalah memahami struktur zona-zona di pantai, termasuk proses gelombang, arus, sedimentasi, dan faktor lain yang mempengaruhi kejadian di kawasan pesisir. Gambar 1. 1. Memberikan gambaran tentang berbagai zona dan elemen yang membentuk lingkungan pesisir dan laut, sebagai dasar awal dalam kajian teknik pantai.



Gambar 1.1. Definisi Zona pantai dan Laut (Dean and Dalrymple, 2001)

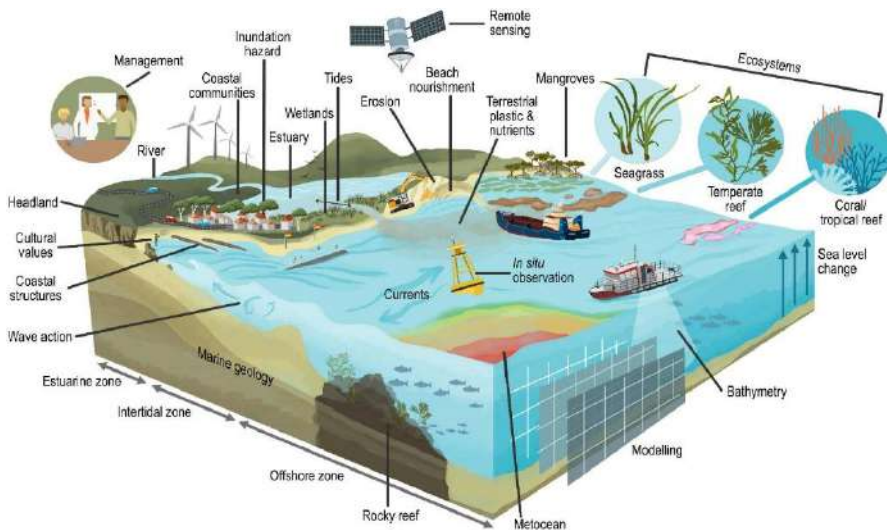
Ruang Lingkup Teknik Pantai, meliputi :

1. Analisis Proses Fisik Pesisir
 - a. Studi tentang gelombang, arus, pasang surut, dan transportasi sedimen yang memengaruhi morfologi pantai (Splinter, 2020; Turner *et al.*, 2021).
 - b. Penggunaan model numerik dan data satelit untuk memantau perubahan garis pantai dan prediksi dampak bencana (Turner et al., 2021; Zhou et al., 2025).
2. Perancangan dan Konstruksi Struktur Pantai
 - a. Desain dan pembangunan struktur keras (seperti seawall, breakwater, groin) untuk perlindungan pantai (Splinter, 2020; Tschirky, 2020).
 - b. Pendekatan lunak seperti *beach nourishment* dan *living shoreline* untuk meningkatkan ketahanan ekosistem dan mengurangi dampak lingkungan (Tschirky, 2020).
3. Manajemen dan Restorasi Pantai
 - a. Pengelolaan zona pesisir untuk adaptasi terhadap perubahan iklim, kenaikan muka air laut, dan bencana (Tschirky, 2020; Neelamani, 2021; Zhou et al., 2025).
 - b. Restorasi ekosistem pesisir untuk meningkatkan fungsi lingkungan dan sosial (Tschirky, 2020; Zhou et al., 2025).

4. Pemodelan, Survei, dan Teknologi
 - a. Pemanfaatan citra satelit, survei lapangan, dan model numerik untuk prediksi dan mitigasi risiko pesisir (Turner et al., 2021; Zhou et al., 2025).
 - b. Inovasi teknologi seperti *remote sensing*, *artificial intelligence*, dan integrasi data spasial untuk pemantauan dan perencanaan adaptif (Turner et al., 2021).
5. Aspek Lingkungan dan Sosial
 - a. Evaluasi dampak ekologis, sosial, dan ekonomi dari intervensi teknik pantai (Splinter, 2020; Tschirky, 2020; Zhou et al., 2025).
 - b. Keterlibatan masyarakat dan pemangku kepentingan dalam perencanaan dan implementasi (Tschirky, 2020; Zhou et al., 2025).
6. Manajemen Siklus Hidup Proyek

Pendekatan manajemen siklus hidup proyek mulai dari perencanaan, desain, konstruksi, hingga evaluasi pasca-proyek untuk memastikan keberlanjutan dan efektivitas jangka panjang (Zhou et al., 2025).

Dalam pengelolaan dan pembangunan wilayah pesisir, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai struktur fisik, ekosistem, serta dinamika alami yang terjadi di kawasan pantai dan laut. Oleh karena itu, pengkajian secara komprehensif terhadap berbagai aspek tersebut menjadi sangat penting dalam rangka merancang solusi teknik yang efektif serta berkelanjutan. Gambar 1.2. ini menunjukkan berbagai elemen dan proses yang terjadi di lingkungan pesisir dan laut yang menjadi dasar penting dalam studi teknik pantai.



Gambar 1.2. Skematisasi pengelolaan struktur dan ekosistem laut (Power *et al.*, 2021)

1.2 Pentingnya Pengelolaan Wilayah Pesisir

Wilayah pesisir merupakan zona transisi antara darat dan laut yang memiliki fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi yang sangat strategis. Kawasan ini menjadi pusat aktivitas manusia seperti permukiman, industri, pariwisata, perikanan, transportasi laut, serta pelabuhan. Oleh karena itu, pengelolaan wilayah pesisir yang baik menjadi kunci untuk mewujudkan pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) di daerah pantai (Kay and Alder, 2021).

Secara ekologis, wilayah pesisir berperan sebagai penyangga lingkungan. Ekosistem mangrove, terumbu karang, dan padang lamun berfungsi melindungi pantai dari abrasi, meredam energi gelombang, serta menjaga kualitas air. Kerusakan ekosistem pesisir akan berdampak langsung pada degradasi lingkungan dan hilangnya keanekaragaman hayati laut (D M Alongi, 2020).

Dari aspek ekonomi, pesisir menyumbang kontribusi signifikan terhadap pendapatan masyarakat dan negara. Sektor perikanan tangkap, budidaya laut, transportasi, hingga wisata bahari menjadikan wilayah ini sebagai pusat pertumbuhan ekonomi. Namun, tekanan pembangunan yang tidak terkendali dapat

menimbulkan konflik pemanfaatan ruang, pencemaran, dan bencana lingkungan (Cicin-Sain and Belfiore, 2019).

Sementara itu, dari perspektif sosial dan budaya, masyarakat pesisir memiliki kearifan lokal dalam mengelola sumber daya laut yang diwariskan secara turun-temurun. Kearifan ini penting untuk diintegrasikan dalam perencanaan modern agar pengelolaan lebih adaptif dan partisipatif (Armitage, Charles and Berkes, 2017).

Dengan demikian, pengelolaan wilayah pesisir harus dilakukan secara integratif, berkelanjutan, dan berbasis masyarakat, serta memperhatikan aspek ekologi, ekonomi, sosial, dan kelembagaan. Pendekatan ini dikenal sebagai *Integrated Coastal Zone Management* (ICZM), yang menjadi standar internasional dalam pengelolaan pesisir ((UNEP), 2021).

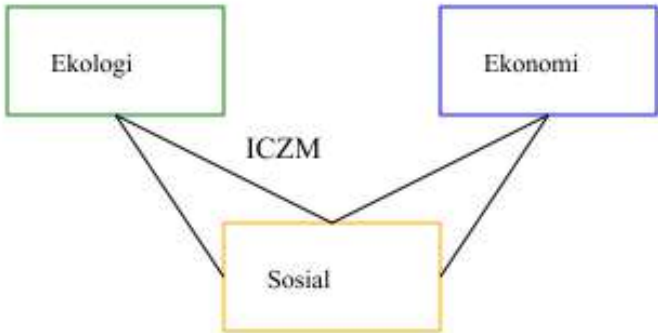
Kompleksitas permasalahan di wilayah pesisir menuntut adanya pengelolaan yang terintegrasi dan berkelanjutan agar fungsi ekologis, ekonomi, dan sosial dapat berjalan secara seimbang. Untuk memperjelas urgensi tersebut, Tabel 1.1 disusun sebagai ringkasan yang menampilkan aspek-aspek utama pentingnya pengelolaan wilayah pesisir, mulai dari peran ekologis, kontribusi ekonomi, hingga nilai sosial dan budaya yang melekat. Ringkasan ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai alasan mendasar mengapa pengelolaan wilayah pesisir menjadi agenda prioritas dalam pembangunan berkelanjutan.

Tabel 1.1. Ringkasan Pentingnya Pengelolaan Wilayah Pesisir

Aspek	Pentingnya Pengelolaan	Contoh Dampak Jika Tidak Dikelola
Ekologis	Menjaga kelestarian ekosistem (mangrove, karang, lamun)	Abrasi, banjir rob, hilangnya habitat biota
Ekonomi	Mendukung perikanan, pariwisata, transportasi, industri	Penurunan pendapatan, kerusakan infrastruktur pesisir
Sosial-Budaya	Melestarikan kearifan lokal dan kesejahteraan masyarakat	Konflik sosial, hilangnya tradisi lokal

Aspek	Pentingnya Pengelolaan	Contoh Dampak Jika Tidak Dikelola
Tata Ruang	Mengurangi konflik pemanfaatan ruang dan bencana pesisir	Overlap penggunaan lahan, kerugian akibat bencana
Keamanan & Ketahanan	Benteng pertahanan dari bencana laut & perubahan iklim	Kerentanan tinggi terhadap tsunami, sea level rise

Ekosistem pesisir tidak hanya berperan menjaga keseimbangan lingkungan, tetapi juga menjadi penopang utama aktivitas ekonomi masyarakat sekaligus ruang interaksi sosial-budaya. Kompleksitas ini menuntut pendekatan pengelolaan yang terintegrasi agar pemanfaatan sumber daya tidak merusak keberlanjutan ekosistem maupun kesejahteraan masyarakat. Gambar 1.3 menampilkan skema interaksi ekologi, ekonomi, dan sosial dalam kerangka ICZM, memperlihatkan bagaimana ketiga dimensi saling terhubung dan memengaruhi, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang adaptif, partisipatif, dan berkelanjutan.



Gambar 1.3. Skema interaksi ekologi, ekonomi, dan sosial dalam ICZM

1.3 Permasalahan Pantai di Indonesia dan Global

Permasalahan pantai di Indonesia dan dunia semakin kompleks dalam dekade terakhir, meliputi polusi, perubahan garis

pantai, degradasi ekosistem, perubahan iklim, serta tantangan sosial-ekonomi masyarakat pesisir.

Permasalahan Pantai di Indonesia

1. Polusi dan Sampah Laut

Indonesia menghadapi polusi berat di perairan pesisir, terutama dari limbah domestik, industri, dan pertanian. Studi menunjukkan 82% sampel melebihi ambang batas nutrisi, 54% logam berat, dan 50% polutan organik, dengan terumbu karang sebagai ekosistem paling sensitif (Adyasari *et al.*, 2021). Sampah plastik menjadi masalah utama, terutama di komunitas pesisir terpencil yang minim layanan pengelolaan sampah, sehingga ekosistem dan mata pencaharian masyarakat sangat terdampak (Purba *et al.*, 2019; Phelan *et al.*, 2020; Al., 2025).

2. Perubahan Garis Pantai dan Abrasi

Dalam 28 tahun terakhir, garis pantai alami Indonesia berkurang 5.995 km, digantikan garis pantai buatan akibat pembangunan dan konversi lahan, terutama mangrove untuk tambak. Pulau Kalimantan dan Sumatera Selatan mengalami perubahan terbesar, didorong oleh pertumbuhan penduduk (Sui *et al.*, 2020). Di Jawa Barat, abrasi laut sangat parah (Arjasakusuma *et al.*, 2021).

3. Kehilangan Ekosistem Mangrove dan Blue Carbon

Indonesia telah kehilangan sekitar 40% hutan mangrove, terutama akibat konversi untuk tambak dan pembangunan. Hal ini berdampak pada penurunan cadangan karbon biru dan perlindungan pesisir (Sejati *et al.*, 2020; Sui *et al.*, 2020; Rivera-Monroy *et al.*, 2022; Sidik *et al.*, 2023). Industri dan perubahan tata guna lahan juga mengurangi penyimpanan karbon pesisir lebih dari 20% (Sejati *et al.*, 2020).

4. Dampak Perubahan Iklim

Kenaikan suhu dan permukaan laut menyebabkan bleaching terumbu karang, penurunan populasi ikan, serta peningkatan frekuensi badai dan abrasi, mengancam ekosistem dan penghidupan masyarakat pesisir (Nurhidayah, 2019; Ningsih and Mutaqin, 2023; Ahmady and Rahman, 2024).

5. *Overfishing* dan Degradasi Sumber Daya

Penangkapan ikan berlebih menyebabkan kerusakan ekosistem dan menurunkan produktivitas pesisir. Permasalahan hukum dan lemahnya pengawasan memperparah situasi (Basri, 2021; Roisah *et al.*, 2023).

6. Tantangan Sosial-Ekonomi

Masyarakat pesisir umumnya miskin, kurang keterampilan alternatif, dan rentan terhadap dampak lingkungan. Program pemberdayaan belum optimal karena faktor budaya dan sosial (Alfian and Mardiana, 2024; Tarigan and Ferdinanto, 2024).

Permasalahan Pantai Global

1. Polusi plastik dan limbah: Masalah global yang mengancam biota laut dan rantai makanan (Purba *et al.*, 2019; Phelan *et al.*, 2020).
2. Perubahan iklim dan kenaikan muka laut: Menyebabkan abrasi, banjir, dan hilangnya lahan pesisir di banyak negara (Nurhidayah, 2019; Ningsih and Mutaqin, 2023; Ahmady and Rahman, 2024).
3. Degradasi ekosistem dan *overfishing*: Terjadi di banyak negara pesisir, baik berkembang maupun maju (Supriharyono, 2013; Roisah *et al.*, 2023).

Rangkuman berbagai isu pesisir dalam dekade terakhir, menunjukkan bahwa permasalahan pesisir tidak hanya bersifat lokal, tetapi juga terkait erat dengan dinamika lingkungan internasional, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang lebih terintegrasi. Ditunjukkan pada tabel 1.2.

Tabel 1.2. Permasalahan Pantai Indonesia dan Global (2014–2024)

Permasalahan	Indonesia (2014– 2024)	Global (2014– 2024)	Sumber
Polusi plastik	Sangat tinggi, krisis ekosistem	Tinggi, masalah lintas negara	(Purba <i>et al.</i> , 2019; Phelan <i>et al.</i> , 2020; Adyasari <i>et al.</i> , 2021; Al., 2025)
Abrasi/erosi	Parah di pulau besar, mangrove	Umum di negara pesisir	(Nurhidayah, 2019; Sui <i>et al.</i> , 2020; Arjasakusuma <i>et al.</i> , 2021; Ningsih and Mutaqin, 2023)
Kehilangan mangrove	40% hilang, blue carbon turun	Umum di tropis	(Sejati <i>et al.</i> , 2020; Sui <i>et al.</i> , 2020; Rivera-Monroy <i>et al.</i> , 2022; Sidik <i>et al.</i> , 2023)
Perubahan iklim	Dampak nyata, banjir & bleaching	Dampak global	(Nurhidayah, 2019; Ningsih and Mutaqin, 2023; Ahmady and Rahman, 2024)
Overfishing	Masalah hukum & ekologi	Masalah global	(Roisah <i>et al.</i> , 2023); (Basri, 2021)
Kemiskinan pesisir	Tinggi, rentan perubahan	Umum di negara berkembang	(Alfian and Mardiana., 2024; Tarigan and Ferdinanto, 2024)

1.4 Prinsip-prinsip Pengelolaan Pantai Terpadu (ICM)

Pengelolaan Pantai Terpadu atau *Integrated Coastal Management* (ICM) adalah suatu pendekatan sistematis, interdisipliner, dan partisipatif untuk mengelola wilayah pantai yang kompleks, dinamis, serta sarat kepentingan. ICM bertujuan mengharmonisasikan pemanfaatan sumber daya pesisir dengan upaya konservasi lingkungan, sekaligus menjawab tantangan perubahan iklim, urbanisasi, degradasi ekosistem, dan konflik kepentingan antar-sektor. (Cicin-Sain and Knecht, 1998; Olsen, Lowry and Tobey, 2021). Gambar 1.4 menampilkan diagram

prinsip ICM yang menjadi kerangka dasar dalam merancang strategi pengelolaan pesisir yang komprehensif.



Gambar 1.4. Diagram Prinsip ICM

Prinsip-prinsip utama ICM meliputi :

1. Prinsip Keterpaduan (*Integration*)

- Integrasi horizontal: koordinasi antar-sektor (perikanan, pariwisata, transportasi laut, industri).
- Integrasi vertikal: sinergi kebijakan pusat–provinsi–kabupaten/kota.
- Integrasi lintas dimensi: ekologi, ekonomi, sosial, budaya, dan hukum.

2. Prinsip Pendekatan Ekosistem (*Ecosystem-based Approach*)

Menempatkan ekosistem sebagai pusat pengelolaan, menjaga daya dukung dan daya tampung lingkungan, serta menerapkan *nature-based solutions* seperti restorasi mangrove. (Daniel M Alongi, 2020)

3. Prinsip Partisipasi dan Inklusivitas (*Participation and Inclusiveness*)
Melibatkan pemerintah, swasta, masyarakat lokal, dan akademisi. Contoh: *community-based coastal management* di Bali dan Sulawesi. (Adrianto, Bengen and Knight, 2019)
4. Prinsip Berbasis Ilmu Pengetahuan (*Science-based Management*)
Menggunakan data ilmiah, GIS, penginderaan jauh, dan kajian teknis untuk dasar kebijakan berbasis bukti. (Tanaka and Glavovic, 2019)
5. Prinsip Keadilan dan Keberlanjutan (*Equity and Sustainability*)
Menjamin distribusi manfaat yang adil, menjaga kelestarian sumber daya, sejalan dengan SDGs 14 dan 10. (Programme, 2020)
6. Prinsip Fleksibilitas dan Adaptasi (*Flexibility and Adaptiveness*)
Mengelola dinamika pantai yang rentan perubahan iklim dengan adaptive management dan mitigasi berbasis ekosistem. (Kittinger *et al.*, 2021)
7. Prinsip Koordinasi Kelembagaan (*Institutional Coordination*)
Membutuhkan tata kelola kelembagaan yang jelas, forum koordinasi lintas-sektor, dan regulasi yang tegas. (Christie *et al.*, 2017)
8. Prinsip Akuntabilitas dan Transparansi (*Accountability and Transparency*)
Setiap program pesisir harus akuntabel dan transparan dalam anggaran serta hasil evaluasi. (Bennett, 2018)
9. Prinsip Pencegahan dan Kehati-hatian (*Precautionary Principle*)
Menerapkan prinsip kehati-hatian pada proyek berisiko tinggi, misalnya reklamasi pantai yang harus melalui kajian strategis. (Dahuri, 2020)

DAFTAR PUSTAKA

- (UNEP), U.N.E.P. (2021) *Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Guidelines*.
- Adrianto, L., Bengen, D.G. and Knight, M. (2019) 'Community-based coastal resource management in Indonesia: Achievements and lessons', *Marine Policy*, 108, p. 103612.
- Adyasari, D. *et al.* (2021) 'Anthropogenic impact on Indonesian coastal water and ecosystems: Current status and future opportunities.', *Marine pollution bulletin*, 171, p. 112689. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112689>.
- Ahmady, N.N. and Rahman, I. (2024) 'Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ekosistem Pesisir Dipantai Pangandaran', *WISSEN : Jurnal Ilmu Sosial dan Humaniora* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.62383/wissen.v3i1.483>.
- Al, T.E. (2025) 'Sustainable Tourism as the Management Option for Litter Problems in Tasik and Leuweung Sancang Garut Coastal Areas, Indonesia', *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.403385>.
- Alfian, L.M. and Mardiana. (2024) 'Mengurai Tantangan Dalam Mewujudkan Masyarakat Pesisir yang Tangguh', *RESIPROKAL: Jurnal Riset Sosiologi Progresif Aktual* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.29303/resiprokal.v6i1.403>.
- Alongi, Daniel M (2020) 'Coastal ecosystem-based management with mangroves', *Ocean & Coastal Management*, 193, p. 105230.
- Alongi, D M (2020) *The Energetics of Mangrove Forests*. Springer.
- Arjasakusuma, S. *et al.* (2021) 'Shoreline Dynamics in East Java Province, Indonesia, from 2000 to 2019 Using Multi-Sensor Remote Sensing Data', *Land* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3390/LAND10020100>.
- Armitage, D., Charles, A. and Berkes, F. (2017) *Governing the coastal commons: Communities, resilience and transformation*. Routledge.
- Basri, H. (2021) 'Pengelolaan, Pengawasan Kawasan Pesisir dan Laut di Indonesia', *REUSAM: Jurnal Ilmu Hukum* [Preprint].

- Available at: <https://doi.org/10.29103/reusam.v8i2.3713>.
- Bennett, N.J. (2018) 'Navigating a just and inclusive path towards sustainable oceans', *Marine Policy*, 97, pp. 139–146.
- Christie, P. *et al.* (2017) 'Institutional contexts and sustainability of integrated coastal management projects', *Ocean & Coastal Management*, 138, pp. 38–48.
- Cicin-Sain, B. and Belfiore, S. (2019) 'Linking marine protected areas to integrated coastal and ocean management: A review of theory and practice', *Ocean & Coastal Management*, 43(3), pp. 287–295.
- Cicin-Sain, B. and Knecht, R. (1998) 'Integrated Coastal and Ocean Management: Concepts And Practices'. Available at: <https://consensus.app/papers/integrated-coastal-and-ocean-management-concepts-and-cicin-sain-knecht/dd044aa9eebc59daa6b6b093142b4f62/>.
- Dahuri, R. (2020) 'Coastal reclamation and its ecological and socio-economic implications in Indonesia', *Journal of Coastal Zone Management*, 23(2), pp. 55–64.
- Dean, R. and Dalrymple, R. (2001) 'Coastal Processes with Engineering Applications'. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754500>.
- Kay, R. and Alder, J. (2021) *Coastal Planning and Management*. CRC Press.
- Kittinger, J.N. *et al.* (2021) 'Emerging frontiers in social-ecological systems research for sustainability of small-scale fisheries', *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 49, pp. 1–9.
- Neelamani, S. (2021) 'Discussion Article on Coastal Engineering-Problems, Research Directions and Needs of Cooperation', pp. 35–38. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4324-5_3.
- Ningsih, R.L. and Mutaqin, B. (2023) 'Multi-hazard assessment under climate change in the aerotropolis coastal city of Kulon Progo, Yogyakarta – Indonesia', *Journal of Coastal Conservation* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11852-023-01015-0>.
- Nurhidayah, L. (2019) 'Climate Change Adaptation: Challenges in Addressing Sea Level Rise in Indonesia'. Available at:

- <https://consensus.app/papers/climate-change-adaptation-challenges-in-addressing-sea-nurhidayah/cc00709001e15d19a5d4949f4480f451/>.
- Olsen, S.B., Lowry, K. and Tobey, J. (2021) 'The evolution of coastal management in response to climate change', *Annual Review of Environment and Resources*, 46, pp. 369–395.
- Phelan, A. *et al.* (2020) 'Ocean plastic crisis—Mental models of plastic pollution from remote Indonesian coastal communities', *PLoS ONE*, 15. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236149>.
- Power, H.E. *et al.* (2021) 'Research Priorities for Coastal Geoscience and Engineering: A Collaborative Exercise in Priority Setting From Australia', *Frontiers in Marine Science*, 8(April). Available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.645797>.
- Programme, U.N.D. (2020) *Sustainable Development Goals Report 2020*. United Nations.
- Purba, N. *et al.* (2019) 'Marine debris in Indonesia: A review of research and status.', *Marine pollution bulletin*, 146, pp. 134–144. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.05.057>.
- Rivera-Monroy, H. *et al.* (2022) 'Challenges and Strategies for Sustainable Mangrove Management in Indonesia: A Review', *Forests* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3390/f13050695>.
- Roisah, K. *et al.* (2023) 'Legal Development in the Overcoming Overfishing in Indonesian Coastal Areas', *Journal of Indonesian Legal Studies* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.15294/jils.v8i2.69358>.
- Sejati, A. *et al.* (2020) 'Quantifying the impact of industrialization on blue carbon storage in the coastal area of Metropolitan Semarang, Indonesia', *Applied Geography* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102319>.
- Sidik, F. *et al.* (2023) 'Blue carbon: A new paradigm of mangrove conservation and management in Indonesia', *Marine Policy* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105388>.
- Splinter, K. (2020) 'Coastal Engineering: Processes, Theory, and

- Design Practice, 3rd edition', *Journal of Coastal Research*, 36, p. 676. Available at: <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19a-00014.1>.
- Sui, L. *et al.* (2020) 'Spatial-Temporal Characteristics of Coastline Changes in Indonesia from 1990 to 2018', *Sustainability* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12083242>.
- Supriharyono (2013) 'The Problems Of Coastal And Marine Resources Management In Indonesia', *Journal of Coastal Zone Management*, 4, pp. 41–49. Available at: <https://consensus.app/papers/the-problems-of-coastal-and-marine-resources-management-in-supriharyono/06009d58cb5f5ab181fa9cc25dea2207/>.
- Tanaka, H. and Glavovic, B. (2019) 'Science-policy integration for coastal risk management', *Environmental Science & Policy*, 94, pp. 150–157.
- Tarigan, M.I. and Ferdinanto, T. (2024) 'Strong Sustainability and Ocean Justice: Fostering Coastal Community Well-Being in Indonesia', *Arena Hukum* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.arenahukum2024.01703.5>.
- Tschirky, P. (2020) 'Coastal Resiliency Approaches', *Coastal Engineering Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.33>.
- Turner, I. *et al.* (2021) 'Satellite optical imagery in Coastal Engineering', *Coastal Engineering*, 167, p. 103919. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2021.103919>.
- Zhou, Y. *et al.* (2025) 'A whole process resilience management practice in coastal engineering', *Frontiers in Marine Science* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1518249>.

BAB 2

HIDRODINAMIKA PANTAI

2.1 Teori Gelombang

Gelombang laut merupakan fenomena osilasi pada permukaan air akibat adanya gaya pembangkit, seperti angin, perbedaan densitas, maupun pasang surut. Pemodelan gelombang diperlukan untuk memahami karakteristik perambatan, distribusi tekanan, kecepatan partikel, serta energi gelombang. Seiring perkembangan ilmu hidrodinamika, berbagai pendekatan matematis dikembangkan untuk menggambarkan perilaku gelombang sesuai dengan kondisi kedalaman, amplitudo, maupun panjang gelombang. Tiga teori gelombang yang paling umum digunakan adalah gelombang linier, gelombang Stokes, **dan** gelombang Cnoidal.

2.1.1 Gelombang Linier (*Airy Wave Theory*)

Teori gelombang linier atau teori Airy merupakan pendekatan paling sederhana untuk menggambarkan gerakan gelombang. Asumsi utamanya adalah bahwa gelombang memiliki amplitudo kecil dibandingkan dengan panjang gelombangnya, sehingga gerakan fluida dapat dianggap linier.

Beberapa ciri utama teori Airy:

1. Permukaan bebas gelombang berbentuk sinusoidal.
2. Distribusi kecepatan partikel fluida dapat dijelaskan dengan fungsi harmonik.
3. Tekanan di bawah permukaan berkurang secara eksponensial seiring bertambahnya kedalaman.
4. Berlaku baik pada kondisi gelombang kecil hingga sedang dan kedalaman air dalam maupun transisi.

Persamaan Gelombang, sebagai berikut :

Dispersion relation:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.1)$$

Profil permukaan:

$$\eta(x, t) = a \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

dengan:

- a = amplitudo gelombang (m)
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ bilangan gelombang
- $\omega = \frac{2\pi}{T}$ = frekuensi sudut
- x = arah propagasi gelombang
- t = waktu

Kelebihannya terletak pada kesederhanaan dan kemudahan dalam analisis. Namun, untuk gelombang besar dengan amplitudo signifikan, teori ini kurang akurat. (Mei, Stiassnie and Yue, 2018; Dean and Dalrymple, 2021)

2.1.2 Gelombang Stokes

Teori gelombang Stokes dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan teori linier dengan memasukkan pengaruh **non-linieritas** akibat amplitudo gelombang yang lebih besar. Dalam teori ini, permukaan bebas gelombang tidak lagi berbentuk sinus murni, melainkan ditambahkan komponen harmonik tingkat lebih tinggi.

Karakteristik teori Stokes:

1. Digunakan pada **air dalam hingga intermediate**.
2. Amplitudo gelombang dianggap cukup besar sehingga memengaruhi bentuk profil gelombang.
3. Profil gelombang menjadi lebih tajam di puncak (*crest*) dan lebih landai di lembah (*trough*).
4. Perhitungan melibatkan deret harmonik, dengan pendekatan orde kedua, ketiga, atau lebih tergantung tingkat ketelitian yang diinginkan.

Rumus dasar (Stokes orde 2 untuk elevasi permukaan):

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} ka^2 \cos(2kx - 2\omega t) \quad (2.3)$$

Teori Stokes lebih realistis dibandingkan teori Airy untuk gelombang menengah hingga besar, terutama dalam analisis gaya gelombang terhadap struktur lepas pantai. (Fenton, 2015; Chanson, 2019).

2.1.3 Gelombang Cnoidal

Teori gelombang Cnoidal diperkenalkan oleh Korteweg dan de Vries (KdV) untuk menggambarkan gelombang **non-linier** pada perairan dangkal. Istilah *cnoidal* berasal dari fungsi *Jacobi elliptic cosine* (*cn*) yang digunakan dalam formulasi matematisnya.

Ciri utama gelombang cnoidal:

1. Digunakan pada **air dangkal** (kedalaman kecil dibanding panjang gelombang).
2. Amplitudo gelombang relatif besar, sehingga bentuk permukaannya sangat non-sinusoidal.
3. Puncak gelombang lebih runcing dan lembahnya relatif datar.
4. Kecepatan partikel fluida lebih signifikan dekat permukaan dan sepanjang kolom air.

Persamaan Gelombang, permukaan bebas gelombang dinyatakan dengan fungsi eliptik Jacobi:

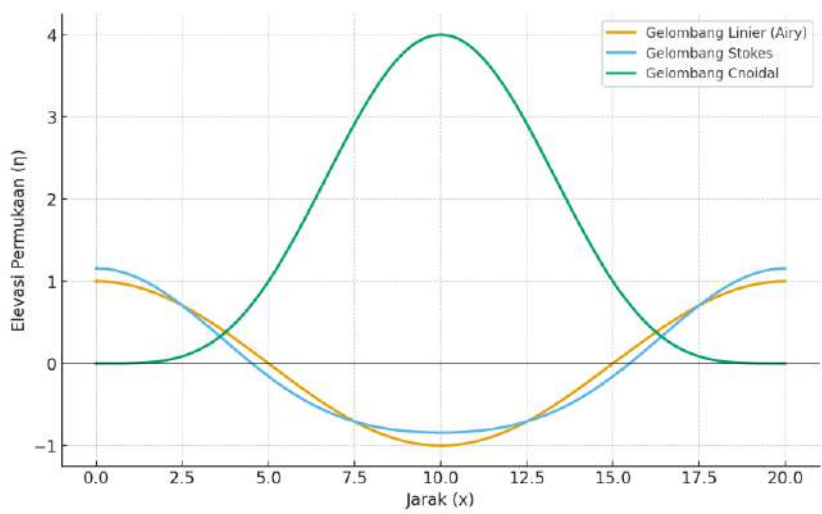
$$\eta(x, t) = \eta_0 + H \operatorname{cn}^2\left(\frac{2K(m)}{L}(x - ct), m\right) \quad (2.4)$$

dengan:

- H = tinggi gelombang
- L = panjang gelombang
- c = kecepatan rambat gelombang
- $\operatorname{cn}(u, m)$ = fungsi eliptik Jacobi
- $K(m)$ = integral eliptik lengkap orde pertama
- m = parameter eliptik ($0 < m < 1$)

Gelombang cnoidal berlaku untuk gelombang panjang di perairan dangkal dan dijelaskan secara matematis dengan fungsi eliptik Jacobi. Profil gelombang ditunjukkan menggunakan aproksimasi Fourier yang meniru bentuk crest yang lebih tajam dan trough yang lebih datar. Kecepatan rambat pada perairan dangkal dengan koreksi nonlinier lemah dapat diperkirakan $c = \sqrt{gh} \cdot \left(1 + \frac{H}{3h}\right)$ dan panjang gelombang $L \approx cT$. (Holthuijsen, 2017; Sriram, Ma and Lin, 2020).

Perbandingan teori gelombang ditunjukkan pada gambar 2.1. dan tabel 2.1.



Gambar 2.1. Perbandingan bentuk gelombang; Airy vs Stokes vs Cnoidal

Perbedaan ketiganya terlihat pada bentuk elevasi permukaan air di sepanjang jarak propagasi (x), di mana teori Airy menunjukkan bentuk sinusoidal yang simetris, teori Stokes menggambarkan gelombang dengan puncak lebih tajam dan lembah lebih landai, sedangkan teori cnoidal menampilkan bentuk nonlinier kuat dengan crest tinggi dan trough yang relatif datar—umumnya terjadi pada perairan dangkal.

Tabel 2.1. Perbandingan teori gelombang

Teori Gelombang	Kondisi Perairan	Amplitudo Gelombang	Bentuk Gelombang	Aplikasi Utama
Linier (Airy)	Dalam – Transisi	Kecil ($a \leq \lambda$)	Sinusoidal	Gelombang kecil – analisis dasar
Stokes	Dalam – Transisi	Sedang – Besar	Puncak tajam, lembah landai	Struktur lepas pantai, gelombang menengah-besar
Cnoidal	Dangkal	Besar	Puncak runcing, lembah datar	Gelombang pantai, tsunami, pasang surut

2.2 Karakteristik Gelombang

Gelombang laut merupakan salah satu fenomena hidrodinamika utama yang berperan besar dalam pembentukan garis pantai, perencanaan struktur pantai, serta pengelolaan wilayah pesisir. Gelombang terbentuk akibat interaksi angin dengan permukaan laut, kemudian dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan kondisi morfologi dasar perairan. Pemahaman karakteristik gelombang sangat penting karena menentukan besarnya energi yang dibawa gelombang, potensi erosi, serta dampaknya terhadap bangunan pantai (Sriram, Ma and Zang, 2016; Ahsan, Rahman and Hasan, 2020).

Empat parameter dasar yang digunakan untuk menggambarkan sifat gelombang adalah tinggi gelombang (H), panjang gelombang (L), periode gelombang (T), dan kecepatan rambat (*celerity*, C).

2.2.1 Tinggi Gelombang

Tinggi gelombang adalah jarak vertikal antara puncak (*crest*) dan lembah (*trough*). Dalam praktik, tinggi gelombang biasanya dinyatakan dalam beberapa bentuk:

1. H : tinggi gelombang individual.

2. H_s : tinggi gelombang signifikan, yaitu rata-rata sepertiga gelombang tertinggi.
3. H_{max} : tinggi gelombang maksimum dalam satu periode pengamatan.

Energi gelombang sebanding dengan kuadrat tinggi gelombang, sehingga peningkatan kecil pada nilai H dapat menghasilkan peningkatan energi yang signifikan (Kumar, Johnson and Jensen, 2018).

2.2.2 Panjang Gelombang

Panjang gelombang adalah jarak horizontal antara dua puncak atau dua lembah gelombang berturut-turut. Nilai L dipengaruhi oleh periode gelombang dan kedalaman perairan.

1. Perairan dalam (deep water): $L = \frac{g.T^2}{2\pi}$ (2. 5)
2. Perairan dangkal (*shallow water*): panjang gelombang semakin memendek karena interaksi dengan dasar laut (Guo, Pan and Chen, 2018).

2.2.3 Periode Gelombang

Periode gelombang adalah waktu yang dibutuhkan oleh dua puncak berturut-turut untuk melewati satu titik tetap. Nilai T cenderung konstan saat gelombang menjalar, sehingga sering dijadikan acuan dalam analisis spektrum gelombang.

1. Gelombang berperiode panjang (*swell*) dapat menjalar ribuan kilometer dengan kehilangan energi yang relatif kecil.
2. Gelombang berperiode pendek (*sea waves*) biasanya bersifat lokal dan cepat teredam (Zhang, Li and Liu, 2021).

2.2.4 Kecepatan Rambat Gelombang

Kecepatan rambat atau *celerity* adalah kecepatan perambatan bentuk gelombang, dengan hubungan dasar :

$$C = \frac{L}{T} \quad (2. 6)$$

Laut dalam:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.7)$$

Perairan dangkal:

$$C = \sqrt{gh} \quad (2.8)$$

Keterangan:

C = kecepatan rambat gelombang (*wave celerity*), m/s

L = panjang gelombang (jarak antara dua puncak gelombang berturut-turut), m

T = periode gelombang (waktu antara dua puncak gelombang), s

h = kedalaman air

$g=9.81\text{m/s}^2$ = percepatan gravitasi

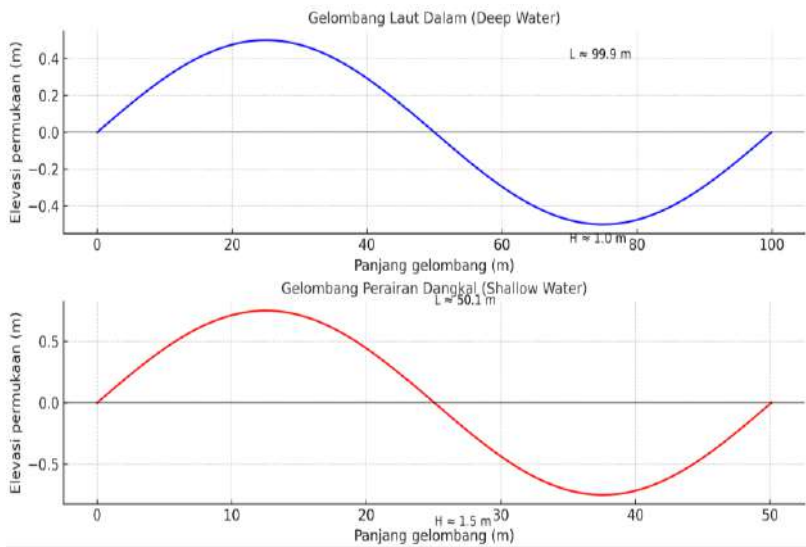
Penurunan kecepatan rambat di perairan dangkal menyebabkan peningkatan tinggi gelombang (*shoaling*) hingga akhirnya gelombang pecah di dekat pantai (Shi, Veeramony and Hsu, 2019). Perbandingan karakteristik gelombang di laut dalam dan perairan dangkal diperlihatkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perbandingan karakteristik gelombang di laut dalam dan perairan dangkal.

Parameter	Gelombang Laut Dalam ($h > 0,5 L$)	Gelombang Perairan Dangkal ($h < 1/20 L$)
Tinggi Gelombang (H)	Relatif stabil, energi menyebar	Meningkat karena shoaling sebelum pecah
Panjang Gelombang (L)	Ditentukan oleh periode & gravitasi	Memendek akibat interaksi dasar laut
Periode (T)	Konstan, tidak berubah	Tetap konstan menuju pantai
Kecepatan Rambat (C)	Tergantung periode	Tergantung kedalaman

Parameter	Gelombang Laut Dalam ($h > 0,5 L$)	Gelombang Perairan Dangkal ($h < 1/20 L$)
Bentuk Gelombang	Profil sinusoidal, crest & trough simetris	Crest tajam, trough mendatar, mudah pecah
Energi Gelombang	Tersebar di kolom air	Terkonsentrasi di permukaan, meningkat sebelum pecah
Arah Rambatan	Relatif lurus	Dipengaruhi refraksi & difraksi
Fenomena Khusus	Swell menjalar jauh	Shoaling, refraksi, breaking

Gambar 2.2, menunjukkan perbandingan profil gelombang antara laut dalam (*deep water*) dan perairan dangkal (*shallow water*).



Gambar 2.2. Profil gelombang laut perairan dalam dan perairan dangkal.

Pada laut dalam, panjang gelombang relatif besar dan crest serta trough cenderung simetris. Di perairan dangkal, panjang gelombang lebih pendek, tinggi gelombang meningkat, crest lebih

tajam, dan trough mendatar sehingga berpotensi pecah mendekati pantai.

2.3 Transformasi Gelombang

Gelombang laut yang merambat dari laut dalam menuju pantai mengalami perubahan karakteristik akibat interaksi dengan topografi dasar laut dan struktur pantai. Transformasi gelombang ini mencakup empat fenomena utama, yaitu refraksi, difraksi, refleksi, dan Gelombang Pecah. Pemahaman proses-proses tersebut sangat penting dalam perencanaan dan desain struktur pantai karena memengaruhi distribusi energi, pola arus, transport sedimen, serta kestabilan bangunan pantai ((USACE), 2015; Pullen *et al.*, 2018).

2.3.1 Refraksi

Refraksi terjadi ketika arah rambat gelombang berubah akibat variasi kecepatan fase di kedalaman berbeda. Gelombang cenderung melengkung mengikuti kontur *isobath*, menimbulkan konsentrasi energi di tanjung dan penyebaran di teluk (Dean and Dalrymple, 2022).

Rumus dasar :

$$\frac{\sin \theta}{c} = \text{konstan}, K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

θ_0 = sudut datang gelombang terhadap garis kontur di perairan dalam

θ = sudut gelombang di perairan dangkal

c_0 = kecepatan gelombang di perairan dalam (*deep-water wave celerity*)

c = kecepatan gelombang di kedalaman

K_r = koefisien refraksi gelombang

2.3.2 Difraksi

Difraksi adalah penyebaran energi gelombang ke daerah bayangan ketika gelombang melewati penghalang seperti breakwater atau celah sempit. Fenomena ini memungkinkan energi masuk ke area yang semula terlindung (Zhang, Li and Liu, 2020).

$$\text{Indeks difraksi : } H = K_d H_i \quad (2.10)$$

Keterangan :

H = tinggi gelombang di titik yang telah mengalami difraksi

H_i = tinggi gelombang datang (incident wave height)

K_d = indeks atau koefisien difraksi

2.3.3 Refleksi

Refleksi merupakan pemantulan sebagian energi gelombang akibat interaksi dengan pantai curam atau struktur keras. Tingkat refleksi dipengaruhi oleh sudut datang gelombang, kekasaran, dan kemiringan permukaan struktur (Lashley, van Dongeren and Reniers, 2019).

$$\text{Koefisien refleksi : } K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.11)$$

$$\text{Koefisien transmisi : } K_t = \frac{H_t}{H_i}, \quad (2.12)$$

$$K_r^2 + K_t^2 \leq 1 \quad (2.13)$$

Keterangan:

H_r = tinggi gelombang pantul (*reflected wave height*)

H_i = tinggi gelombang datang (incident wave height)

K_r = koefisien refleksi

H_t = tinggi gelombang yang diteruskan ke belakang struktur (*transmitted wave height*)

K_t = koefisien transmisi

2.3.4 Gelombang Pecah

Gelombang pecah terjadi ketika kecuraman gelombang melebihi batas kestabilan. Energi potensial gelombang runtuh menjadi energi turbulen, menimbulkan arus sejajar pantai (*longshore current*) dan arus balik (*rip current*) (Goda, 2021).

$$\text{Kriteria pecah : } \frac{H_b}{h_b} \approx 0.78 \quad (2.14)$$

$$\text{atau kriteria Miche : } \frac{H_b}{L_b} \leq 0.142 \tanh\left(\frac{2\pi h_b}{L_b}\right) \quad (2.15)$$

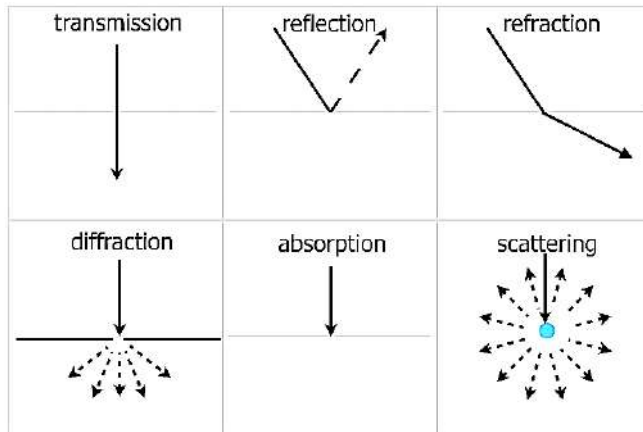
Keterangan:

H_b = tinggi gelombang saat pecah (*breaker wave height*)

h_b = kedalaman air saat pecah (*breaker depth*)

L_b = panjang gelombang pada kedalaman pecah (*breaker wavelength*)

Gambar 2.3. berikut menunjukkan berbagai mekanisme interaksi gelombang ketika bertemu dengan suatu penghalang atau batas media.



Gambar 2.3. Ilustrasi perilaku gelombang (Obaid and Al-rahim, 2020)

Proses-proses tersebut meliputi transmisi, refleksi, refraksi, difraksi, absorpsi, dan hamburan (*scattering*), yang masing-masing menggambarkan bagaimana energi gelombang dapat diteruskan, dipantulkan, dibelokkan, disebar, diserap, atau dihamburkan.

Tabel 2.3. berikut menyajikan berbagai fenomena transformasi gelombang yang umum terjadi di wilayah pantai beserta mekanisme utama, kondisi pemicu, dampak yang ditimbulkan, dan relevansinya dalam kajian teknik pantai. Fenomena refraksi, difraksi, refleksi, dan gelombang pecah dipertimbangkan dalam perancangan dan analisis struktur pantai, karena masing-masing memengaruhi distribusi energi gelombang, pola arus, serta proses erosi dan sedimentasi di kawasan pesisir.

Tabel 2.3. Ringkasan Perbedaan Fenomena

Fenomena	Mekanisme Utama	Kondisi Pemicu	Dampak Utama	Relevansi Teknik Pantai
Refraksi	Perubahan arah akibat variasi kecepatan fase	Perbedaan kedalaman	Konsentrasi energi di tanjung, penyebaran di teluk	Analisis erosi-akresi
Difraksi	Penyebaran energi ke daerah bayangan	Penghalang breakwater/celah	Energi masuk ke area terlindung	Desain pelabuhan
Refleksi	Pemantulan energi ke laut	Struktur keras, pantai curam	Resonansi, beban tambahan	Stabilitas struktur
Gelombang Pecah	Runtuhnya gelombang karena kecuraman	Kedalaman kritis	Arus pantai, transport sedimen	Prediksi zona energi maksimum

2.4 Pasang Surut

2.4.1 Konsep Dasar Pasang Surut

Pasang surut adalah fluktuasi periodik muka air laut akibat gaya gravitasi bulan dan matahari serta rotasi bumi. Fenomena ini sangat penting dalam perencanaan teknik pantai, termasuk navigasi kapal, desain pelabuhan, breakwater, serta mitigasi banjir rob (Pugh and Woodworth, 2014).

2.4.2 Jenis Pasang Surut

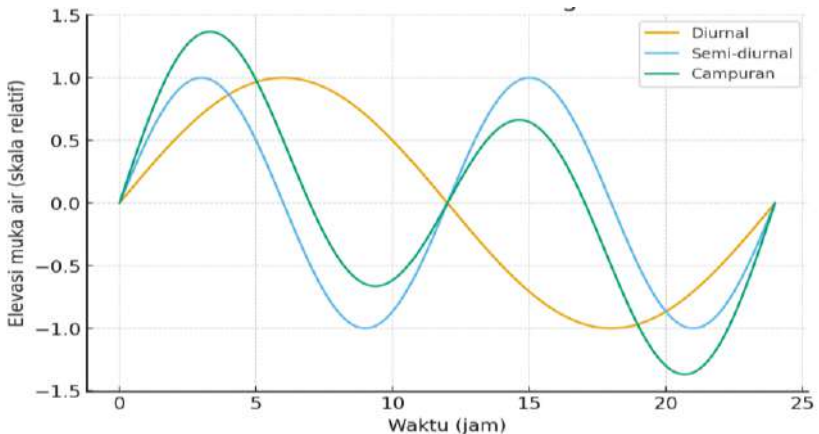
Jenis pasang surut dibedakan berdasarkan pola dalam 1 hari lunar (~24 jam 50 menit). Tabel 2.4, berikut menyajikan klasifikasi jenis-jenis pasang surut berdasarkan jumlah kejadian pasang dan surut dalam satu hari lunar, beserta ciri-ciri utama dan contoh lokasinya. Variasi pola pasang surut ini dipengaruhi oleh kombinasi gaya gravitasi bulan dan matahari serta kondisi geografis setempat, sehingga menghasilkan tipe semi-diurnal, diurnal, maupun campuran pada berbagai perairan di dunia.

Tabel 2.4. Jenis-jenis pasang surut dan karakteristiknya

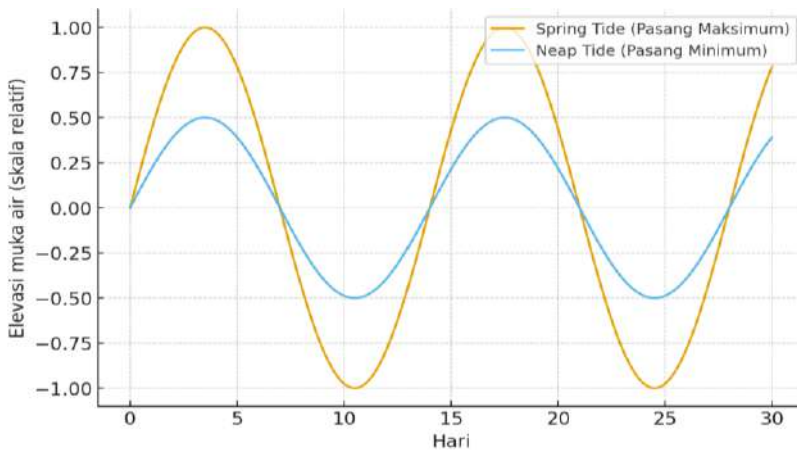
Jenis Pasang Surut	Pasang	Jumlah Pasang/Surut per Hari Lunar	Ciri Utama	Contoh Lokasi
Semi-diurnal		2 pasang, 2 surut	Tinggi relatif sama	Samudera Atlantik
Diurnal		1 pasang, 1 surut	Pola tunggal	Teluk Meksiko
Campuran semi	-	2 pasang, 2 surut	Tinggi berbeda	Laut Jawa
Campuran diurnal	-	1-2 pasang	Pasang dominan	Samudera Pasifik Timur

(Dronkers, 2017); (Triatmodjo, 2012)

Secara umum, dikenal tiga tipe utama pasang surut, yaitu diurnal, semi-diurnal, dan campuran, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2.4. Sementara itu, dalam skala waktu bulanan, terjadi variasi amplitudo pasang surut yang dikenal sebagai siklus spring dan neap tide, yang menggambarkan kondisi pasang tertinggi dan terendah akibat posisi relatif bumi, bulan, dan matahari. Pola ini dijelaskan pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.4. Pola pasang surut (diurnal, semi-diurnal, campuran).



Gambar 2.5. Siklus spring tide dan neap tide.

Gambar 2.4, menunjukkan pola pasang surut air laut berdasarkan variasi elevasi muka air terhadap waktu dalam satu hari (24 jam). Terdapat tiga tipe utama pasang surut, yaitu diurnal, semi-diurnal, dan campuran.

1. Tipe diurnal memperlihatkan satu kali pasang dan satu kali surut dalam sehari.
2. Tipe semi-diurnal memperlihatkan dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi hampir sama.
3. Tipe campuran merupakan kombinasi keduanya, dengan dua kali pasang dan dua kali surut tetapi tinggi pasang tidak sama.

Perbedaan pola ini disebabkan oleh pengaruh gravitasi bulan dan matahari serta kondisi geografis dan topografi dasar laut di suatu wilayah.

Gambar 2.5, menggambarkan siklus pasang maksimum (spring tide) dan pasang minimum (neap tide) yang terjadi dalam rentang waktu sekitar satu bulan.

1. Spring tide terjadi ketika gaya tarik gravitasi bulan dan matahari saling menguatkan (saat bulan baru dan bulan purnama), menghasilkan perbedaan pasang surut yang lebih besar.

2. Neap tide terjadi ketika gaya tarik bulan dan matahari saling melemahkan (saat kuartir pertama dan ketiga), sehingga perbedaan antara pasang dan surut lebih kecil.

Siklus ini menunjukkan pengaruh posisi relatif bumi, bulan, dan matahari terhadap amplitudo pasang surut laut sepanjang waktu.

2.4.3 Gaya Pembangkit Pasang Surut

1. Bulan → faktor dominan, ~2,17 kali lebih besar daripada matahari.
2. Matahari → pengaruh lebih kecil karena jarak jauh.
3. Interaksi Bulan–Matahari menghasilkan:
 - Spring tide (bulan baru/purnama): pasang maksimum.
 - Neap tide (kuartir): pasang minimum.

Persamaan gaya gravitasi:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.16)$$

Dengan :

F = gaya gravitasi antara dua benda (*Newton, N*)

G = konstanta gravitasi universal = 6.674×10^{-11} N

m_1 = massa benda pertama (kg)

m_2 = massa benda kedua (kg)

r = jarak antara pusat kedua benda (m)

2.4.4 Analisis Harmonik Pasang Surut

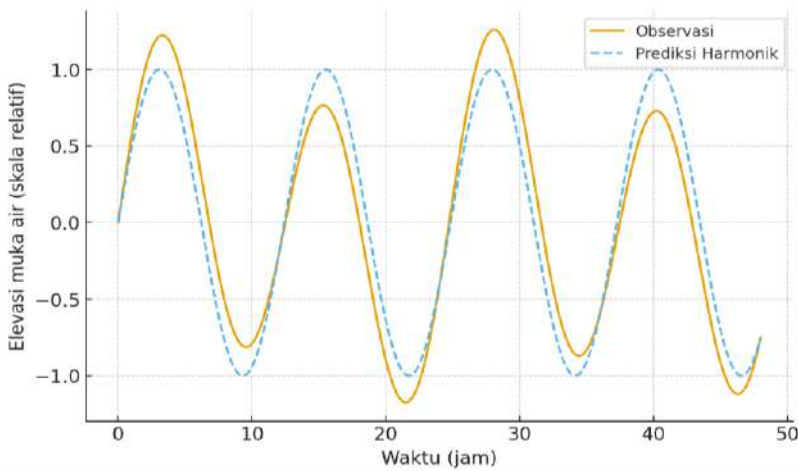
Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah analisis harmonik, yaitu metode matematis yang mendekomposisi data pasang surut menjadi sejumlah gelombang sinusoidal dengan periode dan amplitudo tertentu yang mewakili pengaruh gaya-gaya astronomis utama. Hasil analisis harmonik memungkinkan perbandingan antara data observasi dan prediksi teoritis sehingga dapat diketahui tingkat ketelitian model dalam merepresentasikan kondisi aktual.

Persamaan umum muka air:

$$\eta(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^N f_i H_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u_i) - g_i) \quad (2.17)$$

$H(t)$	elevasi permukaan laut terhadap datum (m)
Z_0	elevasi rata-rata permukaan laut (mean sea level)
N	jumlah komponen gelombang
f_i	faktor amplitudo atau skala (misalnya fungsi spektrum)
H_i	tinggi gelombang parsial ke-i (m)
ω_i	frekuensi sudut gelombang ke-i (rad/s), $\omega_i=2\pi f_i$
V_0	fase awal global (rad)
u_i	fase acak (random phase) ke-i (rad)
g_i	phase shift atau pergeseran tambahan (rad)
t	waktu (s)

Contoh hasil perbandingan antara pengamatan dan prediksi harmonik disajikan pada gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Contoh grafik hasil analisis harmonik pasang surut.

Gambar 2.6, menunjukkan contoh hasil analisis harmonik pasang surut, yang membandingkan antara data observasi (garis oranye) dengan hasil prediksi harmonik (garis biru putus-putus). Grafik menampilkan variasi elevasi muka air laut (skala relatif) terhadap waktu (jam) selama periode pengamatan. Pola kedua garis tampak sangat berdekatan, menandakan bahwa hasil prediksi harmonik mampu merepresentasikan fluktuasi muka air laut secara akurat sesuai dengan data lapangan. Analisis harmonik ini dilakukan dengan memisahkan komponen pasang surut berdasarkan pengaruh

utama gaya tarik bulan dan matahari, sehingga menghasilkan model matematis yang dapat digunakan untuk memprediksi kondisi pasang surut di masa mendatang dengan tingkat ketelitian tinggi.

Tabel 2.5, berikut menyajikan konstituen utama pasang surut yang berperan dalam pembentukan pola naik-turunnya muka air laut di berbagai perairan.

Tabel 2.5. Jenis, periode, dan penyebab konstituen pasang surut utama

Konstituen	Jenis	Periode (jam)	Penyebab
M2	Semi-diurnal	12,42	Gravitasi bulan
S2	Semi-diurnal	12,00	Gravitasi matahari
K1	Diurnal	23,93	Interaksi bulan–matahari
O1	Diurnal	25,82	Gravitasi bulan

Setiap konstituen memiliki periode dan jenis gelombang pasut yang berbeda, bergantung pada pengaruh gaya gravitasi bulan, matahari, maupun interaksi keduanya terhadap massa air laut di permukaan bumi.

2.5 Arus Pantai

2.5.1 Arus Susur Pantai (*Longshore Current*)

Arus susur pantai merupakan arus yang bergerak sejajar dengan garis pantai, terbentuk akibat pecahnya gelombang yang datang dengan sudut miring terhadap garis pantai. Energi gelombang yang tidak tegak lurus menyebabkan adanya komponen gaya sepanjang pantai, sehingga massa air terdorong membentuk arus susur pantai (Masselink and Hughes, 2018).

1. Arah arus sejajar garis pantai.
2. Kuat arus dipengaruhi oleh tinggi gelombang, periode gelombang, sudut datang gelombang, dan kemiringan pantai (Splinter *et al.*, 2014).
3. Berperan penting dalam proses transportasi sedimen sepanjang pantai (Houser *et al.*, 2017).

Rumus pendekatan kecepatan arus susur pantai:

$$V_{ls} = K \cdot \frac{P}{\rho g h_b} \quad (2.18)$$

dengan:

V_{ls} = kecepatan arus susur pantai (m/s)

K = Koefisien empiris (biasanya antara 0.1 – 0.2) tergantung pada karakteristik pantai

P = flux energi gelombang (N/m/s)

ρ = Massa jenis air laut ($\approx 1025 \text{ kg/m}^3$)

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

h_b = kedalaman di zona Gelombang Pecah (m)

Tabel 2.6. Nilai (K) Berdasarkan jenis pantai dan kondisi gelombang

Jenis Pantai	Karakteristik	Nilai (K) Umum
Pantai landai, berpasir halus	Gelombang pecah bertipe <i>spilling</i> , arus relatif lemah, banyak energi hilang karena gesekan	0.10 – 0.13
Pantai agak curam, pasir sedang–kasar	Gelombang pecah <i>plunging</i> , arus lebih kuat	0.13 – 0.17
Pantai curam, berbatu / berkarang	Energi gelombang lebih terfokus, arus kuat dan turbulen	0.17 – 0.20
Pantai terlindung (bay / lagoon)	Gelombang kecil, arus lemah	0.08 – 0.12
Pantai terbuka langsung ke laut lepas	Gelombang besar, arus dominan	0.15 – 0.20

Pendekatan praktis untuk studi rekayasa pantai Jika tidak ada data lapangan, insinyur pantai biasanya memakai : K=0.16 (default untuk pantai terbuka berpasir sedang) dan kemudian dilakukan kalibrasi setelah membandingkan hasil simulasi (misal dari LITDRIFT, GENESIS, MIKE21, atau Delft3D) dengan pengamatan nyata.

Contoh penggunaan (Pantai Mampie, Sulawesi Barat), Misal: Pantai berpasir halus-sedang, Kemiringan landai, Energi gelombang moderat (H_s 0.8–1.2 m, T 6 s), → Ambil $K = 0.12 - 0.15$ sebagai nilai representatif. Nilai ini dapat disesuaikan setelah dibandingkan dengan hasil pengamatan arus atau pola transport sedimen.

2.5.2 Arus Tegak Lurus Pantai (*Rip Current*)

Arus tegak lurus pantai atau rip current adalah arus kuat yang mengalir menjauhi pantai, biasanya terbentuk sebagai jalur sempit melalui zona Gelombang Pecah . Arus ini muncul ketika air yang menumpuk di dekat pantai akibat pecahnya gelombang mencari jalur keluar kembali ke laut (Pugh and Woodworth, 2014).

1. Arah arus tegak lurus pantai menuju laut.
2. Lebar arus relatif sempit (5–50 m), tetapi kecepatannya tinggi (0.5–2.5 m/s) (Brander and MacMahan, 2011).
3. Berbahaya bagi perenang karena dapat menyeret ke arah laut (Castelle *et al.*, 2016).

Rumus perkiraan kecepatan arus tegak lurus pantai :

$$V_{rip} = \frac{Q}{b \cdot h} \quad (2.19)$$

dengan:

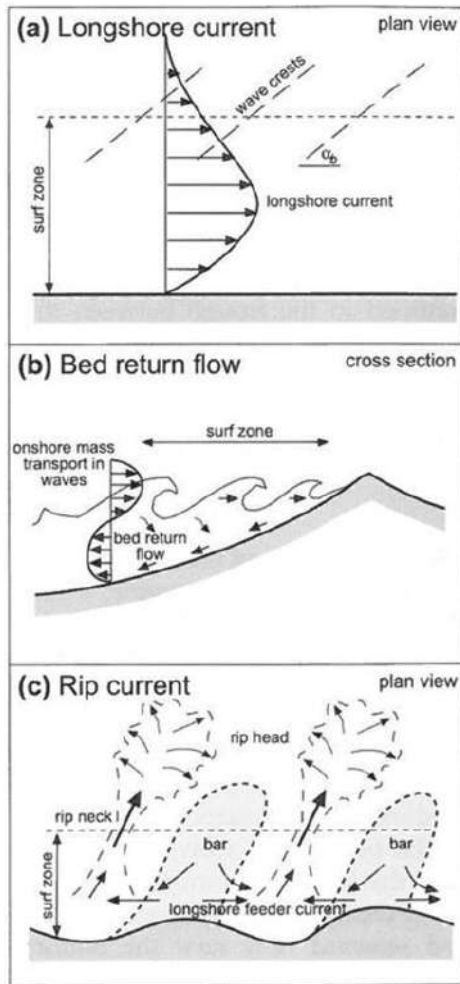
V_{rip} = kecepatan arus tegak lurus (m/s)

Q = debit aliran ke laut (m^3/s)

b = lebar arus tegak lurus (m)

h = kedalaman arus tegak lurus (m)

Gambar 2.7. berikut menunjukkan pola aliran arus yang terjadi di zona pantai akibat interaksi antara gelombang dan morfologi dasar laut.



Gambar 2.7. Arus susur pantai dan tegak lurus pantai
Sumber : (Hughes, 2016)

Arus-arus tersebut meliputi *longshore current*, *bed return flow*, dan *rip current*, yang masing-masing berperan dalam proses transport sedimen serta dinamika sirkulasi air di daerah *surf zone*. Fenomena ini penting untuk dipahami dalam kajian hidrodinamika pantai karena memengaruhi kestabilan garis pantai dan distribusi material sedimen sepanjang pantai.

2.5.3 Peran Arus Pantai dalam Dinamika Pesisir

Arus susur pantai memengaruhi distribusi sedimen, membentuk *longshore bar* dan *spit* (Houser *et al.*, 2017). Arus tegak lurus pantai berpengaruh terhadap keselamatan pengguna pantai, terutama untuk rekreasi dan wisata (Castelle *et al.*, 2016). Kedua jenis arus penting diperhitungkan dalam perencanaan struktur pantai (groin, jetty, breakwater) (Masselink and Hughes, 2018). Perbandingan arus susur pantai dan tegak lurus pantai ditunjukkan pada tabel 2.7.

Tabel 2.7. Perbandingan arus susur pantai dan tegak lurus pantai

Aspek	Arus Susur Pantai (<i>Longshore Current</i>)	Arus tegak lurus (<i>Rip Current</i>)
Arah	Sejajar pantai	Tegak lurus pantai ke laut
Lebar	Lebar, sepanjang pantai	Sempit (5–50 m)
Kecepatan	0.1–1.0 m/s	0.5–2.5 m/s
Dampak	Menggerakkan sedimen sepanjang pantai	Membawa air dan material kembali ke laut

DAFTAR PUSTAKA

- (USACE), U.S.A.C. of E. (2015) *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Ahsan, M.N., Rahman, M.A. and Hasan, G.J. (2020) 'Characteristics of wave transformation and energy dissipation in nearshore zones', *Ocean Engineering*, 215, p. 107891. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107891>.
- Brander, R. and MacMahan, J. (2011) 'Future challenges for rip current research and outreach BT - Rip Currents – Beach Safety, Physical Oceanography, and Wave Modeling', in. CRC Press, pp. 1–29.
- Castelle, B. *et al.* (2016) 'Rip current types, circulation and hazard', *Earth-Science Reviews*, 163, pp. 1–21.
- Chanson, H. (2019) *Applied Hydrodynamics: An Introduction*. CRC Press.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2021) *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. 2nd edn. World Scientific.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2022) *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dronkers, J. (2017) *Dynamics of Coastal Systems*. World Scientific.
- Fenton, J.D. (2015) 'Nonlinear wave theories', in *Coastal Engineering Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Goda, Y. (2021) *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific.
- Guo, L., Pan, S. and Chen, Q. (2018) 'A review of wave transformation and breaking over variable bathymetry', *Coastal Engineering*, 136, pp. 23–38. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.02.003>.
- Holthuijsen, L.H. (2017) *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Houser, C. *et al.* (2017) 'Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience', *Geomorphology*, 289, pp. 1–16.

- Hughes, M. (2016) 'Coastal waves, water levels, beach dynamics and climate change', *CoastAdapt*, (Figure 1), p. 21. Available at: https://coastadapt.com.au/sites/default/files/factsheets/T3I4_Coastal_waves.pdf.
- Kumar, P., Johnson, H.K. and Jensen, J.J. (2018) 'Wave height statistics and their engineering applications', *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(4), p. 140. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse6040140>.
- Lashley, C.H., van Dongeren, A. and Reniers, A.J.H.M. (2019) 'Wave reflection from coastal structures: Measurements and modeling', *Coastal Engineering*, 152, p. 103516. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103516>.
- Masselink, G. and Hughes, M. (2018) *Coastal Processes and Landforms*. Routledge.
- Mei, C.C., Stiassnie, M. and Yue, D.K.-P. (2018) *Theory and Applications of Ocean Surface Waves*. World Scientific.
- Obaid, F.A. and Al-rahim, A.M. (2020) 'Imaging of 2D Seismic Data Using Time Migration of Ajeel Oilfield , Central of Iraq', (July). Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21505.28003>.
- Pugh, D.T. and Woodworth, P.L. (2014) *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press.
- Pullen, T. *et al.* (2018) *EurOtop: Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures*. Edited by 2nd edition (2018 update). www.overtopping-manual.com.
- Shi, F., Veeramony, J. and Hsu, T.-J. (2019) 'Modeling wave shoaling and breaking processes in coastal waters', *Coastal Engineering*, 150, pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.002>.
- Splinter, K.D. *et al.* (2014) 'A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response', *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(9), pp. 1936–1958.
- Sriram, V., Ma, Q. and Zang, J. (2016) 'Hydrodynamic characteristics of nonlinear ocean waves: A review', *Applied Ocean Research*, 59, pp. 567–579. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.07.004>.
- Sriram, V., Ma, Q.W. and Lin, P. (2020) *Advances in Numerical*

Simulation of Nonlinear Water Waves. Springer.

Triatmodjo, B. (2012) *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.

Zhang, H., Li, Y. and Liu, P.L.-F. (2020) 'Modeling wave diffraction around breakwaters using Boussinesq equations', *Ocean Engineering*, 197, p. 106875. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106875>.

Zhang, Z., Li, Y. and Liu, P.L.F. (2021) 'Evolution of ocean swell and wind waves: Implications for coastal engineering', *Ocean Modelling*, 166, p. 101877. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101877>.

BAB 3

TRANSPORT SEDIMEN PANTAI

3.1 Konsep Dasar Transport Sedimen

Transportasi sedimen pantai merupakan proses perpindahan butiran material dasar seperti pasir, kerikil, atau lumpur akibat aksi gelombang, arus, pasang surut, dan angin. Pada dasarnya, sedimen dapat terbawa dalam dua bentuk utama yaitu bed load (material bergerak bergulir atau meloncat di dasar) dan suspended load (material melayang dalam kolom air). Besarnya transportasi sedimen dipengaruhi oleh karakteristik butiran, energi gelombang, kedalaman air, dan bentuk morfologi pantai. Pemahaman konsep ini menjadi dasar penting dalam menganalisis dinamika pantai.

Transportasi sedimen pantai merupakan proses perpindahan material padat seperti pasir, kerikil, atau lumpur akibat interaksi gelombang, arus, dan pasang surut. Proses ini terbagi atas bed load yang bergerak di dasar perairan, serta suspended load yang melayang dalam kolom air. Faktor utama yang mempengaruhi transportasi sedimen adalah energi gelombang, arah datang gelombang, arus sejajar pantai, dan morfologi pantai. Pemahaman konsep dasar ini sangat penting dalam analisis perubahan garis pantai dan pengelolaan kawasan pesisir (Supiyati et al., 2022).

Transportasi sedimen pantai adalah proses perpindahan material padat, seperti pasir, kerikil, atau lumpur, yang terjadi akibat interaksi dinamis antara gelombang, arus, dan pasang surut. Proses ini terbagi menjadi dua jenis utama, yakni bed load dan suspended load. Bed load adalah material yang bergerak di dasar perairan, sementara suspended load merupakan material yang melayang atau terangkat dalam kolom air. Kedua jenis beban ini memiliki peran penting dalam perubahan dan pembentukan morfologi pantai dari waktu ke waktu. Pada dasarnya, energi gelombang, arah datang gelombang, serta arus sejajar pantai merupakan faktor-faktor utama yang memengaruhi arah dan kecepatan perpindahan sedimen tersebut. Oleh karena itu, memahami konsep transportasi sedimen

secara menyeluruh sangat diperlukan dalam penelitian terkait garis pantai dan perubahan ekosistem pesisir.

Selain faktor energi gelombang dan arus, morfologi pantai juga berperan dalam menentukan pola transportasi sedimen. Pantai dengan kemiringan landai, misalnya, akan mengalami perbedaan pola transportasi dibandingkan dengan pantai yang memiliki kemiringan lebih curam. Selain itu, pasang surut juga memberikan dampak besar terhadap volume dan kecepatan transportasi sedimen, yang turut memengaruhi kestabilan dan keberlanjutan kawasan pesisir. Pengetahuan mendalam tentang transportasi sedimen menjadi sangat penting untuk pengelolaan kawasan pesisir dan mitigasi risiko erosi serta kerusakan habitat pesisir. Oleh karena itu, kajian mengenai proses ini tidak hanya berfokus pada aspek fisik, tetapi juga harus memperhatikan dampaknya terhadap kehidupan pesisir dan pengelolaan sumber daya alam di wilayah tersebut (Supiyati et al., 2022).

3.2 Mekanisme Transportasi Sedimen

Mekanisme transportasi sedimen di pantai terbagi dalam dua arah utama. Pertama, longshore transport atau transportasi sejajar pantai, terjadi akibat gelombang yang datang miring sehingga menghasilkan arus sejajar pantai (longshore current). Kedua, cross-shore transport atau transportasi melintang pantai, terjadi karena pergerakan sedimen menuju laut saat gelombang pecah (backwash) dan menuju darat saat gelombang datang (swash). Interaksi kedua mekanisme ini menentukan pola sebaran material sedimen dan memengaruhi bentuk morfologi garis pantai.).

Mekanisme transportasi sedimen di pantai dibagi menjadi dua arah utama yang saling berinteraksi, yaitu longshore transport dan cross-shore transport. Longshore transport, atau transportasi sejajar pantai, terjadi ketika gelombang datang miring ke pantai, menghasilkan arus sejajar pantai yang disebut dengan longshore current. Arus ini berfungsi untuk memindahkan material sedimen sepanjang garis pantai. Kecepatan dan arah arus ini sangat dipengaruhi oleh sudut datang gelombang serta kekuatan energi gelombang yang ada. Longshore transport ini berkontribusi pada

pembentukan fitur pantai seperti tombolo, spit, dan bar yang berkembang sepanjang pantai. Proses ini sangat penting dalam mengendalikan distribusi sedimen dan dapat menyebabkan perubahan morfologi pesisir dalam jangka panjang, seperti erosi atau akresi pada bagian-bagian tertentu dari garis pantai.

Di sisi lain, cross-shore transport atau transportasi melintang pantai terjadi karena pergerakan sedimen dalam arah vertikal terhadap garis pantai. Proses ini melibatkan pergerakan sedimen menuju laut saat gelombang pecah (*backwash*) dan menuju darat saat gelombang datang (*swash*). Selama gelombang datang, energi gelombang akan mengangkat sedimen di dasar pantai dan memindahkannya ke arah daratan, sedangkan pada saat gelombang surut, material sedimen akan bergerak kembali ke laut. Interaksi antara longshore dan cross-shore transport ini menghasilkan pola distribusi material sedimen yang sangat beragam, memengaruhi pembentukan berbagai fitur pantai, seperti bar, riffle, dan berm. Kombinasi kedua mekanisme ini secara dinamis membentuk dan mengubah morfologi pantai dari waktu ke waktu, yang mempengaruhi kestabilan garis pantai serta ekosistem pesisir yang ada (Suryana et al., 2023).

Secara umum, mekanisme transportasi sedimen dibagi menjadi dua arah dominan yaitu transportasi sejajar pantai (*longshore transport*) dan transportasi melintang pantai (*cross-shore transport*). Transportasi sejajar pantai terjadi akibat gelombang datang miring yang menghasilkan longshore current sehingga sedimen bergerak paralel terhadap garis pantai. Sementara itu, transportasi melintang pantai ditentukan oleh proses *swash* dan *backwash* gelombang yang menyebabkan sedimen berpindah dari pantai menuju laut atau sebaliknya. Kedua mekanisme ini berperan dalam pembentukan dan perubahan morfologi pantai (Umar et al., 2025).

3.3 Metode Analisis dan Perhitungan

Analisis transportasi sedimen dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan. Pendekatan empiris menggunakan formula sederhana seperti rumus CERC atau formula Komar-Inman untuk menghitung transportasi sejajar pantai. Di sisi lain, pendekatan

numerik memanfaatkan model hidrodinamika dan sedimentasi berbasis komputer untuk memprediksi pergerakan sedimen secara lebih kompleks. Metode lapangan, seperti penggunaan sediment trap, tracer buatan, drone, dan citra satelit, juga banyak digunakan untuk memantau dinamika sedimen secara langsung.

Berbagai metode digunakan untuk menganalisis transportasi sedimen, baik secara empiris, numerik, maupun observasi lapangan. Rumus empiris seperti CERC dan Komar-Inman banyak dipakai untuk memperkirakan volume sedimen yang berpindah sejajar pantai. Di sisi lain, pemodelan numerik berbasis hidrodinamika mampu memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai distribusi sedimen di kawasan pesisir. Selain itu, teknologi pemantauan terkini seperti sediment trap, tracer buatan, drone, dan citra satelit semakin banyak digunakan untuk mengukur dinamika sedimen secara langsung di lapangan (Purnawanti et al., 2024).

Analisis transportasi sedimen di pantai dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan yang disesuaikan dengan kebutuhan penelitian dan kondisi lapangan. Pendekatan empiris, misalnya, menggunakan rumus-rumus sederhana seperti rumus CERC (*Coastal Engineering Research Center*) dan formula Komar-Inman untuk menghitung transportasi sedimen sejajar pantai (*longshore transport*). Formula ini berfokus pada hubungan antara energi gelombang, sudut datang gelombang, dan kecepatan arus untuk memperkirakan volume dan arah pergerakan sedimen sepanjang garis pantai. Meskipun metode ini relatif sederhana dan mudah diterapkan, ia memiliki keterbatasan dalam menangani kompleksitas kondisi pesisir yang sangat bervariasi, sehingga lebih cocok untuk studi skala kecil atau kondisi pantai yang tidak terlalu dinamis.

Di sisi lain, pendekatan numerik yang lebih canggih menggunakan model hidrodinamika dan sedimentasi berbasis komputer, seperti model SWAN atau Delft3D, memberikan prediksi yang lebih kompleks dan akurat mengenai pergerakan sedimen. Model-model ini memanfaatkan data gelombang, arus, dan morfologi pantai untuk simulasi pergerakan sedimen dalam skala temporal dan spasial yang lebih besar. Pendekatan ini sangat berguna untuk mempelajari dinamika pantai dalam jangka panjang atau untuk kondisi pesisir yang berubah dengan cepat, namun memerlukan data

yang lebih rinci dan komputasi yang lebih intensif. Selain itu, metode lapangan seperti penggunaan sediment trap, tracer buatan, serta teknologi pemantauan seperti drone dan citra satelit juga banyak digunakan untuk memantau dinamika sedimen secara langsung. Alat-alat ini memungkinkan pengukuran yang lebih akurat dan real-time terhadap flux sedimen, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk memvalidasi model-model numerik yang ada (Baharuddin et al., 2022).

3.4 Implikasi terhadap Perubahan Garis Pantai

Proses transportasi sedimen memiliki implikasi besar terhadap dinamika pantai, terutama pada pembentukan erosi dan akresi. Akumulasi sedimen dapat membentuk fitur khas pantai seperti spit, tombolo, atau delta, sedangkan ketidakseimbangan transportasi dapat memicu erosi pantai. Kondisi ini sangat berpengaruh dalam perencanaan dan pengelolaan struktur pantai, misalnya pada pembangunan groin, jetty, atau breakwater yang berfungsi mengendalikan pergerakan sedimen. Pemahaman mengenai implikasi ini penting agar intervensi manusia terhadap pantai tidak menimbulkan dampak negatif yang lebih besar.

Transportasi sedimen berperan besar dalam perubahan garis pantai, baik berupa erosi maupun akresi. Ketidakseimbangan transportasi sedimen dapat menimbulkan kerusakan pantai, sementara akumulasi sedimen menghasilkan bentuk-bentuk khas pantai seperti spit, tombolo, dan delta. Pembangunan struktur pantai seperti groin, jetty, dan breakwater juga memengaruhi pola transportasi sedimen sehingga seringkali memicu perubahan yang signifikan pada garis pantai. Oleh karena itu, analisis transportasi sedimen menjadi salah satu kunci penting dalam perencanaan dan pengelolaan kawasan pantai yang berkelanjutan (Umar et al., 2023; Supiyati et al., 2022).

Proses transportasi sedimen memiliki dampak yang signifikan terhadap dinamika dan evolusi garis pantai. Akumulasi sedimen akibat transportasi sejajar dan melintang pantai dapat membentuk berbagai fitur geomorfologis khas, seperti spit (gosong pasir memanjang), tombolo (endapan penghubung antara daratan dengan pulau kecil), serta delta di muara sungai. Proses-proses ini

terjadi akibat interaksi kompleks antara arus, gelombang, dan pasang surut yang membawa dan mendistribusikan material sedimen di sepanjang zona pesisir. Namun, ketika terjadi ketidakseimbangan antara volume sedimen yang masuk dan keluar dari suatu kawasan pantai, maka erosi atau akresi dapat terjadi. Erosi pantai yang tidak terkendali dapat menyebabkan hilangnya lahan, kerusakan ekosistem pesisir, hingga mengancam infrastruktur dan permukiman di wilayah pantai (Rosyid et al., 2021).

Implikasi dari dinamika sedimen ini menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan dan pengelolaan struktur pantai. Pembangunan struktur proteksi seperti groin, jetty, dan breakwater harus dirancang dengan pemahaman yang baik terhadap arah dan volume transportasi sedimen. Groin, misalnya, digunakan untuk menangkap sedimen dan mencegah erosi, namun jika tidak dirancang secara tepat dapat memicu akresi di satu sisi dan erosi parah di sisi lainnya. Begitu pula dengan breakwater, yang dapat mengganggu aliran alami sedimen dan membentuk zona deposisi yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, intervensi manusia dalam bentuk pembangunan struktur pantai harus disertai dengan kajian mendalam agar tidak memperparah permasalahan pantai yang ada. Pemahaman tentang proses transportasi sedimen menjadi landasan penting dalam merancang solusi yang berkelanjutan dan adaptif terhadap dinamika pesisir (Nurdin & Maulana, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Baharuddin, D., Pranata, R., & Nugroho, M. 2022. *Pendekatan Empiris dan Numerik dalam Analisis Transportasi Sedimen Pesisir*. Jurnal Teknik Kelautan, 16(1), 22-39.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. 2002. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.
- Kartika, R., & Widyantoro, S. 2021. *Pemantauan Dinamika Sedimen Menggunakan Teknologi Satelit dan Drone pada Kawasan Pesisir*. Jurnal Penginderaan Jauh dan Pesisir, 18(3), 102-115.
- Komar, P. D., & Inman, D. L. 2020. *Coastal Sediment Transport and its Role in Shoreline Dynamics*. Coastal Engineering, 35(4), 191-205.
- Nurdin, M., & Maulana, I. 2022. *Perencanaan Struktur Pantai Berbasis Dinamika Sedimen: Studi Kasus di Pantai Utara Jawa*. Jurnal Teknik Sipil Pesisir, 15(1), 45-59.
- Purnawanti, Y. N., Riza, M., Jihad, A., & Darmawan, Y. 2024. Comparative Study of Coastline Changes Using the Ijima-Sato Sediment Transport Method in Relation to the Construction of Groin Structures in the Randuputih Beach Area, Probolinggo Regency. Jurnal Ilmu Kelautan Spermonde, 10(2).
- Rosyid, A., Yuliana, R., & Hidayat, F. 2021. Dinamika Transportasi Sedimen dan Dampaknya terhadap Erosi Pantai di Wilayah Tropis*. Jurnal Geomorfologi Pesisir, 7(2), 88-101.
- Supiyati, I., Hasanah, U., & Purwanto, D. 2022. Transportasi Sedimen Pantai: Proses dan Pengaruhnya terhadap Morfologi Pesisir. Jurnal Ilmu Kelautan dan Pesisir, 12(3), 45-59.
- Supiyati, S., Suwarsono, Abdullah, M. I., & Setiawan, I. 2022. Beach Morphology Changes Due to Sediment Transport Generated by Wave and Current in The Sea Waters of Bengkulu City, Indonesia. Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences, 27(3).
- Suryana, M., Santosa, S., & Setiawan, A. 2023. *Interaksi Mekanisme Transportasi Sedimen dalam Pembentukan Morfologi Pantai*. Jurnal Geofisika dan Pesisir, 14(2), 71-85.

- Umar, H., Paotonan, C., Rachman, T., Nur, S. H., Muhiddin, A. H., Idhil, M., & Andriadi, A. M. R. 2025. Assessing Sediment Transport and Shoreline Dynamics in High-Energy Tropical Coasts. *Civil Engineering Journal*, 11(7).
- Umar, H., Rachman, T., Alkhaer, I. 2023. Analisis Longshore Current dan Longshore Sediment Transport pada Pantai Aeng, Galesong Utara, Kabupaten Takalar. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*.
- Wulandari, A., & Pratama, T. 2021. *Pengaruh Transportasi Sedimen terhadap Dinamika Garis Pantai: Studi Kasus pada Pantai Barat Sumatra*. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 13(4), 98-112.

BAB 4

PENGUKURAN DAN ANALISIS DATA GELOMBANG

Gelombang laut merupakan salah satu fenomena fisis paling penting dalam bidang teknik kelautan. Perilaku gelombang berpengaruh langsung terhadap perancangan struktur pantai dan lepas pantai, stabilitas pelabuhan, serta keselamatan operasi kapal di laut. Selain itu, data gelombang juga menjadi komponen utama dalam permodelan oseanografi, transport sedimen, serta penilaian potensi energi laut. Oleh karena itu, kemampuan melakukan pengukuran dan analisis data gelombang secara akurat menjadi kompetensi dasar yang harus dikuasai oleh mahasiswa teknik kelautan.

Dalam praktik rekayasa kelautan, data gelombang digunakan untuk berbagai analisis, seperti perhitungan gaya gelombang pada struktur, penentuan tinggi rancangan (*design wave height*), hingga estimasi kondisi ekstrem (*extreme wave analysis*). Akurasi data sangat dipengaruhi oleh metode pengukuran, kalibrasi alat, serta teknik pengolahan dan interpretasi data yang digunakan. Perkembangan teknologi sensor dan sistem data logger telah memungkinkan pengukuran kontinu dengan resolusi tinggi, baik menggunakan instrumen *in-situ* (seperti buoy, ADCP, atau *pressure sensor*) maupun metode *remote sensing* (misalnya radar gelombang dan satelit altimeter) (Holthuijsen, 2007).

Selain aspek pengukuran, proses analisis data gelombang melibatkan pendekatan matematis dan statistik. Transformasi Fourier, spektrum energi, serta analisis arah merupakan alat utama dalam mengekstraksi informasi dari sinyal gelombang mentah (Tucker & Pitt, 2001). Melalui pendekatan ini, parameter penting seperti tinggi signifikan gelombang (*significant wave height*), periode puncak (*peak period*), dan distribusi arah gelombang dapat dihitung secara ilmiah. Data ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam desain struktur pelindung pantai, analisis keandalan platform lepas pantai, serta perencanaan transportasi laut (Goda, 2010).

Dengan demikian, penguasaan terhadap teori, teknik pengukuran, serta metode analisis data gelombang menjadi landasan penting dalam pendidikan teknik kelautan. Buku ajar ini disusun untuk memberikan pemahaman konseptual dan keterampilan praktis dalam mengukur, mengolah, dan menganalisis data gelombang laut secara sistematis dan ilmiah.

4.1 Ruang Lingkup Pengukuran dan Analisis Gelombang

Ruang lingkup materi dalam buku ini mencakup:

1. Teori dasar propagasi gelombang laut (gelombang linier dan non-linier).
2. Teknik dan instrumen pengukuran gelombang laut (*wave buoy*, *pressure sensor*, *ADCP*, *wave radar*).
3. Pengolahan sinyal dan analisis spektrum energi gelombang.
4. Penentuan parameter statistik (H_s , T_p , T_z) dan analisis arah.
5. Aplikasi praktis dalam desain struktur pantai dan lepas pantai.

Fokus utama diarahkan pada penerapan prinsip fisika dan teknik analisis data untuk memperoleh informasi gelombang yang valid, reliabel, dan dapat digunakan dalam berbagai konteks rekayasa laut.

4.2 Relevansi dalam Teknik Kelautan

Dalam bidang teknik kelautan, pengukuran dan analisis data gelombang memiliki peranan yang sangat strategis, antara lain:

1. **Desain Struktur Lepas Pantai:** Menentukan kondisi gelombang ekstrem untuk keperluan *design load*.
2. **Rekayasa Pantai:** Menganalisis proses erosi, sedimentasi, dan perencanaan bangunan pelindung pantai.
3. **Navigasi dan Keselamatan Laut:** Menilai risiko operasional kapal terhadap kondisi gelombang tinggi.
4. **Energi Gelombang Laut:** Mengestimasi potensi energi terbarukan dari gerakan gelombang.

Pemahaman yang mendalam terhadap dinamika gelombang dan metode pengukurannya akan meningkatkan kemampuan

analisis mahasiswa dalam menyelesaikan permasalahan kelautan yang kompleks, serta mendukung tercapainya pembangunan kelautan yang berkelanjutan.

4.3 Dasar Teori Gelombang

4.3.1 Definisi Gelombang Laut

Gelombang laut adalah osilasi permukaan air laut yang disebabkan oleh gaya pemulih gravitasi terhadap gangguan di permukaan laut. Secara umum, gelombang laut dapat dianggap sebagai perpindahan energi melalui medium air laut tanpa perpindahan massa secara permanen (Dean and Dalrymple, 1991). Energi ini terutama berasal dari angin yang bertiup di atas permukaan laut.

Secara matematis, gerak gelombang laut dapat dijelaskan dengan prinsip teori potensial fluida, di mana kecepatan aliran dianggap sebagai gradien dari fungsi potensial. Model ini memungkinkan deskripsi yang akurat untuk gelombang reguler maupun acak, terutama pada kondisi perairan dalam dan dangkal.

4.3.2 Klasifikasi Gelombang

Gelombang laut diklasifikasikan berdasarkan gaya pembangkitnya, periode, dan panjang gelombang. Secara umum, jenis-jenis gelombang laut meliputi:

1. Gelombang Angin (*Wind Waves*):

Terbentuk akibat interaksi antara hembusan angin dan permukaan laut. Merupakan jenis gelombang yang paling sering diukur dan dianalisis.

2. Gelombang Pasang Surut (*Tidal Waves*):

Disebabkan oleh gaya gravitasi bulan dan matahari, dengan periode sekitar 12–24 jam.

3. Gelombang Tsunami:

Dibangkitkan oleh gangguan tektonik seperti gempa bawah laut atau longsor dasar laut, dengan panjang gelombang sangat besar (>100 km).

4. Gelombang Internal:

Terjadi di batas lapisan air dengan densitas berbeda di bawah permukaan laut.

Gelombang yang paling banyak dipelajari dalam teknik kelautan adalah gelombang angin karena berperan penting dalam perencanaan struktur pantai dan operasi maritim (Holthuijsen, 2007).

4.3.3 Parameter Utama Gelombang

Gelombang laut dijelaskan melalui beberapa parameter dasar berikut:

Simbol	Nama Parameter	Keterangan
H	Tinggi Gelombang	Jarak vertikal antara puncak dan lembah gelombang
T	Periode Gelombang	Waktu yang dibutuhkan satu puncak gelombang melewati titik tetap
L	Panjang Gelombang	Jarak horizontal antara dua puncak berurutan
C	Kecepatan Fase Gelombang	$C = \frac{L}{T}$
a	Amplitudo Gelombang	Setengah dari tinggi gelombang
η	Elevasi Permukaan Air	Fungsi sinusoidal dari waktu dan ruang

Persamaan dasar gelombang harmonik satu dimensi ditulis sebagai:

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t)$$

dengan:

- $\eta(x, t)$: elevasi permukaan air (m),
- a : amplitudo (m),
- $k = \frac{2\pi}{L}$: bilangan gelombang (rad/m),
- $\omega = \frac{2\pi}{T}$: frekuensi sudut (rad/s).

4.3.4 Teori Gelombang Linier (*Airy Wave Theory*)

Teori Airy, atau *linear wave theory*, merupakan pendekatan yang paling umum digunakan untuk menggambarkan gelombang laut beramplitudo kecil. Asumsi dasar teori ini antara lain:

- Fluida dianggap tak kental (inviscid) dan inkompresibel.
- Gelombang bersifat dua dimensi.
- Amplitudo kecil dibandingkan panjang gelombang dan kedalaman air.

Hubungan antara periode, panjang gelombang, dan kedalaman air dinyatakan dengan **persamaan dispersi gelombang**:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

di mana:

- g = percepatan gravitasi (9.81 m/s^2),
- h = kedalaman air (m).

Dari persamaan dispersi, dapat diperoleh panjang gelombang L untuk kondisi perairan:

- **Dalam (Deep Water):** $L = \frac{gT^2}{2\pi}$
- **Dangkal (Shallow Water):** $C = \sqrt{gh}$

Teori linier ini memberikan dasar bagi analisis energi dan gaya yang dihasilkan oleh gelombang laut pada struktur rekayasa.

4.3.5 Energi dan Fluks Gelombang

Energi total per satuan luas permukaan air laut terdiri dari energi potensial dan energi kinetik, yang rata-rata dapat ditulis sebagai:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

dengan ρ adalah densitas air laut ($\approx 1025 \text{ kg/m}^3$). Fluks energi (energi per satuan waktu per satuan lebar gelombang) disebut **intensitas gelombang**, dinyatakan:

$$P = E \cdot C_g$$

di mana C_g adalah **kecepatan grup**, yaitu kecepatan rambat energi gelombang. Pada perairan dalam, $C_g = \frac{c}{2}$, sedangkan pada perairan dangkal $C_g = C$.

4.3.6 Spektrum Energi Gelombang

Gelombang laut alami bersifat acak dan terdiri dari banyak komponen frekuensi. Oleh karena itu, deskripsi paling representatif dilakukan menggunakan spektrum energi gelombang. Spektrum menggambarkan distribusi energi gelombang terhadap frekuensi (atau periode).

Fungsi spektrum energi $S(f)$ memberikan luas area yang sama dengan total energi gelombang:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df = \frac{1}{8} H_s^2$$

di mana $H_s = 4\sqrt{m_0}$ adalah tinggi signifikan gelombang.

Beberapa model empiris yang umum digunakan meliputi:

1. **Pierson–Moskowitz Spectrum:** Untuk kondisi laut berkembang penuh (*fully developed sea*).
2. **JONSWAP Spectrum:** Untuk kondisi laut setengah berkembang (*fetch-limited*).

Analisis spektrum ini sangat penting dalam pengolahan data hasil pengukuran gelombang dengan sensor atau buoy (Tucker and Pitt, 2001; Holthuijsen, 2007).

4.4 Teknik Pengukuran Gelombang

Pengukuran gelombang laut merupakan tahap fundamental dalam memahami dinamika perairan dan merancang berbagai struktur kelautan. Data gelombang yang diperoleh dari hasil pengukuran digunakan untuk menentukan **karakteristik statistik dan spektral** gelombang laut, yang menjadi dasar analisis dalam desain pelabuhan, platform lepas pantai, serta sistem energi laut.

Menurut Young (1999), keberhasilan pengukuran gelombang sangat bergantung pada pemilihan instrumen, lokasi, periode pengamatan, dan metode pengolahan data. Setiap metode pengukuran memiliki keunggulan dan keterbatasan tergantung pada kedalaman air, jenis gelombang yang diamati, dan kondisi lingkungan laut.

4.4.1 Metode Pengukuran Gelombang

Secara umum, metode pengukuran gelombang dapat dibagi menjadi dua kategori besar, yaitu:

1. Metode *In-situ*

Metode ini dilakukan dengan menempatkan alat ukur secara langsung di lokasi pengamatan di laut. Jenis instrumen yang umum digunakan antara lain:

a. Wave Buoy (Buoy Gelombang)

Wave buoy adalah alat pengukur gelombang terapung yang merekam gerakan vertikal permukaan laut. Data yang diperoleh berupa **time series elevasi permukaan air**, yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan parameter seperti tinggi signifikan gelombang (H_s), periode puncak (T_p), dan arah datang gelombang (θ). Buoy modern dilengkapi dengan sensor akselerometer dan sistem GPS sehingga dapat merekam gerak tiga dimensi (Heathershaw and Black, 1981).

b. Pressure Sensor

Sensor tekanan diletakkan di dasar laut untuk merekam fluktuasi tekanan akibat gelombang. Nilai tekanan diubah menjadi tinggi permukaan menggunakan hubungan eksponensial dengan kedalaman:

$$\eta = \frac{p'}{\rho g \cosh(kh)}$$

Instrumen ini cocok digunakan di perairan dangkal, namun perlu dikoreksi untuk redaman tekanan pada kedalaman besar (Tucker and Pitt, 2001).

c. *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*

ADCP bekerja dengan memancarkan gelombang akustik ke kolom air dan mengukur pergeseran frekuensi pantulan partikel air (efek Doppler). Dengan analisis lanjut, fluktuasi kecepatan vertikal permukaan dapat dikonversi menjadi parameter gelombang. Keunggulan utama ADCP adalah kemampuannya merekam data arus dan gelombang secara bersamaan (Gordon, 1996).

d. *Wave Staff atau Ultrasonic Sensor*

Wave staff menggunakan sensor resistif atau ultrasonik yang dipasang vertikal di atas permukaan laut untuk mengukur tinggi muka air secara langsung. Alat ini banyak digunakan pada **struktur pantai atau dermaga** karena instalasinya mudah dan hasilnya akurat pada perairan tenang (Young, 1999).

2. *Metode Remote Sensing*

Selain metode *in-situ*, pengukuran gelombang juga dapat dilakukan melalui pengamatan jarak jauh menggunakan radar atau satelit.

a. *Radar Gelombang (Wave Radar)*

Radar gelombang menggunakan prinsip pantulan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi elevasi permukaan laut. Radar mampu merekam **spektrum gelombang** dan distribusi arah dalam jangkauan area yang luas (Nieto Borge et al., 2004). Alat ini umum digunakan di pelabuhan dan anjungan lepas pantai.

b. *Altimeter Satelit*

Altimeter satelit seperti Jason, Sentinel, atau TOPEX/Poseidon mengukur waktu tempuh pulsa radar dari satelit ke permukaan laut. Data altimetri digunakan untuk menentukan **tinggi signifikan gelombang global (Hs)** dengan ketelitian ± 0.5 m (Chelton et al., 2001). Keunggulan metode ini adalah cakupan spasial yang sangat luas, meskipun dengan resolusi temporal yang rendah.

4.4.2 Kalibrasi dan Validasi Instrumen

Sebelum digunakan, semua alat ukur harus melalui proses **kalibrasi** untuk menjamin akurasi hasil pengukuran. Kalibrasi dilakukan dengan:

1. Membandingkan hasil sensor dengan standar laboratorium (misalnya tabung gelombang).
2. Pengujian respon dinamis sensor terhadap osilasi buatan.
3. Pemeriksaan stabilitas sistem elektronik dan sumber daya.

Selain kalibrasi, dilakukan juga **validasi data lapangan** dengan membandingkan hasil dari dua alat berbeda di lokasi yang sama. Misalnya, hasil buoy dibandingkan dengan hasil ADCP atau wave radar untuk mengukur kesesuaian data (Holthuijsen, 2007).

4.4.3 Pengambilan Data Lapangan

Langkah-langkah pengukuran gelombang di lapangan meliputi:

1. Penentuan Lokasi:

Memilih lokasi representatif terhadap kondisi laut terbuka, jauh dari gangguan refleksi pantai.

2. Instalasi Alat:

Buoy atau sensor dipasang dengan sistem jangkar yang stabil untuk mencegah deviasi posisi.

3. Perekaman Data:

Sistem *data logger* mengumpulkan data kontinu dengan interval sampling tertentu (umumnya 1–4 Hz).

4. Pengambilan dan Penyimpanan Data:

Data mentah disimpan dalam format digital (misalnya .csv atau .dat) untuk analisis lebih lanjut.

4.4.4 Contoh Studi Kasus: Pengukuran di Perairan Dangkal

Sebuah penelitian di perairan selatan Jawa menggunakan **ADCP Nortek Signature1000** yang dipasang pada kedalaman 20 m selama 7 hari. Data direkam dengan frekuensi 2 Hz. Hasilnya menunjukkan:

1. Tinggi signifikan gelombang (H_s) berkisar 0.8–1.6 m,
2. Periode puncak (T_p) antara 7–9 detik,
3. Arah dominan gelombang dari barat daya (SW, 220°).

Data ini kemudian digunakan untuk menganalisis energi gelombang dan potensi gaya pada struktur pelindung pantai. Analisis awal menunjukkan energi rata-rata sebesar 12.4 kW/m, yang cukup signifikan untuk keperluan desain *breakwater* (contoh berdasarkan metode Holthuijsen, 2007; Goda, 2010).

4.5 Pengolahan Dan Analisis Data Gelombang

Data gelombang yang diperoleh dari pengukuran lapangan umumnya masih berupa deret waktu (*time series*) yang perlu diolah agar menghasilkan parameter fisis yang bermakna. Proses pengolahan ini bertujuan untuk mengekstraksi informasi statistik, spektral, dan arah gelombang dari data mentah, sehingga dapat digunakan dalam perencanaan dan desain teknik kelautan.

Menurut Tucker and Pitt (2001), analisis gelombang dapat dilakukan pada domain waktu (*time domain*) maupun domain frekuensi (*frequency domain*). Analisis domain waktu menghasilkan tinggi signifikan dan periode rata-rata, sedangkan analisis domain frekuensi memungkinkan identifikasi spektrum energi gelombang.

4.5.1 Pra-Pemrosesan Data

Sebelum dilakukan analisis, data mentah harus melalui tahap pra-pemrosesan (*pre-processing*) untuk memastikan kualitas dan validitas data. Langkah-langkah utamanya meliputi:

1. **Penyaringan Data (Filtering):**

Menghilangkan noise frekuensi tinggi dan komponen non-fisis menggunakan filter *low-pass* atau *band-pass*.

2. **Detrending:**

Menghilangkan tren jangka panjang (misalnya akibat pasang surut) sehingga hanya tersisa fluktuasi gelombang.

3. **Interpolasi dan Resampling:**

Menyamakan interval waktu antar data agar konsisten, misalnya setiap 0.5 detik atau 1 Hz.

4. **Quality Control:**

Menghapus data yang hilang (*missing data*), lonjakan tak wajar, atau sinyal anomali dari instrumen.

Langkah ini penting agar hasil analisis tidak bias akibat kesalahan pengukuran (Holthuijsen, 2007).

4.5.2 Analisis Domain Waktu (*Time Domain Analysis*)

Analisis ini dilakukan langsung terhadap deret waktu elevasi permukaan $\eta(t)$. Parameter utama yang dihitung antara lain:

1. Tinggi Gelombang Individual (H_i):

Jarak vertikal antara puncak dan lembah berurutan.

2. Tinggi Signifikan Gelombang (H_s):

Dihitung dari sepertiga gelombang tertinggi:

$$H_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$$

atau secara statistik dari varians permukaan:

$$H_s = 4\sigma$$

di mana σ adalah simpangan baku elevasi permukaan.

3. Periode Rata-Rata Gelombang (T_z):

Waktu rata-rata antara dua perpotongan nol berturut-turut dari permukaan air.

4. Periode Puncak (T_p):

Periode dominan yang memiliki energi terbesar (diperoleh dari analisis spektrum).

Analisis domain waktu umumnya digunakan pada sistem pemantauan lapangan real-time seperti buoy dan ADCP karena perhitungannya sederhana dan cepat (Young, 1999).

4.5.3 Analisis Domain Frekuensi (*Spectral Analysis*)

Analisis spektrum memberikan gambaran distribusi energi gelombang terhadap frekuensi. Transformasi dari domain waktu ke domain frekuensi dilakukan dengan *Fast Fourier Transform* (FFT).

Persamaan dasar transformasi Fourier:

$$S(f) = \frac{2}{T} |F(f)|^2$$

dengan:

- $S(f)$: spektrum energi (m^2/Hz),
- $F(f)$: transformasi Fourier dari deret waktu,
- T : durasi total pengamatan.

Spektrum energi kemudian digunakan untuk menghitung parameter statistik gelombang:

Parameter	Rumus	Keterangan
Momen ke-0	$m_0 = \int S(f)df$	Luas total spektrum
Momen ke-1	$m_1 = \int fS(f)df$	Energi rata-rata frekuensi
Momen ke-2	$m_2 = \int f^2S(f)df$	Variasi frekuensi
Tinggi signifikan	$H_s = 4\sqrt{m_0}$	
Periode rata-rata	$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$	
Periode puncak	$T_p = \frac{1}{f_p}$	f_p : frekuensi puncak

Metode *Welch's periodogram* sering digunakan untuk memperhalus hasil spektrum dengan membagi data menjadi beberapa segmen dan merata-ratakan hasil FFT masing-masing segmen (Tucker and Pitt, 2001).

4.5.4 Analisis Spektrum Energi Gelombang

Beberapa model spektrum empiris yang umum digunakan:

1. **Pierson-Moskowitz (PM) Spectrum**

Untuk kondisi laut berkembang penuh (fully developed sea):

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp[-\beta (\frac{f_p}{f})^4]$$

dengan $\alpha = 0.0081, \beta = 0.74$.

2. **JONSWAP Spectrum**

Untuk kondisi laut dengan fetch terbatas:

$$S(f) = S_{PM}(f)\gamma^{\exp[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}]}$$

di mana γ adalah faktor amplifikasi puncak (biasanya 3.3).

Analisis spektrum digunakan untuk membandingkan hasil pengukuran dengan model teoritis, sekaligus menilai tingkat perkembangan gelombang (Goda, 2010).

4.5.5 Analisis Arah Gelombang

Arah datang gelombang dapat dihitung menggunakan analisis koherensi silang (*cross-spectral analysis*) antara dua atau lebih sensor yang dipasang berjajar.

Rumus umum untuk arah datang gelombang rata-rata:

$$\theta(f) = \tan^{-1}\left(\frac{Q(f)}{P(f)}\right)$$

di mana $P(f)$ dan $Q(f)$ adalah komponen spektrum silang antara sinyal-sinyal pengukuran.

Dalam aplikasi ADCP, arah datang gelombang dapat diperoleh dari variasi fase antara empat beam sensor ultrasonik (Gordon, 1996).

4.5.6 Contoh Analisis Data Gelombang

Sebuah pengukuran di perairan Selat Makassar menghasilkan data elevasi permukaan selama 1 jam dengan interval 1 Hz. Setelah dilakukan pra-pemrosesan dan FFT, diperoleh parameter berikut:

Parameter	Simbol	Nilai
Tinggi signifikan	Hs	1.25 m
Periode puncak	Tp	8.5 s
Arah dominan	θ_p	210°
Energi total	E	$1.95 \times 10^3 \text{ J/m}^2$

Spektrum hasil pengolahan menunjukkan bentuk menyerupai model JONSWAP dengan nilai $\gamma = 3.2$, yang menandakan laut belum berkembang penuh. Nilai-nilai ini sejalan dengan observasi lapangan dan dapat digunakan untuk menghitung potensi energi gelombang serta gaya dinamis pada struktur pantai.

4.5.7 Pengolahan Data dengan MATLAB / Python

Analisis spektrum umumnya dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB, Python, atau OceanWaveS. Berikut contoh potongan kode untuk menghitung spektrum menggunakan MATLAB:

```
eta = load('wave_data.txt');  
fs = 2; % frekuensi sampling (Hz)  
n = length(eta);  
[S, f] = pwelch(eta, hanning(256), 128, 256, fs);  
Hs = 4 * sqrt(trapz(f, S));  
plot(f, S); xlabel('Frekuensi (Hz)'); ylabel('S(f) [m^2/Hz]');  
title('Spektrum Energi Gelombang');
```

Kode di atas menghitung spektrum energi gelombang menggunakan metode Welch dan menampilkan hasil dalam domain frekuensi.

4.6 Interpretasi Dan Aplikasi Data Gelombang

Interpretasi data gelombang merupakan tahap penting dalam menghubungkan hasil analisis data dengan perancangan dan pengelolaan sistem kelautan. Data gelombang tidak hanya memberikan informasi mengenai kondisi perairan, tetapi juga menjadi dasar perhitungan gaya dinamis pada struktur pantai dan lepas pantai, perencanaan pelabuhan, serta pemanfaatan energi gelombang laut.

Menurut Goda (2010), keberhasilan rekayasa kelautan sangat bergantung pada kemampuan memahami karakteristik gelombang di lokasi proyek, baik dalam kondisi rata-rata maupun ekstrem.

4.6.1 Parameter Kunci dalam Desain Teknik Kelautan

Beberapa parameter hasil analisis gelombang yang paling sering digunakan dalam perencanaan adalah:

Parameter	Simbol	Satuan	Kegunaan
Tinggi signifikan	Hs	m	Estimasi gaya gelombang dan desain struktur
Periode puncak	Tp	s	Menentukan periode osilasi struktur
Arah dominan	θ_p	°	Penentuan orientasi struktur pantai
Energi gelombang	E	J/m ²	Analisis potensi energi
Spektrum gelombang	S(f)	m ² /Hz	Analisis distribusi energi

Selain itu, parameter ekstrem (*extreme wave conditions*) digunakan untuk menentukan kondisi desain jangka panjang, misalnya tinggi gelombang rencana 50 tahunan (Goda, 2010).

4.6.2 Analisis Statistik Ekstrem Gelombang

Data hasil pengukuran tahunan dapat digunakan untuk memperkirakan kondisi ekstrem menggunakan metode statistik seperti analisis Gumbel atau metode distribusi ekstrem tipe I (*Extreme Value Type I*).

Persamaan umum distribusi Gumbel:

$$H_T = \bar{H} - \alpha \ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})]$$

dengan:

- H_T : tinggi gelombang rencana dengan periode ulang T (tahun),
- $\bar{H}$: nilai rata-rata maksimum tahunan,
- α : parameter skala.

Analisis ini digunakan untuk memperkirakan tinggi gelombang maksimum yang mungkin terjadi selama umur rencana struktur (biasanya 25–100 tahun).

Contoh:

Jika hasil pengukuran tahunan menunjukkan rata-rata maksimum

$\bar{H} = 3.5 \text{ m}$ dan parameter $\alpha = 0.5$, maka untuk periode ulang 50 tahun:

$$H_{50} = 3.5 - 0.5 \ln[-\ln(1 - 1/50)] = 3.5 + 1.97 = 5.47 \text{ m}$$

Artinya, tinggi gelombang rencana untuk desain 50 tahun adalah **5.47 m**.

4.6.3 Penerapan dalam Desain Struktur Pantai

Gelombang menghasilkan gaya tekan, gaya angkat, dan gaya geser pada struktur laut. Besarnya gaya bergantung pada tinggi gelombang, kedalaman air, dan bentuk struktur.

Gaya Gelombang pada Struktur Vertikal

Menurut Goda (2010), tekanan gelombang total pada dinding vertikal dapat dihitung dengan:

$$P_{max} = 0.5 \rho g H_s (1 + \cosh(kh))$$

di mana:

- ρ : massa jenis air laut ($\approx 1025 \text{ kg/m}^3$),
- g : percepatan gravitasi,
- H_s : tinggi signifikan,
- k : bilangan gelombang,
- h : kedalaman.

Gaya total pada struktur diperoleh dengan mengintegrasikan tekanan sepanjang tinggi kolom air.

Gaya Gelombang pada Tiang Silinder (Pile)

Untuk struktur tiang atau pelampung, digunakan **persamaan Morison**:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho C_D D |u| u + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt}$$

dengan:

- C_D : koefisien drag (sekitar 0.7–1.2),
- C_M : koefisien inersia (sekitar 2.0),
- D : diameter tiang,

- u : kecepatan partikel air.

Persamaan ini membagi gaya total menjadi **komponen inersia** dan **komponen drag**. Analisis ini banyak digunakan untuk desain *offshore jacket platform*, *buoy*, dan *breakwater*.

4.6.4 Aplikasi dalam Desain Pelabuhan

Gelombang berperan besar dalam penentuan layout pelabuhan dan kinerja kolam labuh. Berdasarkan analisis arah dominan dan periode puncak:

1. Orientasi breakwater ditentukan tegak lurus terhadap arah datang gelombang dominan.
2. Spektrum energi digunakan untuk menilai tingkat kebergelombang (*agitation*) di dalam kolam pelabuhan.
3. Tinggi gelombang sisa (*residual wave height*) dalam kolam harus di bawah 0.3 m agar operasi bongkar muat aman (PIANC, 2002).

Simulasi gelombang menggunakan model numerik (misalnya *SWAN* atau *MIKE 21*) dapat membantu memvalidasi hasil desain berdasarkan data hasil analisis gelombang lapangan.

4.6.5 Pemanfaatan Energi Gelombang Laut

Gelombang laut menyimpan energi potensial dan kinetik yang dapat dimanfaatkan sebagai **energi terbarukan**.

Daya per satuan panjang gelombang diberikan oleh:

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e}{64\pi}$$

dengan T_e = periode energi (biasanya mendekati T_z).

Contoh:

Untuk $H_s = 2.0 \text{ m}$, $T_e = 7 \text{ s}$:

$$P = \frac{1025 \times 9.81^2 \times 2^2 \times 7}{64\pi} \approx 26.8 \text{ kW/m}$$

Artinya, setiap meter panjang gelombang membawa energi sebesar **26.8 kW**, menunjukkan potensi besar untuk pembangkit listrik tenaga gelombang (*wave energy converter*).

4.6.6 Studi Kasus: Analisis Gelombang untuk Perencanaan Breakwater di Perairan Lombok

Data Dasar:

- Lokasi: Teluk Lombok Timur
- Hasil pengukuran:
 - $H_s = 1.8 \text{ m}$
 - $T_p = 6.5 \text{ s}$
 - $\theta_p = 225^\circ$
- Kedalaman: 8 m

Hasil Analisis:

Spektrum hasil pengolahan menunjukkan pola JONSWAP dengan $\gamma = 3.5$. Berdasarkan analisis arah, gelombang dominan datang dari arah barat daya.

Simulasi numerik menggunakan model SWAN menunjukkan tinggi gelombang di depan struktur mencapai 1.6 m. Untuk mengurangi tinggi gelombang hingga 0.3 m di area kolam labuh, diperlukan **breakwater** sepanjang 180 m dengan orientasi 45° terhadap arah gelombang dominan.

4.7 Kesimpulan

1. Data hasil analisis gelombang digunakan untuk desain struktur dan sistem kelautan.
2. Analisis ekstrem membantu menentukan tinggi gelombang rencana untuk umur desain.
3. Model gaya gelombang seperti Morison dan Goda digunakan untuk menghitung gaya dinamis pada struktur.
4. Analisis arah dan spektrum membantu menentukan orientasi pelabuhan dan ukuran breakwater.
5. Energi gelombang laut memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan sebagai energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chelton, D.B., Ries, J.C., Haines, B.J., Fu, L.L. and Callahan, P.S. (2001) *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. San Diego: Academic Press.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991) *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific.
- Goda, Y. (2010) *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific.
- Gordon, R.L. (1996) *Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation*. San Diego: RD Instruments.
- Heathershaw, A.D. and Black, K.S. (1981) 'The measurement of sea waves using a wave buoy', *Continental Shelf Research*, 1(3), pp. 187–200.
- Holthuijsen, L.H. (2007) *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nieto Borge, J.C., Rodriguez, G., Hessner, K. and González, P.I. (2004) 'Inversion of marine radar images for surface wave analysis', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(8), pp. 1291–1300.
- PIANC (2002) *Harbour Approach Channels – Design Guidelines*. Brussels: Permanent International Association of Navigation Congresses.
- Tucker, M.J. and Pitt, E.G. (2001) *Waves in Ocean Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- Young, I.R. (1999) *Wind Generated Ocean Waves*. Amsterdam: Elsevier.

BAB 5

STRUKTUR PEMECAH GELOMBANG

5.1 Pendahuluan

Pemecah gelombang (*breakwater*) merupakan salah satu struktur pesisir yang kerap diandalkan untuk melindungi garis pantai, dermaga, dan fasilitas maritim dari energi gelombang. Pentingnya memahami setiap bagian struktur pemecah gelombang meningkat seiring dengan tekanan antropogenik dan peningkatan risiko pesisir seperti kenaikan muka air laut dan frekuensi badai yang berubah sehingga desain yang tidak memperhatikan detail bagian-bagian struktur dapat mengakibatkan kegagalan fungsi dan biaya perbaikan yang besar. Penelitian dan tinjauan terbaru menekankan kebutuhan rekayasa yang adaptif terhadap kondisi lokal dan perubahan iklim untuk menjamin keandalan struktur jangka panjang. (C Lim, 2024)

Memahami bagian-bagian struktur — seperti inti (*core*), lapisan filter, lapisan pelindung (*armor*), pondasi dan mahkota (*crest*) bukan hanya persoalan terminologi teknis, melainkan juga kunci dalam menentukan perilaku hidrodinamika dan mekanika struktur terhadap serangan gelombang. Setiap elemen memiliki peran fungsional yang spesifik misalnya armor layer mereduksi energi gelombang dan mencegah kerusakan permukaan, sedangkan lapisan filter mencegah kehilangan material inti melalui gerusan. Studi eksperimental dan numerik terbaru terus-menerus dilakukan untuk memeriksa bagaimana variasi geometri dan material pada tiap lapisan mempengaruhi stabilitas dan transmisi gelombang (P.Mare-Nasarre, 2022)

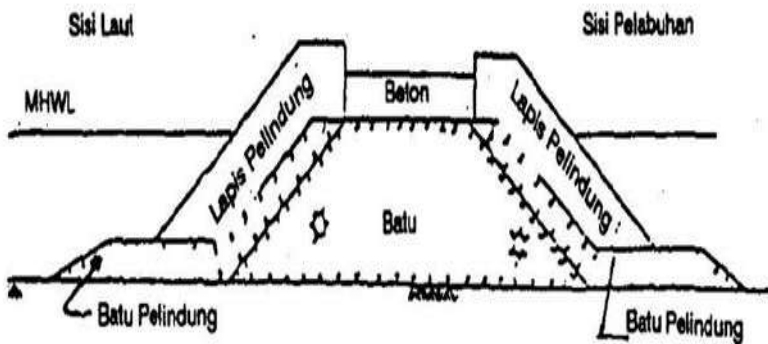
Hubungan langsung antara perancangan bagian-bagian struktur dengan performa proteksi pantai dapat dilihat dari bagaimana parameter desain misalnya ukuran unit armor, gradasi filter, elevasi mahkota memengaruhi kerusakan, overtopping, dan perubahan morfologi di sekitarnya. Rumus dan pendekatan perancangan klasik masih menjadi dasar, tetapi kajian-kajian terbaru

menunjukkan perlunya adaptasi atau koreksi terhadap kondisi surf zone, gelombang pecah, dan kedalaman dangkal agar prediksi stabilitas lebih akurat di lingkungan modern. Karena itu, analisis terintegrasi antar-bagian sangat diperlukan agar struktur berfungsi efektif sambil meminimalkan dampak samping seperti pengaruh pada sedimentasi dan ekosistem pesisir.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, sub-bab ini bertujuan: (1) menjelaskan peran dan fungsi masing-masing bagian struktur pemecah gelombang; (2) menguraikan prinsip-prinsip desain dan parameter teknis utama yang mengikat antar-bagian; (3) meninjau studi dan perkembangan terkini yang relevan untuk praktik perancangan; serta (4) memberi pedoman interpretatif untuk bagaimana memilih dan mengintegrasikan material serta elemen struktur agar tercapai tujuan proteksi pantai yang efisien dan berkelanjutan. Bagian ini akan menjadi landasan teknis bagi sub-bab berikutnya yang akan membahas desain kuantitatif, metode analisis, dan studi kasus. (Leng, S., 2024)

5.2 Bagian Inti (*Core*)

Bagian inti atau core dari pemecah gelombang adalah lapisan terdalam yang memberikan dukungan struktural utama terhadap seluruh beban hidrodinamika dan beban statis. Fungsi inti sebagai pondasi utama mencakup menahan tekanan gelombang, mentransfer beban ke lapisan bawah, serta menjaga kesetimbangan massa untuk mengurangi kemungkinan pergeseran atau runtuh. Tanpa inti yang memadai, struktur pemecah gelombang rentan terhadap kerusakan akibat gelombang besar, erosi internal (*internal erosion*) atau bahkan kegagalan fondasi. Pada pengujian eksperimen dan model skala fisik terkini, inti terbukti sangat menentukan performa breakwater dalam menahan overtopping dan run-down gelombang (S. Marino, 2025). Berikut ini di sajikan



Gambar 5.1. Pemecah gelombang sisi miring

Material yang digunakan untuk inti biasanya berupa batu pecah (*crushed rock*), *rubble*, atau *quarry run*, serta material agregat granular lokal yang memiliki gradasi (range ukuran butir) yang lebar. Sebuah studi mengenai wide graded material menunjukkan bahwa *quarry run* dengan gradasi yang lebar (misalnya hingga berat potongan 500 kg atau 1000 kg) dapat digunakan sebagai inti breakwater yang efektif, asalkan dilapisi kemudian dengan lapisan filter dan armor. Tipe batu yang dipilih harus memiliki karakteristik kekerasan dan tahan terhadap pelapukan agar masa layan lebih panjang. Selain itu, material inti harus tersedia secara lokal atau mudah diangkut sehingga biaya konstruksi tetap efisien. (T van der Plas, 2017)

Syarat teknis inti mencakup beberapa parameter penting: porositas, stabilitas mekanik, dan permeabilitas. Porositas inti harus cukup tinggi agar memungkinkan drainase air internal dan menahan terjadinya tekanan pori yang berlebih selama siklus gelombang (*inflow dan outflow*). Namun, jika porositas terlalu besar dan terlalu banyak rongga besar tanpa dukungan filter yang baik, inti bisa mengalami penghilangan material internal (*core wash-out*) yang mengancam keelastisan struktur.

Stabilitas mekanik melibatkan kemampuannya menahan geser internal, beban plastis akibat tekanan gelombang dan gravitasi, serta pengaruh saturasi air dalam inti. Material harus ditata

sedemikian rupa agar kontak antar urukan cukup kuat, dengan faktor pemadatan dan distribusi ukuran butir sebagai variabel kritis. Permeabilitas inti harus mampu membiarkan air pori mengalir, sehingga mencegah tekanan air terperangkap yang dapat mengurangi kestabilan efektif, sekaligus tidak terlalu besar agar tidak memicu erosi partikel halus. Penggunaan filter proper atau geotekstil di sekeliling inti sering diperlukan sebagai proteksi tambahan.

Beberapa studi terkini menguji performa inti dengan variasi material dan gradasi materi untuk memahami toleransi terhadap kondisi gelombang ekstrem dan beban hidrodinamika. Misalnya, dalam physical model tests berbagai konfigurasi lapisan inti diuji untuk menentukan faktor permeabilitas nominal (*notional permeability factor*) yang aman dalam struktur tujuh lapis, serta efek inti terhadap overtopping dan run-up.

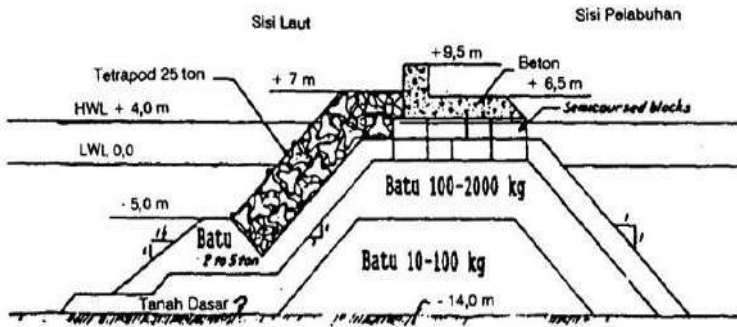
Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi material yang tepat (*quarry run* atau agregat lokal dengan gradasi lebar), permeabilitas yang cukup tinggi, dan pemadatan yang memadai dapat mengurangi overtopping serta memperlambat kerusakan akibat gelombang tinggi. (S. Marino, 2025).

Dengan memahami fungsi, material, dan syarat teknis inti, desain bagian inti pemecah gelombang dapat dioptimalkan bukan hanya untuk kekuatan struktural, tetapi juga untuk efisiensi biaya dan keberlanjutan jangka panjang. Kesesuaian material inti dengan kondisi lokal, seperti ketersediaan batu lokal, karakteristik gelombang, dan kapasitas transportasi material, harus menjadi pertimbangan utama. Selain itu, integrasi antara inti, filter, dan armor harus dirancang sedemikian rupa agar interaksi antar lapisan bekerja maksimal, menghindari kegagalan parsial yang bisa menyebar ke seluruh struktur.

5.3 Lapisan Filter (*Filter Layer*)

Lapisan filter pada struktur pemecah gelombang berfungsi utama untuk mencegah erosi material inti dengan mengizinkan aliran air pori keluar masuk tanpa memindahkan butir-butir inti yang lebih halus. Dengan kata lain, filter memblokir partikel inti (*retention*) sambil tetap menyediakan permeabilitas yang cukup untuk drainase internal; jika fungsi ini tidak terpenuhi, dapat terjadi piping atau

internal erosion yang berujung pada penurunan stabilitas struktur. Peran ini telah dikonfirmasi oleh kajian teoretis dan praktik rekayasa pesisir modern yang menekankan perlunya filter yang kompatibel secara mekanik dan hidraulik dengan material inti.



Gambar 5.2. Susunan lapisan pemecah gelombang sisi miring

Jenis filter yang umum dipakai dibagi menjadi dua kelompok besar: filter granular (batu gradasi / graded stone) dan geosintetik (geotekstil, geonet, atau geotube). Filter granular tradisional dibuat dari lapisan batu bergradasi yang ditempatkan di antara inti dan lapisan armor untuk menahan partikel inti; pendekatan ini dikenal karena ketahanan mekaniknya dan mudahnya inspeksi. Di sisi lain, geotekstil (woven/non-woven) menjadi pilihan populer dalam situasi tertentu karena kemudahan konstruksi, kemampuan filtrasi awal yang baik, dan fleksibilitas penggunaan (mis. geotube sand containers). Namun, penggunaan geotekstil memerlukan perhatian khusus terhadap ketahanan abrasi dan risiko penyumbatan jangka panjang. (Van der Meer, J., 2017)

Prinsip desain gradasi material filter berfokus pada dua kriteria utama: retensi (kemampuan menahan butir inti) dan permeabilitas/hidraulika (kemampuan mengalirkan air pori tanpa menimbulkan tekanan berlebih). Pada filter granular, aturan desain tradisional memperhitungkan rasio ukuran butir antara lapisan yang berdekatan (mis. aturan gradasi lebar dan batas D-values seperti D50, D15) sehingga butir-butir lapisan bawah tidak lolos ke lapisan atas. Untuk geotekstil, langkah desain meliputi pengujian retensi

butir (aperture), uji permeabilitas, dan evaluasi kemungkinan clogging serta ketahanan mekanik—semua ini dirangkum dalam prosedur desain berlapis yang juga mempertimbangkan kondisi lapangan. (Kalore, S., 2023)

Beberapa pedoman praktis modern merangkum peraturan empiris untuk memilih ukuran dan ketebalan filter. Misalnya, peraturan numerik/panduan desain pada alat bantu perancangan menyarankan rentang nominal (contoh: nilai M50 untuk underlayer dibandingkan dengan M50 untuk armor) agar permeabilitas dan kemampuan penahan partikel tercapai; rasio-rasio semacam ini membantu menentukan batas bawah dan atas ukuran butir filter relatif terhadap armor dan inti. Pendekatan campuran (hybrid) yang menggabungkan geotekstil dengan lapisan granular juga banyak dieksplorasi untuk menggabungkan keuntungan kedua tipe filter—kekuatan mekanik granular dan kemudahan konstruksi geosintetik.

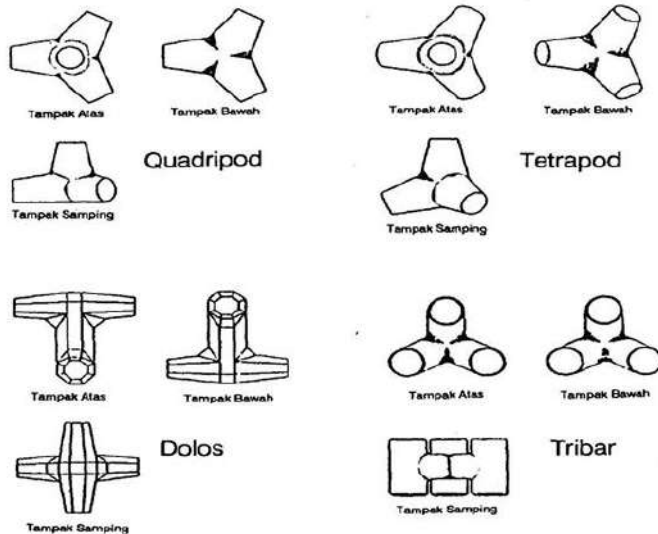
Isu terkini yang penting dalam desain filter adalah risiko clogging (penyumbatan) pada geotekstil, perubahan permeabilitas akibat partikel halus yang terperangkap, dan degradasi material karena abrasi atau UV. Oleh karena itu kajian-kajian eksperimental dan numerik baru menekankan perlunya uji lapangan/laboratorium yang merepresentasikan kondisi gelombang dan sedimen lokal, serta pemantauan jangka panjang setelah konstruksi. Kombinasi data uji, pedoman empiris, dan analisis probabilistik untuk retensi/permeabilitas kini direkomendasikan untuk memastikan fungsi filter sepanjang umur layanan struktur. (Tophoff, L., 2024.)

5.4 Lapisan Pelindung (*Armor Layer*)

Lapisan pelindung, atau armor layer, adalah bagian luar dari pemecah gelombang yang langsung berinteraksi dengan gelombang. Perannya sangat kritis dalam meredam energi gelombang melalui beberapa mekanisme — misalnya dissipasi (pecah gelombang), refleksi sebagian, gesekan antar unit armor, serta interlocking antar unit. Dengan demikian, armor layer menentukan seberapa besar puncak gelombang yang masih dapat melewati struktur (*overtopping*) dan juga mempengaruhi kerusakan material di bawahnya. Penelitian-eksperimen terbaru menyatakan bahwa kegagalan lapisan armor sering disebabkan oleh kombinasi tinggi

gelombang, periode gelombang, serta kondisi foreshore (kedalaman di depan struktur), terutama bila struktur berada di perairan dangkal. (Van der Meer, dkk, 2024)

Material armor tradisional berupa batu besar (*rock armour*) tetap banyak digunakan karena ketersediaan dan kekuatan mekaniknya. Namun dalam beberapa dekade terakhir, unit beton khusus seperti Tetrapod, Dolos, Accropode, Xbloc, dan Piblok telah dikembangkan sebagai alternatif, terutama ketika batu alami dengan ukuran dan kualitas yang dibutuhkan sulit diperoleh. Unit-unit beton ini menawarkan keuntungan berupa interlocking yang lebih baik, kontrol lebih presisi dalam geometri, serta potensi pengurangan volume material beton melalui desain berporositas tinggi. Berikut ini adalah contoh gambar lapisan pelindung;



Gambar 5.3. Jenis-jenis lapisan pelindung

Misalnya, studi di kawasan pesisir yang menggunakan Accropode II dan Xbloc menunjukkan performanya kompetitif dalam soal stabilitas dan overtopping dibanding armor batu di kondisi tertentu. (Uğurlu, A., 2024).

Kriteria stabilitas armor telah lama dikembangkan dalam literatur, dengan formulasi klasik seperti Hudson dan Van der Meer yang paling banyak dijadikan acuan. Rumus Hudson dasar sering

digunakan untuk perkiraan awal, terutama untuk batu besar, dengan parameter seperti *stability coefficient* (K_D), berat unit armor, sudut lereng, dan hubungan antara berat batu dengan tinggi gelombang. Namun, untuk kasus yang lebih kompleks seperti unit beton interlocking atau situasi gelombang pecah di perairan dangkal, rumus Van der Meer dan versi-versinya (termasuk revisi untuk kedalaman dangkal) dianggap lebih akurat karena mempertimbangkan jumlah gelombang, periode spektral, permeabilitas struktur, dan tingkat kerusakan. (Van der Meer, dkk, 2024). Penelitian terkini menunjukkan bahwa aspek aspek non-tradisional seperti orientasi penempatan unit armor (*placement method*), kepadatan susunan (*packing density*), dan toleransi antar unit memberikan pengaruh besar terhadap stabilitas. Misalnya, eksperimen fisik pada unit cubic dan single-layer interlocking menunjukkan bahwa cara pemasangan dan kemiringan lereng armor dapat memperkecil atau memperbesar kerusakan armor secara signifikan. Selain itu, karakteristik gelombang seperti spectral period atau periode energi gelombang memiliki efek yang lebih kuat pada struktur armor di perairan dangkal, sehingga formulasi Van der Meer yang terbaru memasukkan parameter-parameter tersebut untuk meningkatkan akurasi prediksi stabilitas. (Van der Meer, dkk, 2024)

Dalam desain praktis, penerapan kriteria stabilitas armor mengharuskan keseimbangan antara keamanan (*safety*) dan biaya serta kemudahan konstruksi. Pemilihan material harus mempertimbangkan berat unit, ketersediaan, daya tahan terhadap abrasi dan benturan mekanik, serta kemudahan pemasangan di lokasi. Unit beton interlocking dapat lebih mahal dan lebih rumit dipasang dibanding batu alam, namun keuntungan dalam pengurangan ukuran unit dan potensi penghematan volume serta pengurangan dampak lingkungan (misalnya pengurangan emisi karbon dalam produksi beton) juga semakin banyak yang dibahas. (Uğurlu, A., 2024)

5.5 Lapisan Penunjang (*Secondary Layer*)

Lapisan penunjang (sering pula disebut underlayer, secondary layer, atau *transition layer*) berfungsi sebagai lapisan perantara antara lapisan armor dan lapisan filter/intinya. Fungsi

utamanya adalah meratakan distribusi beban dari armor ke lapisan bawah, melindungi geotekstil (jika ada) dari tusukan oleh unit armor, mengurangi gradien tekanan hidrolik pada filter di bawahnya, serta meningkatkan interlocking antara armor dan lapisan bawah supaya kestabilan keseluruhan struktur meningkat. Dalam praktik desain, ketidakhadiran atau ketidaksesuaian lapisan penunjang sering terlihat sebagai penyebab awal kerusakan armor yang kemudian berkembang menjadi kerusakan lebih lanjut

Jenis material yang digunakan pada lapisan penunjang biasanya berupa material granular bergradasi (*stone underlayer / quarry run*) atau kombinasi granular-geosintetik pada kondisi tertentu. Material harus cukup kasar untuk menahan penetrasi dari armor di atas, namun tidak terlalu kasar sehingga menciptakan zona berpori besar yang memicu ketidakstabilan. Pada beberapa desain modern, lapisan penunjang tipis ditempatkan di atas geotekstil untuk memberi proteksi awal terhadap geotekstil sekaligus menyediakan transisi gradasi ukuran yang lebih halus antara armor besar dan filter halus. Pilihan antara granular penuh atau hybrid bergantung pada ketersediaan material, biaya pengangkutan, dan kondisi fondasi lokal.

Persyaratan gradasi lapisan penunjang menitikberatkan pada hubungan ukuran butir relatif terhadap ukuran nominal armor dan filter di bawah. Prinsip umum dari studi-studi perancangan menyarankan bahwa ukuran butir minimum lapisan penunjang harus cukup besar untuk mencegah pergerakan ke atas (*finer migration*) tetapi tidak terlalu besar sehingga mengurangi kemampuan interlocking dengan armor. Beberapa pedoman empiris—yang dirangkum dalam Rock Manual dan paper Van der Meer—menunjukkan rasio ketebalan lapisan penunjang terhadap ukuran nominal armor (mis. beberapa D_{n50} armor) sebagai parameter kunci: lapisan yang terlalu tipis (mis. $< 0.5 \cdot D_{n50A}$) dapat menyebabkan kegagalan awal, sedangkan lapisan cukup tebal (mis. $\geq 1-2 \cdot D_{n50A}$ tergantung konfigurasi) memberikan pengurangan kerusakan armor yang signifikan. (Van der Meer, dkk, 2024)

Ketebalan lapisan penunjang juga harus memperhatikan fungsi proteksi geotekstil (jika digunakan), serta kecenderungan untuk bekerja sebagai 'toe berm' di bagian dasar struktur. Pedoman

praktis modern sering merekomendasikan ketebalan minimal (contoh praktis: ≥ 60 cm dalam beberapa situasi desain) serta rentang ukuran butir nominal 10–20 cm untuk lapisan granular penunjang pada kondisi tertentu—tetapi angka ini perlu disesuaikan berdasarkan hasil uji laboratorium/model fisik dan kondisi gelombang lokal. Studi eksperimen terbaru menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan penunjang dapat secara signifikan mengurangi angka kerusakan armor sampai pada level yang ekonomis, namun ada trade-off biaya material dan mobilisasi.

Dalam perancangan terintegrasi, lapisan penunjang perlu dipandang sebagai bagian aktif dari sistem: gradasi dan ketebalan harus dipilih berdasarkan interaksi dengan armor, filter, dan kondisi sedimen dasar. Pendekatan terbaik menggabungkan pedoman empiris (mis. Van der Meer), hasil uji model fisik, dan penyesuaian lapangan (*availability of material*, kemampuan pemasangan). Selain itu, monitoring pasca-konstruksi (mis. survei UAV, inspeksi visual) direkomendasikan untuk memastikan lapisan penunjang berfungsi seperti yang direncanakan dan untuk mendeteksi kebutuhan perbaikan dini sebelum kerusakan yang lebih besar terjadi

5.6 Pondasi dan Perlindungan Dasar

Pondasi adalah bagian krusial dari struktur pemecah gelombang yang bertugas mencegah penurunan (*settlement*) dan pergeseran (*sliding*) akibat beban gelombang, beban struktur, serta gaya hidrodinamis bawah permukaan. Tanpa pondasi yang memadai, struktur bisa mengalami penurunan diferensial atau bahkan bergeser, yang dapat menyebabkan kegagalan struktural. Pada jenis pemecah gelombang yang menggunakan caisson atau elemen beton besar, pondasi sering dibangun di atas stone bedding (lapisan batu pecah), atau langsung ke bedrock jika memungkinkan, untuk stabilitas maksimum. Contoh praktek modern menunjukkan bahwa penggunaan stone bedding minimal atau pondasi beton in situ membantu mengendalikan penurunan dan meningkatkan kestabilan basal secara signifikan.

Perlindungan terhadap gerusan dasar atau scour protection menjadi elemen penting untuk menjaga integritas pondasi dan elemen dasar struktur. Scour bisa terjadi di daerah toe (ujung dasar),

di sekitar pondasi, atau di antara sambungan struktur dengan dasar laut jika arus atau gelombang menyebabkan pengikisan sedimen. Untuk mencegahnya digunakan berbagai metode: batu armour di sekeliling toe, pemasangan mattress beton, penggunaan blok beton pelindung, atau geobag yang diisi material lokal. Teknologi perlindungan dasar terus dikembangkan; sebuah studi baru menyebutkan bahwa penggunaan in-situ concrete mattress sebagai pelindung toe dari caisson memberikan perlindungan yang lebih efektif terhadap uplift dan penetrasi gelombang dibanding metode tradisional dengan batu armour.

Penggunaan mattress beton atau concrete mattress, batu bronjong (gabion) atau blok beton sebagai elemen pelindung dasar memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Concrete mattress menawarkan permukaan yang kontinu, kedap, dan dapat diset sesuai kontur dasar laut sehingga mengurangi banyak adanya celah-celah yang bisa menjadi pintu masuk gelombang dan arus bawah. Batu bronjong cocok untuk kondisi dengan kebutuhan fleksibilitas dan ventilasi sedimen karena bronjong dapat membiarkan air dan sedimen lewat sambil tetap memegang struktur. Blok beton pelindung atau precast units memberikan kestabilan tinggi terhadap gelombang kuat tapi memerlukan bobot besar dan pemasangan presisi tinggi, serta sambungan yang kuat agar tidak mengalami perpindahan.

Dalam desain pondasi dan perlindungan dasar, ada beberapa parameter teknik yang harus dipenuhi: kedalaman pondasi terhadap level scour maksimum, ketebalan dan kekuatan material mattress atau blok, kepadatan susunan batu untuk bedding layer, dan kemampuan material pelindung mempertahankan kestabilan terhadap gaya uplift, tekanan gelombang pangkalan, dan geser basal. Misalnya dalam studi kasus Pittenweem dan Porto do Topo disebutkan bahwa untuk proteksi toe beton in situ thickness (ketebalan) sekitar 1 m untuk sisi laut dan 0,5 m pada sisi dermaga telah dipilih berdasarkan evaluasi aparat terhadap beban gelombang dengan H_s sekitar 4,5-5,5 m.

Aspek lain yang kian diperhatikan adalah kemampuan penyambungan (*jointing*) antar panel mattress atau antar blok, pengikatan ke struktur utama (seperti *caisson*), serta perlindungan

terhadap edge scour (gerusan pinggiran) pada basis luar perlindungan. Detail tepi (*toe embedment*), overlap pergabungan, dan anchorage ke elemen struktur seringkali menjadi faktor penentu apakah perlindungan dasar mampu berfungsi sesuai rancangan. Studi terkini juga menyoroti bahwa perlindungan beton yang impermeabel mengurangi aliran air di bawah elemen struktur dan tekanan uplift yang terkait, sehingga masa layanan dan keandalan meningkat.

5.7 Mahkota (*Crest*) dan Jalan Inspeksi

Mahkota (*crest*) pemecah gelombang berfungsi sebagai penghalang utama terhadap limpasan gelombang (*overtopping*) dan titik kontak terakhir antara laut dan bagian atas struktur. Desain mahkota yang memadai mengontrol jumlah dan intensitas limpasan yang masuk ke daerah di belakang struktur, sehingga berperan penting dalam keselamatan fasilitas pantai, dermaga, dan area darat di baliknya. Selain fungsi hidraulik, bagian mahkota juga memberikan ruang untuk elemen tambahan seperti parapet, selokan pembuangan limpasan, dan akses operasi yang semuanya turut mempengaruhi performa *overtopping* dan keselamatan struktur. Perhitungan *overtopping* dan parameter desain mahkota saat ini banyak merujuk pada pedoman EurOtop yang paling baru untuk memprediksi debit rata-rata maupun kejadian limpasan ekstrem. (EurOtop, 2018)

Elevasi mahkota harus ditetapkan berdasarkan kriteria gelombang rencana (*design wave*) dan batas toleransi *overtopping* yang ditetapkan untuk fungsi bangunan di belakangnya (mis. area publik, fasilitas industri, atau permukiman). Pendekatan praktis menggunakan prediksi *overtopping* (*mean overtopping rate* dan distribusi kejadian ekstrem) untuk menentukan freeboard yang memberi batas toleransi paling kecil sesuai kategori risiko. Selain itu, faktor-faktor pengaruh seperti kondisi dangkal di depan struktur, periode gelombang spektral, dan kemungkinan pembentukan run-up harus dimasukkan dalam analisis sehingga elevasi mahkota tidak hanya menoleransi kondisi normal tetapi juga peristiwa ekstrem. Pedoman nasional dan internasional (mis. FEMA, EurOtop)

merekomendasikan memperhitungkan skenario kenaikan muka laut dan perubahan iklim saat menentukan elevasi jangka panjang.

Lebar dan bentuk mahkota juga mempengaruhi perilaku gelombang—mahkota yang lebih lebar mengurangi kecepatan aliran limpasan sehingga menurunkan kerusakan pada bagian belakang, sementara parapet atau dinding mahkota dapat mengurangi debit limpasan tetapi dapat meningkatkan beban aerodinamis dan hidrodinamik lokal. Penelitian eksperimental dan numerik terbaru menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti kekasaran permukaan mahkota, keberadaan parapet, dan konfigurasi dinding mahkota harus dimasukkan sebagai faktor pengurang atau pengali pada formula prediksi overtopping untuk mendapatkan estimasi yang lebih akurat. Oleh karena itu desain mahkota sebaiknya mempertimbangkan trade-off antara pengurangan overtopping, biaya konstruksi, dan kemudahan pemeliharaan. (Eldrup, M.R., dkk., 2022)

Untuk fungsi operasional dan pemeliharaan, mahkota sering dirancang untuk menampung jalan inspeksi atau jalur akses—baik berupa jalan kerikil, beton, maupun paving—yang memungkinkan personel dan peralatan mencapai seluruh panjang pemecah gelombang untuk inspeksi visual, pemeliharaan armor, dan perbaikan darurat. Spesifikasi lebar jalan, konstruksi perkerasan, dan pengaman (*railings, parapet*) perlu disesuaikan dengan frekuensi akses, jenis kendaraan yang akan lewat (mis. kendaraan berat pengangkut material), dan kondisi lingkungan (korosi udara laut, kebasahan limpasan). Praktik terbaik merekomendasikan percobaan beban dan detail drainase di mahkota supaya jalan inspeksi tidak mempercepat kerusakan struktur akibat genangan atau infiltrasi air laut.

Aspek keselamatan personel dan kontinuitas operasi juga menuntut desain elemen pendukung seperti tangga akses, area parkir sementara untuk peralatan, dan jalur evakuasi apabila overtopping ekstrem terjadi. Selain itu, sistem pembuangan limpasan yang memadai (*drain outlets, downpipes*) harus dirancang sehingga limpasan yang melewati mahkota tidak menggenang di jalan inspeksi atau menimbulkan erosi pada sisi darat. Dalam konteks adaptasi iklim, beberapa proyek modern juga merencanakan kemungkinan

peningkatan elevasi mahkota atau pemasangan parapet sementara/modular yang dapat ditambah kemudian—sebuah pendekatan yang memberi fleksibilitas biaya dan operasional jangka panjang. (Eldrup, M.R., dkk., 2022)

Monitoring pasca-konstruksi dan inspeksi berkala pada mahkota dan jalan inspeksi sangat penting untuk mendeteksi awal kerusakan seperti ketergerusan permukaan, rongga di bawah perkerasan, deformasi parapet, atau titik-titik kebocoran akibat limpasan. Teknologi modern seperti fotogrametri UAV, LiDAR permukaan, dan sensor tekanan/kelembapan embedded dapat mempercepat identifikasi masalah dan mendukung keputusan pemeliharaan berbasis kondisi. Rencana pemeliharaan terstruktur (*schedule* inspeksi, kriteria toleransi kerusakan, prosedur perbaikan cepat) harus menjadi bagian integral dari dokumen desain sehingga mahkota tetap berfungsi aman selama umur layanan yang diharapkan

5.8 Struktur Tambahan

Struktur tambahan pada bangunan pemecah gelombang mencakup elemen-elemen yang memperkuat sisi dalam (*revetment*), drainase internal, serta fasilitas akses dan pemeliharaan. Perkuatan sisi dalam atau *revetment* adalah lapisan pelindung di sisi darat atau sisi belakang struktur yang langsung berhadapan dengan daerah terlindung dari gelombang. *Revetment* ini membantu mencegah erosi bagian belakang struktur akibat gelombang yang membelok atau limpasan yang tidak tertampung sepenuhnya oleh armor dan bagian utama. Studi-terkini menunjukkan bahwa desain *revetment* yang memadai (kemiringan, material, permukaan) dapat sangat mengurangi kecepatan arus yang merembes di belakang breakwater dan mencegah terciptanya zona erosi di sisi dalam.

Selain *revetment*, *drainase* internal menjadi elemen penting untuk menjaga kestabilan struktural dan memperpanjang umur layanan. Air yang meresap melalui armor dan filter harus dibuang secara terkendali agar tidak terperangkap dan menimbulkan tekanan pori yang tinggi yang dapat mengurangi kestabilan internal. Sistem drainase internal biasanya terdiri dari lapisan porus atau pipa-drain yang terbenam di dalam struktur, sering dipasang di

interface antara inti atau filter dengan lapisan bawah atau sisi terlindung. Penelitian fisik dan numerik terbaru telah menunjukkan bahwa kegagalan dalam sistem drainase internal sering muncul sebagai penyebab utama *core wash-out* (hilangnya material inti) atau keruntuhan lokal pada struktur breakwater. (St Bernard Parish, Louisiana, 2024)

Fasilitas tambahan seperti akses pemeliharaan, penerangan, dan sistem keselamatan semakin dianggap sebagai komponen mendasar dalam desain modern breakwater. Akses pemeliharaan yang baik mencakup jalan inspeksi di mahkota atau area pelabuhan, tangga atau ramp untuk turun ke area dasar, serta platform observasi. Fasilitas ini memungkinkan pemeriksaan rutin armor, revetment, dan elemen pelindung lainnya untuk mendeteksi kerusakan sedini mungkin. Penerangan di area mahkota, jalan inspeksi, dan akses umum membantu penggunaan yang aman, terutama dalam kondisi visibilitas rendah seperti malam hari atau cuaca buruk. Artikel terbaru mengenai breakwater di New Harbor Island misalnya menyebut bahwa pemasangan lampu dan tanda peringatan permanen dianggap penting untuk keamanan publik sepanjang waktu.

Desain revetment harus memperhitungkan kemiringan sisi, permukaan, dan material yang digunakan agar mampu menahan impulse gelombang yang mungkin datang dari belakang atau samping struktur. Material revetment bisa berupa batu alam, beton pra-cetak, atau kombinasi elemen terbuka seperti gabion dan bronjong. Permukaan revetment yang kasar atau bertekstur dapat membantu mengurangi kecepatan air serta memecah aliran limpasan yang melewati sisi dalam struktur, sehingga mengurangi risiko erosi di titik-titik kritis. Beberapa penelitian menggarisbawahi bahwa revetment beton dengan tekstur atau profil berundak di sisi dalam lebih tahan terhadap limpasan dibanding permukaan halus. (K He, 2025)

Drainase internal yang baik juga harus disertai dengan pengelolaan air limpasan, baik dari overtopping maupun hujan, agar tidak terkumpul di jalan inspeksi atau di belakang mahkota revetment, yang dapat menyebabkan infiltrasi ke dalam struktur atau mempercepat degradasi material. Pemasangan saluran drainase

(pipa, parit), lapisan geotekstil sebagai lapisan penyaring, serta proteksi terhadap korosi pada elemen logam atau sambungan drainase adalah beberapa detail yang harus diperhatikan. Studi terkini menyebut bahwa keberadaan drainase yang tersumbat atau tidak memadai dapat memperburuk kegagalan lepasnya armor dan material revetment saat gelombang ekstrem.

Akhirnya, fasilitas tambahan juga harus dipandang dalam konteks kemasyarakatan dan lingkungan. Akses umum ke breakwater sering menjadi area rekreasi, sehingga desain akses, keamanan, dan estetika menjadi penting. Tanda-peringatan, pagar pelindung, dan desain taman atau ruang jalan yang aman dapat meningkatkan nilai publik sekaligus melindungi struktur dari vandalisme atau kegagalan akibat penggunaan manusia. Selain itu, penerangan dan signage keselamatan harus direncanakan agar tahan lingkungan laut—termasuk tahan korosi dan mematuhi standar keselamatan. Evaluasi kasus-nyata dari proyek-proyek pelabuhan kecil dan pulau-pulau terpencil menunjukkan bahwa fasilitas tambahan yang diabaikan sering menjadi titik lemah dalam pemeliharaan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Lim, C., 2024. Evaluation of beach response due to construction of submerged detached breakwaters: implications for shoreline change. *Frontiers in Marine Science*, 2024. (Frontiers)
- Mares-Nassarre, P., 2021. Armor Damage of Overtopped Mound Breakwaters in Depth-Limited Breaking Wave Conditions. *Journal of Marine Structures* (MDPI/Elsevier), 2021/2022. (MDPI)
- Scaravaglione, G., 2025. The influence of shallow water on rock armour stability. Delft University of Technology (PDF). (TU Delft Research Portal)
- Van der Meer, J.W., 1987. Stability of breakwater armour layers—design formulae. *Coastal Engineering*, 11, pp. 219–239. (ScienceDirect)
- Leng, S., 2024. Wave dissipation effect of a new combined breakwater and its performance. *Advances in Bridge Engineering & Navigation (or similar conference/journal)*, 2024. (SpringerOpen)
- de Ridder, M.P., 2024. Wave overtopping discharges at rubble mound structures: physical model experiments with shallow water. *Coastal Engineering*, [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383924001741> (ScienceDirect)
- Marino, S., 2025. Experimental study on the hydraulic performance and overtopping of rubble mound breakwater. *Coastal Engineering*, 2025. (ScienceDirect)
- Van der Plas, T., Van der Meer, J., Dominguez, E. and Bijl, E., 2017. Stability of very wide graded material, designed as breakwater core, under wave attack. *Proceedings of ... / Journal*, 2017. (vandermeerconsulting.nl)
- Stability of rubble mound breakwaters and shore revetments, 2025. *CoastalWiki*, 13 May 2025. [online] Available at: https://www.coastalwiki.org/wiki/Stability_of_rubble_mound_breakwaters_and_shore_revetments (Coastal Wiki)
- Physical Model Tests — Notional Permeability Factor, 2025. *Stability of Rubble Mound Breakwaters—A Study of the Notional*

- Permeability Factor Based on Physical Model Tests. (ResearchGate)
- Scaravaglione, G., 2025. The influence of shallow water on rock armour stability. *Coastal Engineering*, [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383924002059> (ScienceDirect)
- Uğurlu, A., 2024. Assessment of Single-Layer Armor Units in Breakwater Design under Significant Wave Height and Extreme Conditions. *Journal of Coastal Research*, 113(SP1), [online] Available at: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-113/issue-sp1/JCR-SI113-130.1.short> (BioOne)
- Safari, I., 2023. Hydraulic Response and Overtopping Performance of Rock and Concrete Armor Units in Rubble Mound Breakwaters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), article 1382. (MDPI)
- Van der Meer, J.W., Lykke Andersen, T. & Eldrup, M.R., 2024. Rock armour slope stability under wave attack in shallow water. *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, Vol. 4, Paper 35. (vandermeerconsulting.nl)
- Wehlitz, C.F.M., 2023. Hydraulic stability of the new Cubilok™ armour unit on a 3:... slope. *Coastal Engineering*, [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383923000376> (ScienceDirect)
- Lim, J.-H., Kim, Y.-M. & Yoon, H.-D., 2024. Experimental study on the effect of wind on armor stone stability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, article 499. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824000679?utm_source=chatgpt.com. (coastalwiki.org)
- Lee, T., Hwang, T. & Kim, T., 2025. Physical and numerical investigations on wave run-up and dissipation under breakwater with fence revetment. *Coastal Engineering Journal*, 2025. Available via ResearchGate preprint. (ResearchGate)
- Mamo, L.T., Roes, M., Laroche, K. & Jones, P., 2021. Upgrades of coastal protective infrastructure affect benthic community composition. *Journal of Applied Ecology*, (2021). Available at:

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1/1365-2664.13736> — (relevant untuk tambahan struktur seperti revetment dan akses). (British Ecological Society Journals)

City of Port Washington, 2022. Project improvements to breakwater access and safety. Available at: <https://www.portwashingtonwi.gov/Home/Components/News/News/172/140> (akses publik dan fasilitas tambahan). (portwashingtonwi.gov)

New Harbor Island Breakwater Project, 2024. Permanent warning signs and lights installation along the detached Rock Breakwater at New Harbor Island. Alternatives Analysis Report. Available at: https://coastal.la.gov/wp-content/uploads/2025/01/Attachment-5/PO-0199_Alternatives-Analysis-Report-FINAL_REV-3_12-09-2024_reduced.pdf (coastal.la.gov)

BAB 6

STRUKTUR GROIN

6.1 Konsep Dasar Groin

Struktur groin telah menjadi bagian integral dalam pengelolaan wilayah pesisir, khususnya pada area yang rawan terhadap erosi dan pergeseran garis pantai akibat dinamika laut. Fenomena erosi pesisir merupakan proses alami yang dipicu oleh interaksi gelombang, arus, pasang surut, serta aktivitas antropogenik seperti pembangunan infrastruktur dan reklamasi pantai. Erosi yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan ekosistem pantai, hilangnya lahan produktif, hingga mengancam keberadaan komunitas pesisir dan infrastruktur vital. Oleh karena itu, intervensi teknik melalui pembangunan struktur pelindung seperti groin menjadi sangat penting dalam program mitigasi dan adaptasi pesisir (Hajibehzad et al., 2020).

Groin bekerja dengan cara menginterupsi transportasi sedimen sepanjang pantai (*longshore sediment transport*), sehingga menciptakan zona deposisi di sisi updrift—yaitu sisi hulu arus sejajar pantai dan menahan abrasi di segmen pantai yang terproteksi. Pengaplikasian groin umumnya dilakukan pada wilayah dengan tingkat erosi tinggi dan kebutuhan perlindungan langsung terhadap aset dan habitat pesisir. Perancangan struktur groin memerlukan pemahaman mendalam mengenai dinamika hidrodinamika pantai, pola arus, distribusi sedimen, serta kondisi morfologi lokal (Vieira et al., 2024).

Di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia, penerapan groin telah membuktikan efektivitasnya dalam menstabilkan garis pantai dan melestarikan fungsi ekologis pesisir, misalnya sebagai habitat biota pantai dan sumber daya wisata. Meski demikian, pembangunan groin bukanlah tanpa risiko. Terdapat potensi efek samping negatif seperti peningkatan erosi di sisi downdrift akibat terhambatnya suplai sedimen. Oleh sebab itu, kajian komprehensif mulai dari tahap identifikasi masalah, desain teknis, analisis dampak

lingkungan, hingga pemantauan pasca konstruksi menjadi aspek krusial (Kasmi et al., 2023).

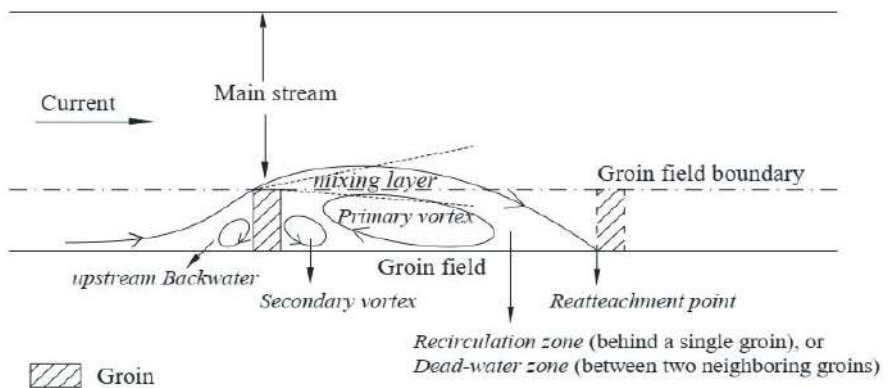
Perkembangan teknologi desain dan pemodelan komputer dewasa ini semakin memperkaya metode pemilihan lokasi, dimensi, dan material groin sehingga infrastruktur ini dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan sosial ekonomi masyarakat pesisir. Dengan demikian, pengelolaan struktur groin harus didasarkan pada pendekatan integratif yang mengedepankan keseimbangan antara tujuan teknis, pelestarian lingkungan, dan keberlanjutan sistem sosial pesisir. Bab ini akan menguraikan seluruh aspek tersebut secara sistematis sebagai acuan bagi perancang, peneliti, dan pengelola wilayah pesisir dalam implementasi teknologi struktur groin yang efektif dan berkelanjutan.

Struktur groin merupakan salah satu solusi rekayasa yang lazim digunakan dalam pengelolaan pesisir, terutama pada lokasi yang mengalami proses erosi intensif akibat aktivitas gelombang dan arus sepanjang pantai. Secara geometris, groin merupakan konstruksi yang membentang dari wilayah daratan menuju laut dengan orientasi tegak lurus terhadap garis pantai. Fungsi utama groin adalah memecah arus sejajar pantai (*longshore current*) sehingga dapat memperlambat serta menahan laju transportasi sedimen di sepanjang pesisir, yang pada akhirnya membantu mencegah hilangnya material pantai ke area downdrift (Alfaris, Dewadi, et al., 2022).

Groin dirancang untuk menciptakan perubahan distribusi energi gelombang dan pola sedimentasi di wilayah pesisir. Dengan adanya groin, sedimen yang terbawa oleh arus akan terperangkap di sisi hulu struktur (*updrift*), membentuk zona akresi, sedangkan di sisi hilir (*downdrift*) cenderung terjadi pengurangan pasokan sedimen. Akumulasi sedimen ini sangat penting dalam menjaga stabilitas garis pantai sehingga infrastruktur dan ekosistem di sekitarnya dapat terhindar dari risiko abrasi yang merusak.

Panorama desain groin sangat beragam, mulai dari struktur dengan panjang pendek di pesisir berenergi rendah hingga groin yang membentang ratusan meter pada pesisir dengan gaya gelombang dan arus yang tinggi. Jangkauan panjang groin biasanya

dipilih berdasarkan analisis karakteristik fisik pantai, intensitas gelombang, dan volume transportasi sedimen yang terjadi secara tahunan. Selain itu, pemilihan material konstruksi groin disesuaikan dengan aspek teknis, keberlanjutan, dan ketersediaan lokal. Bahan umum untuk pembuatan groin meliputi batu pecah, beton pracetak, kayu tahan lama, dan material sheet pile baja fiber, yang masing-masing menawarkan karakteristik berbeda terkait dengan daya tahan, biaya konstruksi, dan dampak lingkungan.



Gambar 6.1. Skematik aliran air dari groin (Kuang et al., 2021)

Dalam perspektif pengelolaan pantai modern, kehadiran groin tidak sekadar berfungsi sebagai penghalang fisik, melainkan juga bagian dari sistem intervensi untuk mengatur dinamika sedimentasi dan ekologi pesisir secara berkelanjutan. Penempatan dan desain groin harus mempertimbangkan kondisi alami pantai, potensi perubahan bentuk pantai setelah konstruksi, serta kemungkinan munculnya efek samping pada area sekitar. Dengan demikian, struktur groin menjadi komponen integral dalam strategi multipendekatan untuk perlindungan pantai dan pelestarian wilayah pesisir dari ancaman gelombang dan kehilangan sedimen secara terus menerus (Dewadi et al., 2023).

6.2 Teori Dasar Perencanaan Groin

Dalam perencanaan groin, pemahaman mendalam tentang dinamika sedimen dan hidrodinamika gelombang sangat krusial

untuk memitigasi dampak negatif yang mungkin timbul. Efektivitas groin dalam mengurangi kecepatan arus dan mengendalikan pola aliran air, seperti yang terlihat pada groin permeabel berbahan ban bekas, menunjukkan pentingnya desain yang mempertimbangkan interaksi struktur dengan lingkungan. Penelitian mengenai kinerja struktur groin seri menunjukkan bahwa rasio aspek merupakan parameter penting yang mempengaruhi topografi dasar dan perilaku aliran di dekat struktur (Alfaris, Gustian, et al., 2022).

Perencanaan struktur groin memerlukan pendekatan sistematis dan berbasis ilmiah untuk menjamin efektivitas sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan pesisir. Salah satu fundamental dalam proses perencanaan adalah analisis transportasi sedimen sepanjang pantai, atau yang dikenal sebagai longshore sediment transport. Pengamatan terhadap pergerakan sedimen baik secara kuantitatif maupun kualitatif memberikan gambaran mengenai volume material yang berpindah di pesisir dan area yang cenderung terakumulasi atau tererosi.

Langkah berikutnya adalah melakukan evaluasi terhadap perubahan garis pantai sebelum dan sesudah pemasangan groin. Studi historis morfologi pantai melalui citra satelit, foto udara, dan survei lapangan diperlukan guna memahami respon fisik pantai terhadap intervensi groin. Data tersebut menjadi dasar penentuan kebutuhan perlindungan, lokasi optimal, serta potensi perubahan bentang alam yang dapat terjadi.

Penyesuaian dimensi groin termasuk panjang, tinggi, dan bentuk struktur sangat dipengaruhi oleh karakteristik lokal gelombang, intensitas arus, serta tipe dan ukuran sedimen. Pantai dengan gelombang dominan dan arus kuat memerlukan groin dengan dimensi lebih besar supaya mampu memperlambat transportasi sedimen secara efektif. Sebaliknya, pantai berenergi rendah cenderung memerlukan struktur yang lebih sederhana dan pendek.

Dalam upaya memprediksi besaran sedimen yang terangkut, para insinyur pantai umumnya menggunakan model matematis seperti Komar and Inman Formula maupun CERC (*Coastal Engineering Research Center*) Formula. Kedua rumus ini membantu

mengestimasi volume sedimen yang berpindah setiap tahun berdasarkan parameter hidrodinamika dan data karakteristik pantai. Estimasi yang akurat sangat menentukan efektifitas struktur groin sehingga dampak negatif, seperti erosi pada sisi downdrift, dapat diminimalisir dan performa perlindungan pantai dapat dioptimalkan (Kuang et al., 2021).

Keberhasilan implementasi groin dievaluasi dengan beberapa indikator utama, di antaranya:

1. Terjadinya peningkatan volume sedimen di sisi updrift sebagai bukti akumulasi material pantai yang terperangkap oleh struktur groin;
2. Penurunan tingkat erosi di area belakang groin, yang menunjukkan berkurangnya laju hilangnya sedimen akibat intervensi;
3. Upaya minimalisasi efek samping seperti erosi lanjutan di sisi downdrift, yang biasanya terjadi akibat terganggunya keseimbangan pasokan sedimen di sepanjang pesisir.

Dengan pendekatan prinsip-prinsip di atas, perencanaan groin dapat diarahkan secara lebih presisi dan berkelanjutan, mendukung upaya perlindungan serta revitalisasi pesisir tanpa menimbulkan masalah lingkungan baru.

6.4 Jenis dan Material Groin

Pemilihan jenis dan material konstruksi groin memainkan peran penting dalam menentukan daya tahan, efektivitas, serta efisiensi biaya pembangunan struktur di wilayah pesisir. Di Indonesia, groin batu menjadi salah satu tipe paling banyak digunakan oleh karena ketersediaan material lokal yang melimpah, biaya konstruksi yang relatif terjangkau, serta kapasitas untuk bertahan terhadap pukulan gelombang besar dan pengaruh arus kuat. Keunggulan utama groin batu adalah kemampuannya menyesuaikan dengan kontur alami pantai sehingga dapat berfungsi optimal dalam lingkungan pesisir tropis.

Pada daerah atau proyek yang membutuhkan akurasi konstruksi lebih tinggi dan masa pakai lebih lama, groin beton dipilih karena karakteristiknya yang kuat, presisi dimensi saat konstruksi,

dan tahan terhadap paparan cuaca ekstrem. Namun, biaya investasi dan perawatan struktur beton cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan batu. Sebaliknya, groin kayu umumnya diterapkan pada kawasan pesisir berenergi rendah, seperti laguna atau teluk, dimana gaya gelombang tidak terlalu besar. Keunggulan groin kayu terletak pada proses instalasi yang sederhana dan ringan, meski masa pakainya relatif singkat akibat kerentanan terhadap proses pelapukan dan serangan organisme laut.

Untuk kebutuhan proyek modern dan pada lokasi yang menuntut konstruksi cepat serta fleksibilitas tinggi, groin berbahan sheet pile baja sering digunakan. Meskipun berdaya tahan tinggi dan mampu menahan tekanan gelombang, material baja tetap memiliki kelemahan terkait risiko korosi, sehingga dibutuhkan perlakuan khusus seperti pelapis anti-korosi atau pemeliharaan rutin agar masa gunanya dapat diperpanjang.

Selain kategori material, groin bisa dibedakan menurut bentuk dan konfigurasi penempatan. Groin individu dibangun sebagai struktur tunggal yang berfungsi menahan dan mengumpulkan sedimen pada satu titik pantai. Sementara itu, groin series atau yang lazim disebut groin field merupakan kumpulan beberapa groin yang dipasang secara paralel dan berjarak teratur pada sepanjang garis pantai. Penempatan sistem groin series bertujuan memperluas area perlindungan serta meningkatkan kemampuan struktur dalam mencegah erosi sekaligus mempercepat proses akumulasi sedimen secara merata di antara struktur-struktur tersebut.

Pemilihan tipe dan material groin harus disesuaikan dengan karakteristik setempat, kebutuhan perlindungan, pertimbangan ekologis, serta sumber daya ekonomi yang dimiliki oleh masyarakat pesisir dan pemerintah daerah.

6.5 Prosedur Desain Struktur Groin

Desain groin merupakan proses yang melibatkan analisis multidisipliner guna memastikan fungsi perlindungan pesisir berjalan optimal dan dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalisir. Penempatan groin harus didasarkan pada hasil studi pola arus laut dan persebaran sedimen sepanjang pantai. Analisis ini

bertujuan untuk mengetahui lokasi yang paling rawan terhadap erosi serta memastikan sedimen yang terangkut dapat ditahan secara efektif oleh struktur yang dirancang (Nasution et al., 2023).

Dimensi groin, terutama panjang dan tinggi, disesuaikan dengan karakteristik fisik wilayah pesisir seperti energi gelombang, kedalaman air, serta kondisi pasang surut. Secara matematis, panjang groin efektif (L_g) dapat ditentukan dengan rumus:

$$L_g = 1.5 \times \text{lebar zona surf}$$

Sementara tinggi groin (H_g) didesain dengan mempertimbangkan elevasi muka air maksimum yang terjadi di lokasi pantai, dengan tambahan cadangan ketinggian freeboard untuk mengantisipasi gelombang ekstrem, secara umum dapat ditulis:

$$H_g \approx 1.2 \times \text{elevasi muka air}$$

Pemilihan material konstruksi didasarkan pada kondisi lingkungan pesisir dan pertimbangan biaya. Material yang tahan terhadap abrasi dan dampak lingkungan seperti batu, beton, atau sheet pile baja dipilih sesuai dengan kebutuhan dan ketersediaan setempat.

Kajian lingkungan yang komprehensif wajib dilaksanakan guna mengidentifikasi potensi dampak negatif seperti terganggunya keseimbangan sedimentasi dan kerusakan habitat pesisir. Proses ini biasanya melibatkan konsultasi publik, studi AMDAL (Analisis Mengenai Dampak Lingkungan), serta pemantauan berkala untuk memastikan keberlanjutan ekosistem di sekitar area pembangunan groin.

6.6 Dampak Lingkungan dan Ekologis

Konstruksi groin membawa konsekuensi ekologis yang harus diperhatikan secara serius dalam tahapan perencanaan dan implementasinya. Salah satu dampak utama adalah proses akumulasi sedimen di sisi updrift yang berpotensi menciptakan zona akresi, namun di sisi lain bisa memicu erosi baru pada area downdrift akibat berkurangnya pasokan material. Pergeseran komposisi sedimen dan

perubahan pola distribusi materi pantai juga dapat mengganggu habitat organisme benthik dan biota khas pesisir yang tergantung pada lingkungan tersebut (Krisnafi et al., 2020).

Mitigasi dampak lingkungan dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, antara lain:

1. Pemantauan berkala perubahan garis pantai dan transportasi sedimen melalui survei lapangan dan pemrosesan citra satelit;
2. Modifikasi desain groin seperti penerapan groin permeabel yang memungkinkan sebagian sedimen dan air mengalir, sehingga mengurangi konsentrasi dampak negatif;
3. Upaya reklamasi atau penanaman vegetasi pelindung di area yang terdampak, misalnya mangrove atau tumbuhan pesisir lain yang mampu menstabilkan material dan memperbaiki habitat.

Tahapan mitigasi dan pemantauan harus terus dilakukan setelah pembangunan selesai sebagai bagian dari program berkelanjutan guna menjamin fungsi ekologis serta kenyamanan lingkungan pesisir tetap terjaga dan harmonis dengan keberadaan infrastruktur pelindung pantai.

6.7 Evaluasi Efektivitas Struktur Groin

Menilai efektivitas suatu struktur groin sangat penting untuk memastikan bahwa tujuan utama penahan erosi dan stabilisasi garis pantai benar-benar tercapai tanpa menimbulkan dampak lingkungan yang merugikan. Salah satu indikator utama yang dievaluasi adalah perubahan volume sedimen di area sekitar groin pasca konstruksi. Dengan membandingkan data volume sedimen sebelum dan sesudah pemasangan, dapat diketahui seberapa besar material yang berhasil ditahan sekaligus area mana yang masih mengalami kehilangan sedimen secara signifikan (Siagian et al., 2023).

Selain pengukuran kuantitatif volume sedimen, evaluasi pola erosi dan akresi sepanjang garis pantai menjadi studi penting. Perbandingan antara kondisi morfologi pesisir sebelum dan sesudah pembangunan groin dapat memberikan gambaran menyeluruh seputar performa struktur dalam menahan abrasi maupun

kecenderungan terbentuknya zona akresi atau sebaliknya, zona erosi pada area downdrift. Salah satu metode yang umum digunakan adalah pemetaan pesisir menggunakan citra satelit resolusi tinggi maupun foto udara berkala, yang dilengkapi dengan survei lapangan secara periodik.

Perkembangan teknologi pemantauan pantai dalam beberapa tahun terakhir menawarkan kemudahan analisis dinamis. Penggunaan drone untuk perekaman kondisi pantai secara luas dan cepat sangat membantu dalam melakukan observasi visual dan pengukuran spasial perubahan garis pantai. Demikian pula teknologi LIDAR (*Light Detection and Ranging*), yang mampu memberikan data topografi dan batimetri dengan akurasi tinggi, memungkinkan para perencana dan peneliti untuk mengikuti perubahan morfologi pantai hingga ke tingkat detail. Dengan demikian, kombinasi teknik konvensional dan modern memperkaya proses evaluasi efektivitas struktur groin serta mendukung upaya penyesuaian desain atau rekayasa solusi tambahan jika terjadi dampak yang tidak direncanakan.

6.8 Pemodelan Hidrodinamika dan Sedimen

Pemodelan hidrodinamika dan sedimen memainkan peran vital dalam analisis dan perancangan struktur groin pada wilayah pesisir. Dengan mensimulasikan interaksi arus, gelombang, dan transportasi sedimen, model-model ini memungkinkan prediksi yang lebih akurat atas dampak keberadaan groin terhadap kondisi fisik pantai. Hasil simulasi digunakan sebagai dasar untuk menentukan kelayakan desain, serta menilai potensi perubahan lingkungan yang mungkin timbul akibat intervensi struktur.

Pemodelan bertujuan mendukung proses desain dengan memberikan gambaran rinci tentang aliran arus, distribusi sedimen, hingga perubahan morfologi pesisir sebelum dan sesudah pembangunan groin. Selain itu, pemodelan digunakan untuk optimasi tata letak, dimensi, maupun jumlah struktur groin yang diperlukan pada suatu segmen pantai. Melalui proses ini, resiko dampak negatif seperti erosi di sisi downdrift dapat diminimalkan sekaligus memperbesar potensi zona akresi di sekitar groin.

Dua pendekatan utama pemodelan yang digunakan adalah model numerik dan empiris. Model numerik seperti MIKE21 dan Delft3D sangat populer di kalangan insinyur pantai karena mampu menduplikasi proses alami dengan memperhitungkan parameter detail seperti gelombang, arus, energi, serta karakteristik sedimen lokal. Dengan data masukan yang akurat, struktur groin dapat didesain secara spesifik agar sejalan dengan realitas kondisi pesisir. Sementara model empiris, melalui penerapan rumus transportasi sedimen sederhana, memberikan estimasi awal yang membantu studi pendahuluan namun dengan keterbatasan dalam kajian geografis yang kompleks.

Hasil dari pemodelan numerik umumnya menunjukkan peningkatan akumulasi sedimen di sisi updrift groin, yang mendukung stabilisasi garis pantai. Namun demikian, ada potensi pembentukan zona erosi di sisi downdrift akibat terputusnya suplai sedimen alami, sehingga perencanaan desain harus dilakukan dengan prinsip kehati-hatian dan pertimbangan ekologis jangka panjang guna menjaga keseimbangan dinamis sistem pesisir.

6.9 Standar dan Regulasi Desain Groin

Desain dan pembangunan struktur groin di wilayah pesisir harus berpedoman pada aturan dan standar baik di tingkat nasional maupun internasional guna menjamin kualitas, keamanan, dan keberlanjutan proyek. Di Indonesia, pedoman utama yang digunakan adalah SNI (Standar Nasional Indonesia) yang mengatur teknis bangunan pantai termasuk spesifikasi material, dimensi struktur, serta metode implementasi di lapangan. SNI memberikan kerangka teknis yang disesuaikan dengan kondisi pantai tropis dan karakteristik geografis lokal, sehingga struktur groin yang dibangun diharapkan relevan serta tahan lama terhadap dinamika lingkungan pesisir.

Sebagai referensi tambahan, pedoman desain internasional seperti yang diterbitkan oleh US Army Corps of Engineers (USACE) juga banyak diadopsi terutama pada proyek dengan skala besar atau dengan kolaborasi mitra asing. Standar USACE menguraikan secara detail prinsip desain, prosedur pengujian, hingga parameter keamanan yang harus dipenuhi pada setiap tahap pembangunan.

Selain aspek teknis, regulasi lingkungan memegang peranan penting dalam pengelolaan dampak terhadap ekosistem dan masyarakat pesisir yang terdampak proyek. Di Indonesia, Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) wajib dilakukan untuk seluruh konstruksi skala besar, termasuk groin. Proses AMDAL mengharuskan pelibatan para pihak terkait, kajian multi-disiplin dari sisi ekologi, sosial, hingga ekonomi, serta perumusan rencana mitigasi dan monitoring berkelanjutan.

Dengan menerapkan standar dan regulasi yang berlaku, pembangunan groin dapat meminimalisir risiko kegagalan struktural, serta memastikan seluruh dampak yang timbul dapat terkelola dengan baik dan seimbang di antara aspek teknis, sosial, dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

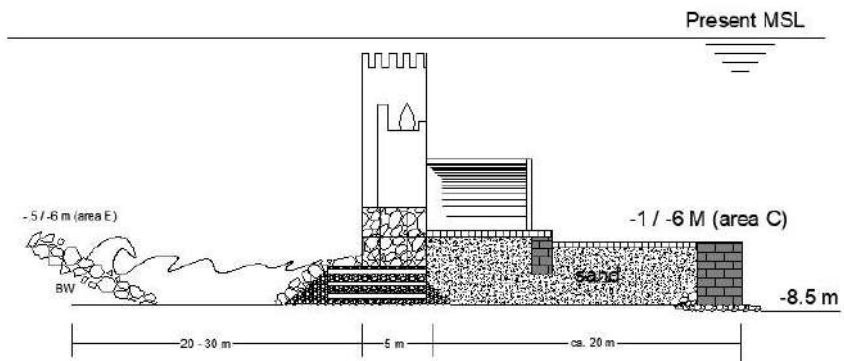
- Alfaris, L., Dewadi, F. M., Munim, A., Taba, H. T., Khasanah, Maing, C. M. M., Susano, A., & Rukhmana, T. (2022). *Matriks & Ruang Vektor*. Cendikia Mulia Mandiri.
- Alfaris, L., Gustian, D., Setyorini, R., Romli, I., Putri, A. Y. P., Herjuna, S. A. S., Syamsiyah, N., Yuniansyah, Aziza, N., Muhammad, A. C., Umar, N., & Wali, M. (2022). *Riset Operasi*. Indie Press.
- Dewadi, F. M., Milasari, L. A., A., H., Wibowo, C., Abdi, Alfaris, L., Saputra, A. A., & Gobel, F. F. (2023). *Desain Penelitian Bidang Teknik*. Get Press Indonesia.
- Hajibehzad, M. S., Bejestan, M. S., & Ferro, V. (2020). Investigating the performance of enhanced permeable groins in series. *Water (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/w12123531>
- Kasmi, M., A. A., Hatta, M., Waluyo, Nur, M., Risakotta, T. K., Gunawan, B., Adli, A., & Alfaris, L. (2023). *Pengelolaan pesisir terpadu* (M. Sari (ed.); 1st ed.). PT Global Eksekutif Teknologi.
- Krisnafi, Y., Wibowo, B., Alamsah, S., Sembiring, K., Sudinno'z, D., Rahman, A., Alfaris, L., & Astiyani, W. P. (2020). General overview of the financial aspects of lift net fisheries operations in pangandaran, west java, indonesia. *AACL Bioflux*, 13(3), 1535–1545.
- Kuang, C., Zheng, Y., Gu, J., Zou, Q., & Han, X. (2021). Experimental study on backflow patterns induced by a bilateral groin pair with different spacing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4), 1–27. <https://doi.org/10.3390/app11041486>
- Nasution, B., Lulut Alfaris, & Siagian, R. C. (2023). Basic Mechanics of Lagrange and Hamilton as Reference for STEM Students. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(2), 898–905. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i2.2920>
- Siagian, R. C., Alfaris, L., Muhammad, A. C., Nyuswantoro, U. I., & Rancak, G. T. (2023). The Orbital Properties of Black Holes: Exploring the Relationship between Orbital Velocity and Distance. *Journal of Physics and Its Applications*, 5(2), 35–42. <https://doi.org/10.14710/jpa.v5i2.17860>
- Vieira, B. F. V., Pinho, J. L. S., & Barros, J. A. O. (2024). Semicircular Coastal Defence Structures: Impact of Gap Spacing on Shoreline Dynamics during Storm Events. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/jmse12060850>

BAB 7

SEAWALL DAN REVETMENT

7.1 Sejarah Seawall

Konstruksi tanggul laut telah ada sejak zaman kuno. Pada abad pertama antara 22 dan 15 SM Raja Herodes membangun tanggul laut atau pemecah gelombang di Kaisarea Maritima untuk melindungi Pelabuhan Sebastos dengan ukuran 275 meter sisi barat dan 500 meter sisi selatan. Pemecah gelombang terbuat dari beton Romawi Kuno, menggunakan campuran batu kapur, abu vulkanik pozzolana dari Italia dan batu Eolianite/kurkar. Metode konstruksinya melibatkan pembuatan kotak-kotak beton, lalu diapungkan ke posisinya, dan ditenggelamkan untuk diisi dengan beton. Potongan melintang pemecah gelombang utama yang diadaptasi dari Rabban (2009, hal. 96) merupakan rekonstruksi hipotesis dari keseluruhan struktur pemecah gelombang seperti Gambar 7.1.



Gambar 7.1. Penampang melintang pemecah gelombang utama (diadaptasi dari Raban, 2009:96).

Pada tahun 1627, tanggul laut pertama dibangun di Pulau Canvey, Inggris, setelah terjadinya banjir besar di muara Sungai Thames. Kejadian tersebut mendorong pembangunan perlindungan tambahan di wilayah yang rawan banjir. (Council of Europe. (1999).

Seiring waktu, desain tanggul laut berkembang menjadi lebih canggih dan kompleks seiring kemajuan bahan bangunan, teknologi, serta pemahaman tentang dinamika pesisir. Bagian ini akan membahas beberapa studi kasus penting mengenai tanggul laut secara kronologis dan meninjau bagaimana tanggul tersebut berfungsi dalam menghadapi tsunami atau proses alam lainnya, serta menilai tingkat efektivitasnya. Dengan mempelajari keberhasilan dan kekurangan tanggul laut saat terjadi bencana alam besar, dapat diketahui kelemahan yang ada dan ditemukan peluang untuk melakukan perbaikan di masa depan.

Tahun 1917 dimulai pembangunan tembok laut di Vancouver dan berlanjut hingga 1937 dan menjadi salah satu jalur tepi laut terpanjang di dunia yang tidak terputus seperti Gambar 2. Tembok laut ini awalnya dibangun sebagai pelindung gelombang yang dihasilkan oleh kapal-kapal yang melewati First Narrows yang mengikis area antara Prospect Point dan Brockton Point dan sejak itu jalur ini telah menjadi salah satu fitur taman yang paling banyak digunakan oleh penduduk lokal dan wisatawan dengan panjang total 22 km. (Belyea, R (21 January 1992). Secara umum, Vancouver Seawall merupakan contoh bagus dari tanggul laut yang tidak hanya berfungsi melindungi garis pantai, tetapi juga menjadi tempat rekreasi yang membuat masyarakat lebih menikmati lingkungan pesisir. Contoh ini menunjukkan bahwa meskipun erosi pantai terjadi secara alami, kegiatan manusia, penggunaan area pantai, dan pembangunan yang kurang terencana dapat membuat proses erosi berlangsung lebih cepat.



Gambar 7.2. Tembok laut di Vancouver
Sumber : <https://surl.li/bwfuep>

Tahun 1735 selesai dibangun tanggul batu raksasa di Pondicherry dengan tujuan untuk mencegah erosi akibat ombak yang menghantam pelabuhan dan selama bertahun-tahun Prancis terus memperkuat tembok tersebut, menumpuk batu-batu besar di sepanjang garis pantai dengan panjang 2 km. Pada titik tertingginya, penghalang yang membentang di sepanjang tepi air mencapai ketinggian sekitar 8,2 m di atas permukaan laut. Batu-batu besar tersebut, beberapa di antaranya beratnya mencapai satu ton, berwarna hitam dan cokelat karena pelapukan. Tembok laut diperiksa setiap tahun dan setiap kali muncul celah atau batu-batu tersebut terbenam ke dalam pasir, pemerintah menambahkan lebih banyak batu besar agar tetap kuat. (Allsop, N.W.H. (2002).

Tahun 2007, pembangunan tembok laut (tanggul laut raksasa) pertama kali di Indonesia secara resmi digagas melalui kajian dan masterplan proyek Giant Sea Wall di Jakarta di bawah Pemerintahan Gubernur Fauzi Bowo, yang kemudian diteruskan menjadi proyek pembangunan tanggul laut raksasa untuk mengatasi banjir rob. Proyek pengembangan wilayah pesisir ini mencakup pembangunan tanggul laut besar di sepanjang garis pantai, pembuatan waduk penampung air, serta reklamasi lahan. Pekerjaan pembangunan tanggul laut sepanjang 8 kilometer tersebut secara

resmi dimulai pada 9 Oktober 2014. (Kusuma, Adriana Nina (9 October 2014) seperti Gambar 3.



Gambar 7.3. Pembangunan Giant Sea Wall di Jakarta
Sumber : <https://surl.li/npwhfa>

7.2 Definisi Seawall

Seawall, atau tembok laut/tanggul laut adalah struktur bangunan pantai yang dibangun sejajar dengan garis pantai untuk melindungi daratan dari erosi, banjir, dan kerusakan akibat gelombang serta badai. Tujuan tanggul laut adalah untuk melindungi area pemukiman, infrastruktur, konservasi dan kawasan rekreasi dari aksi pasang surut, gelombang dan tsunami (Kamphuis, W J. 2010). Tanggul laut merupakan fitur statis, tanggul ini akan berbenturan dengan sifat dinamis pantai dan menghambat pertukaran sedimen antara daratan dan laut. (Shipman, Brian; Stojanovic, Tim, 2007).

Tanggul laut didesain sebagai struktur pantai yang direkayasa untuk melindungi pantai dari erosi. Desain tanggul laut mempertimbangkan iklim setempat, posisi pantai, karakteristik gelombang, dan karakteristik morfologi pantai (Allan, J C, Kirk, R M, Hemmingsen, M & Hart, D. (1999). Berbagai permasalahan lingkungan dapat timbul akibat pembangunan tanggul laut, termasuk gangguan pergerakan dan pola transportasi sedimen (Kraus, N &

McDougal. (1996). Disisi lain, konstruksi tanggul laut membutuhkan biaya konstruksi yang tinggi, sehingga dibutuhkan pengelolaan pesisir seperti reklamasi pantai.

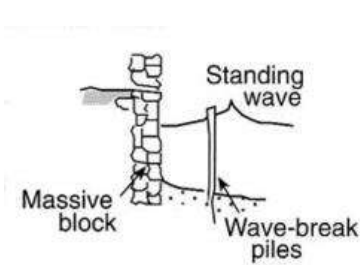
Tanggul laut atau seawalls dapat dibangun dari berbagai material yang paling umum adalah beton bertulang, batu besar, baja, atau gabion. Material konstruksi lain yang memungkinkan antara lain vinil, kayu, aluminium, komposit fiberglass, dan karung pasir biodegradable yang terbuat dari goni dan sabut kelapa (Clarke, J R. 1994). Jenis material yang digunakan untuk konstruksi ini diduga memengaruhi permukiman organisme pesisir, meskipun mekanisme pastinya belum diketahui (Hsiung AR, (2020)

Tanggul laut bekerja dengan memantulkan energi gelombang datang kembali ke laut, sehingga mengurangi energi yang dapat menyebabkan erosi. Tanggul laut memiliki dua kelemahan khusus. Pantulan gelombang dari tanggul dapat mengakibatkan gerusan hidrodinamik dan penurunan permukaan pasir di pantai depan. (Masselink, G and Hughes, M J. (2003) Tanggul laut juga dapat mempercepat erosi di wilayah pesisir yang berdekatan dan tidak terlindungi dengan mempengaruhi proses pergeseran pantai. (NOAA. (2007). Desain tanggul yang tepat bergantung pada aspek-aspek spesifik lokasi, termasuk proses erosi di sekitarnya. (GeoResource, (2001). Ada tiga jenis utama tanggul: vertikal atau bulkhead, miring atau melengkung, dan gundukan atau rubble mound.

7.3 Jenis – Jenis Tanggul

7.3.1 Tembok Vertikal/Bulkhead

Tanggul vertikal pada umumnya dibangun di lokasi yang sangat terbuka seperti sketsa Gambar 7.4. Tanggul ini memantulkan energi gelombang. Dalam kondisi badai, pola gelombang berdiri yang tidak pecah dapat terbentuk, menghasilkan gelombang clapotic stasioner yang bergerak naik turun tetapi tidak bergerak horizontal. (Carter, Bill (1989). Gelombang ini mendorong erosi di kaki tanggul dan dapat menyebabkan kerusakan parah pada tanggul.



Gambar 7.4. Sketsa dan contoh tembok vertikal

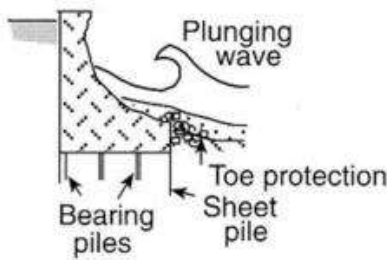
Sumber : <https://surl.li/ezmmic> dan <https://surl.li/xnqtop>

Tembok vertikal memiliki keuntungan dan kekurangan yaitu :

1. Keuntungan tanggul vertikal
 - a. Jenis tanggul laut yang pertama kali diterapkan, serta paling mudah dirancang dan dibangun.
 - b. Tembok laut vertikal mengalihkan energi gelombang menjauh dari pantai.
 - c. Puing-puing yang lepas dapat menyerap energi gelombang.
2. Kekurangan tanggul vertikal
 - a. Membutuhkan biaya yang mahal dapat mengakibatkan kerusakan yang mahal dalam waktu yang singkat.
 - b. Desain vertikal dapat terganggu oleh lingkungan energi gelombang tinggi dalam jangka waktu lama.

7.3.2 Struktur Miring/Melengkung

(Beer, Tom (1997). Dalam beberapa kasus, tiang pancang ditempatkan di depan tanggul untuk sedikit mengurangi energi gelombang. Tanggul laut miring/melengkung dirancang agar gelombang pecah dan meredam energi gelombang serta memantulkannya kembali ke laut. Lengkungan ini juga dapat mencegah gelombang melewati tanggul dan memberikan perlindungan tambahan untuk kaki tanggul seperti sketsa Gambar 5.



Gambar 7.5. Sketsa dan contoh struktur miring/melengkung

Sumber : <https://bit.ly/seawaLL> dan <https://bit.ly/CurVe1>

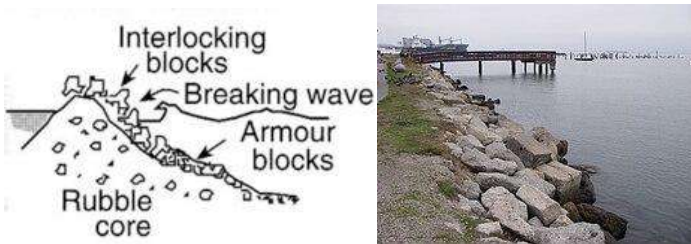
Struktur miring/melengkung memiliki keuntungan dan kekurangan yaitu :

1. Keuntungan struktur mirin/ melengkung
 - a. Struktur cekung memperkenalkan elemen disipatif.
 - b. Lengkungan tersebut dapat mencegah gelombang melewati dinding dan memberikan perlindungan ekstra untuk ujung dinding.
 - c. Dinding laut melengkung bertujuan untuk mengarahkan kembali sebagian besar energi insiden, sehingga menghasilkan gelombang yang dipantulkan rendah dan turbulensi yang jauh berkurang.
2. Kekurangan struktur miring/ melengkung
 - a. Proses rekayasa dan desain yang lebih kompleks.
 - b. Gelombang yang dibelokkan dapat mengikis material di dasar dinding sehingga menyebabkannya terkikis.

7.3.3 Gundukan/Rubble Mound

Tanggul laut tipe gundukan/rubble mound, menggunakan revetment atau riprap, digunakan di lokasi yang kurang menuntut di mana proses erosi berenergi rendah terjadi seperti sketsa Gambar 6. Lokasi yang paling minim paparan melibatkan sekat dan revetmen berbiaya terendah yang terbuat dari karung pasir atau geotekstil. Tanggul ini berfungsi untuk melindungi pantai dan meminimalkan erosi, dan dapat kedap air atau berpori, yang memungkinkan air

tersaring setelah energi gelombang hilang. (Milligan J, O'riordan T (2007).



Gambar 7.6. Sketsa dan contoh gundukan/rubble mound

Sumber : <https://bit.ly/rubbleMound> dan <https://bit.ly/4664qhb>

Struktur Gundukan/Rubble Mound memiliki keuntungan dan kekurangan yaitu :

1. Keuntungan Gundukan/Rubble Mound
 - a. Struktur terkini menggunakan desain berpori dari batu dan pelindung beton.
 - b. Kemiringan dan material yang longgar memastikan pembuangan energi gelombang secara maksimal.
 - c. Biaya struktur cenderung lebih rendah
2. Kekurangan Gundukan/Rubble Mound
 - a. Umur bangunan relative pendek
 - b. Tidak dapat menahan atau melindungi dari kondisi energi tinggi secara efektif.

Secara umum, tanggul laut bisa menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi erosi pantai, asalkan dibangun dengan benar dan menggunakan bahan yang kuat untuk menahan tekanan gelombang laut. Pembangunannya harus disertai dengan pemahaman mengenai kondisi pesisir dan karakteristik morfologi di lokasi tersebut. Tanggul laut memiliki banyak manfaat, seperti memberikan perlindungan jangka panjang dibandingkan metode rekayasa lunak, menyediakan area rekreasi, serta melindungi dari erosi dan kejadian alam yang ekstrem. Namun, saat terjadi peristiwa alam besar, kelemahan tanggul laut sering terlihat, sehingga perlu dilakukan evaluasi dan

perbaikan untuk meningkatkan kinerjanya di masa depan (short, 1999).

Menurut short, 1999 seawall secara umum memiliki keuntungan dan kekurangan sebagai berikut :

1. Keuntungan seawall
 - a. Solusi jangka panjang dibandingkan dengan struktur pantai lunak.
 - b. Secara efektif meminimalkan hilangnya nyawa dalam kejadian ekstrem dan kerusakan properti yang disebabkan oleh erosi.
 - c. Dapat bertahan lebih lama di lingkungan berenergi tinggi dibandingkan dengan metode rekayasa lunak
 - d. Dapat digunakan untuk kawasan rekreasi dan bertamasya.
 - e. Membentuk pertahanan pantai yang keras dan kuat.
2. Kekurangan seawall
 - a. Membutuhkan biaya mahal untuk pembangunan.
 - b. Mungkin dianggap tidak menarik secara estetika.
 - c. Energi pantulan gelombang menyebabkan pengikisan di dasar.
 - d. Dapat mengganggu proses alami garis pantai dan menghancurkan habitat garis pantai seperti lahan basah dan pantai pasang surut.
 - e. Proses transpor sedimen yang berubah dapat mengganggu pergerakan pasir yang dapat menyebabkan peningkatan erosi yang dibawa arus dari struktur tersebut.
 - f. Dapat menyebabkan pantai menghilang, sehingga tidak dapat digunakan lagi oleh pengunjung pantai.

7.4 Revetmen

Dinding pantai atau revetmen merupakan struktur yang berfungsi untuk memisahkan daratan dari perairan pantai. Tujuan utamanya adalah melindungi pantai dari erosi dan limpasan gelombang yang dapat mencapai daratan. Area yang dilindungi biasanya terletak tepat di belakang bangunan ini. Permukaan bangunan yang menghadap arah datangnya gelombang dapat

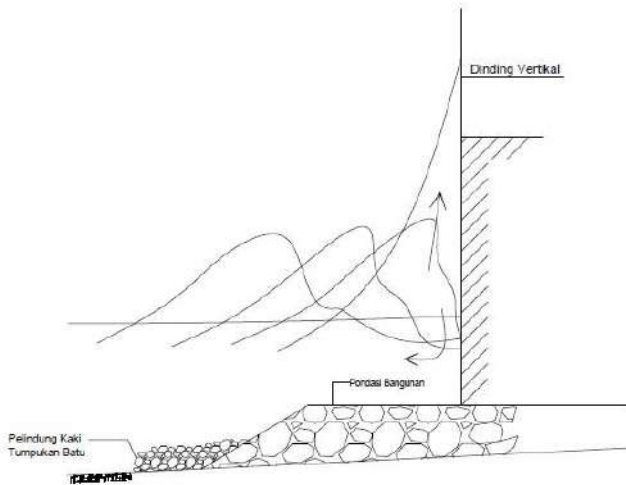
struktur lapis lindung (*armor*) revetmen biasanya terdiri beton, timbunan batu, karung pasir, dan beronjong (*gabion*). Karena permukaannya terdiri dari timbunan batu atau blok beton dengan rongga-rongga diantaranya, maka revetmen lebih efektif untuk meredam hempasan gelombang.

Revetmen merupakan struktur pelindung pantai yang dinilai efektif diterapkan pada kawasan pantai berpasir dengan intensitas aktivitas yang tinggi di sekitarnya. Desainnya yang memiliki kemiringan tertentu memungkinkan masyarakat tetap menikmati panorama pantai serta memanfaatkannya untuk kegiatan rekreasi dan pariwisata. Variasi dalam tingkat kemiringan serta jenis material yang digunakan menjadikan revetmen sebagai salah satu alternatif yang banyak diterapkan dalam upaya mitigasi erosi pantai, khususnya pada area pantai wisata. Umumnya, pada bagian atas struktur revetmen dibangun fasilitas pendukung berupa jalur pejalan kaki atau jalan yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan wisatawan. (Puslitbang SDA, 2007).

Menurut Triatmodjo (1999), dalam merencanakan dinding pantai atau revetment, beberapa hal perlu diperhatikan, seperti fungsi dan bentuk bangunan, lokasi, panjang, tinggi, stabilitas bangunan dan tanah fondasi, tinggi muka air di depan maupun di belakang bangunan, serta ketersediaan bahan bangunan. Fungsi bangunan akan mempengaruhi bentuknya. Permukaan bangunan bisa dibuat tegak, miring, lengkung, atau bertangga. Dinding tegak bisa juga digunakan sebagai dermaga atau tempat kapal bersandar, tetapi kurang efektif menahan gelombang dibandingkan bentuk lengkung (*konkaf*). Penggunaan dinding tegak di air dangkal dapat menimbulkan erosi pada dasar bangunan.

Gelombang yang pecah menghantam dinding tegak akan memantulkan energi ke atas dan ke bawah. Komponen energi ke bawah ini dapat menimbulkan arus yang mengikis material dasar di depan bangunan. Untuk mencegah erosi, dasar bangunan perlu dilapisi batu dengan ukuran tertentu. Agar butiran tanah halus tidak keluar melalui celah-celah batu dan menyebabkan penurunan bangunan, dasar fondasi juga diberi lapisan geotekstil. Sisi miring dan kasar dapat menghancurkan serta menyerap energi gelombang,

sehingga mengurangi tinggi gelombang (*wave run-up*), limpasan, dan erosi pada dasar.



Gambar 7.8. Gelombang pecah menghantam dinding
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:207)

Fungsi utama dinding pantai adalah menahan gelombang agar tidak meluap ke daratan. Air yang melimpas ke belakang dinding akan meresap ke tanah dan mengalir kembali ke laut. Jika perbedaan ketinggian antara air di depan dan belakang dinding cukup besar, aliran air bisa menjadi cepat dan menarik butiran tanah dari belakang atau fondasi bangunan, yang disebut piping. Keadaan ini dapat mengakibatkan rusak/runtuhnya bangunan. penanggulangan dari keadaan tersebut dapat di lakukan dengan 1) membuat elevasi puncak bangunan cukup tinggi sehingga tidak terjadi limpasan, 2) dibelakang bangunan dilindungi dengan lantai beton atau aspal dan dilengkapi dengan saluran drainasi, atau 3) dengan membuat konstruksi yang dapat menahan terangkutnya butiran tanah/pasir, misalnya dengan menggunakan geotekstil yang berfungsi sebagai saringan. (Triatmodjo, 1999).

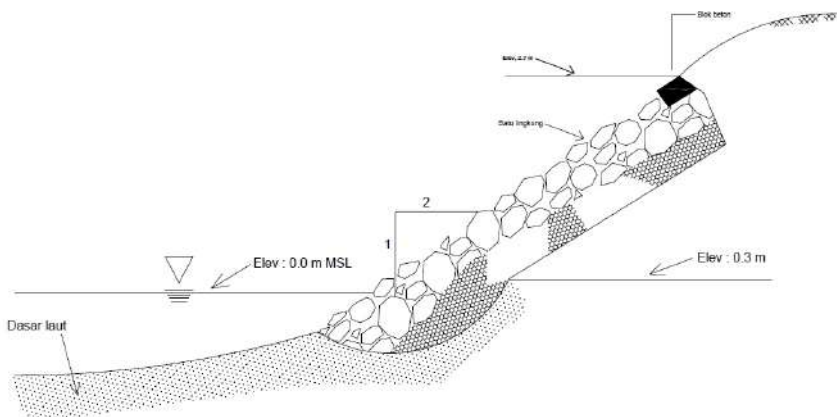
Menurut CERC (1984), dalam merancang dinding pantai perlu diperhitungkan potensi terjadinya erosi pada bagian kaki dinding. Besarnya erosi dipengaruhi oleh bentuk struktur dinding,

kondisi gelombang, serta karakteristik tanah dasar. Untuk mencegah kerusakan akibat erosi, biasanya bagian kaki dinding diperkuat dengan batu pelindung. Selain itu, bagian depan dinding juga dilengkapi turap yang ditanam di bawah permukaan untuk mencegah pengikisan tanah. Umumnya, kedalaman erosi maksimum pada tanah alami sebanding dengan tinggi gelombang maksimum yang terjadi di depan dinding.

Sementara itu, Budiman (2012) menyatakan bahwa struktur pelindung kaki tipe screen layer breakwater pada revetmen terbukti lebih efektif dalam meredam energi gelombang dan menurunkan tinggi run up hingga 33%. Gelombang yang melewati lapisan screen layer breakwater di dasar perairan mengalami penurunan energi akibat pengaruh kerapatan, jumlah lapisan, dan jarak antar lapisannya. Akibatnya, energi gelombang yang sampai ke revetmen berkurang dan tinggi run up menjadi lebih kecil. Sedangkan pelindung kaki dengan tipe panjang, yang dimodifikasi berdasarkan variasi panjang struktur dan kerapatan tiang, mampu mengurangi energi gelombang serta menurunkan tinggi run up sebesar 26%. (Hendra, 2011).

7.4.1 Tipe revetmen

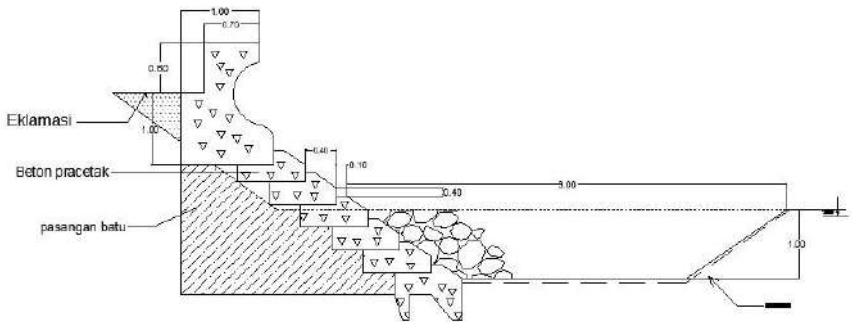
Pemilihan jenis serta material yang digunakan pada revetmen berperan penting dalam menentukan efektivitas struktur tersebut dalam mengendalikan erosi pantai, sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Revetmen biasanya dibangun dari elemen pelindung yang disusun dengan kemiringan tertentu, dikenal sebagai tipe rubble mound, sebagaimana terlihat pada Gambar 7.9. Lapisan pelindung bagian luar atau armor layer umumnya dibuat dari batu pecah, batu bulat alami, atau menggunakan blok beton pracetak. Jenis blok beton yang umum digunakan sebagai lapisan pelindung antara lain berbentuk kubus, *tetrapod*, *akmon*, dan *dolos* (Balitbang PU, 2007).



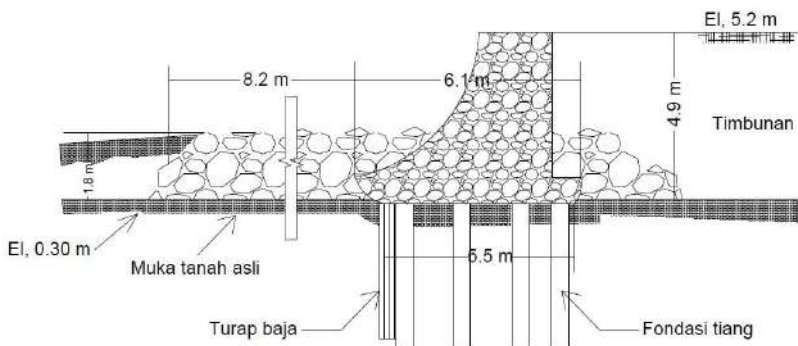
Gambar 7.9. Revetmen Tipe Rubble Mound
(Diadaptasi, Puslitbang SDA, 2007)

Menurut (Triatmodjo, 1999) terdapat beragam jenis dinding pantai atau revetment yang masing-masing memiliki fungsi berbeda tergantung pada bentuknya. Struktur ini dapat dibangun menggunakan berbagai material seperti beton, pasangan batu, susunan balok beton, pondasi tiang, turap baja, kayu, bambu, bronjong, tumpukan batu pecah, maupun pipa beton (buis). Bangunan dengan struktur masif umumnya dirancang untuk menahan gelombang besar dan sesuai dibangun di atas tanah dasar yang relatif kuat. Apabila kondisi tanah dasarnya lunak, maka diperlukan pondasi berupa tiang pancang agar struktur tetap stabil. Sebagaimana terlihat pada Gambar 7.10, dinding pantai yang tersusun dari blok-blok beton biasanya dibangun di atas dasar yang kuat seperti batu karang, dengan tujuan melindungi bangunan penting seperti jalan raya yang berdekatan dengan garis pantai. Pada Gambar 7.11 ditunjukkan struktur bangunan pantai yang menggunakan pondasi tiang dan dilengkapi dengan turap baja. Turap tersebut berfungsi untuk mencegah terjadinya erosi pada tanah fondasi akibat hantaman gelombang serta menghindari fenomena piping yang disebabkan oleh aliran air tanah. Bagian kaki bangunan diperkuat dengan pemasangan batu pelindung sebagai upaya tambahan untuk menahan gerusan air. Desain fondasi harus direncanakan secara cermat agar dapat menghindari terjadinya penurunan tanah yang tidak merata (*differential settlement*), yang

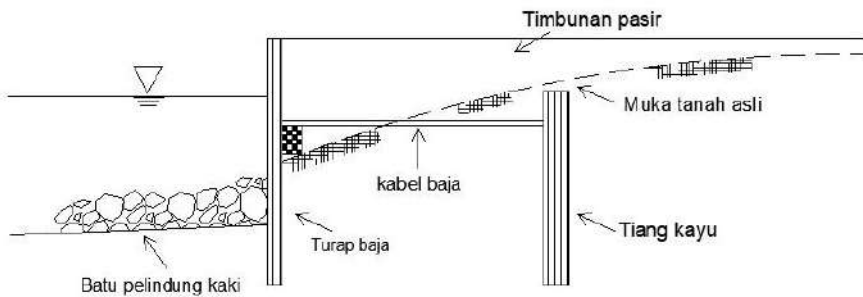
berpotensi menimbulkan keretakan pada struktur bangunan. Selanjutnya, Gambar 7.12 memperlihatkan tipe dinding pantai dengan sisi tegak yang dapat dibangun menggunakan material seperti turap baja, kayu, maupun bambu. Struktur jenis ini tidak hanya berfungsi sebagai pelindung pantai, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai dermaga untuk kapal atau perahu kecil pada kondisi perairan yang tenang. Untuk menahan tekanan tanah dari arah belakang, turap diperkuat menggunakan sistem angker, sedangkan bagian kaki bangunan dilapisi batu pelindung guna mengurangi risiko erosi di sekitar fondasi.



Gambar 7.10. Revetment dari susunan blok beton
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:209)

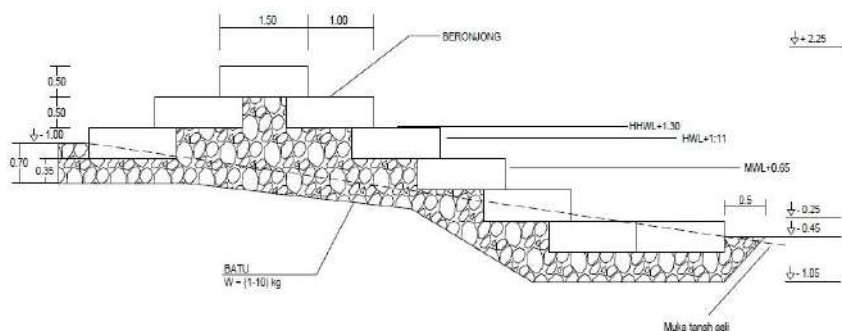


Gambar 7.11. Revetment dari fondasi tiang dan turap baja
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:209)

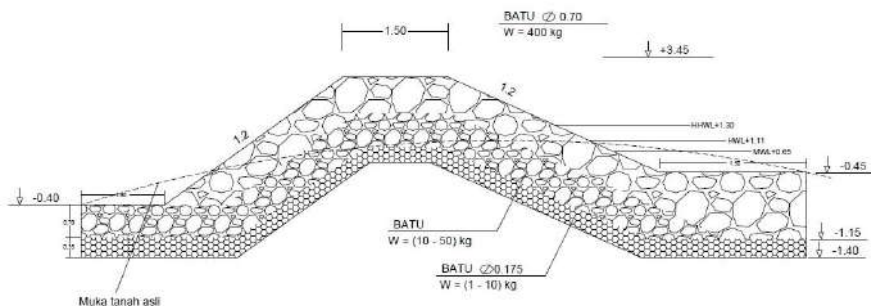


Gambar 7.12. Revetment sisi tegak dari turap baja dan tiang kayu
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:209)

Dinding pantai atau revetment tipe bronjong dibangun dari susunan kotak bronjong seperti terlihat pada Gambar 7.13. Bronjong sendiri merupakan anyaman kawat berbentuk kotak yang diisi batu di dalamnya. Struktur ini berfungsi menyerap energi gelombang, sehingga tinggi puncak bangunan dapat dibuat lebih rendah karena gelombang yang memantul (*run-up*) juga kecil. Kekurangan utama dari bronjong adalah mudahnya kawat anyaman mengalami korosi, yang menjadi penyebab menurunnya umur bangunan. Untuk meningkatkan ketahanannya, kawat biasanya dilapisi bahan plastik (PVC). Sementara itu, dinding pantai atau revetment dari tumpukan batu pecah dibangun berlapis-lapis seperti pada Gambar 7.14. Lapisan terluar terdiri atas batu berukuran besar yang berfungsi sebagai pelindung utama terhadap hantaman gelombang. Di bawahnya terdapat lapisan batu berukuran lebih kecil. Struktur ini bersifat fleksibel karena mampu menyesuaikan diri terhadap penurunan atau konsolidasi tanah dasar. Jika terjadi kerusakan, misalnya runtuhnya batu pelindung, perbaikannya cukup mudah dilakukan dengan menambahkan batu baru pada bagian yang rusak. Oleh sebab itu, diperlukan persediaan batu pelindung di sekitar lokasi konstruksi untuk mempermudah proses perawatan.



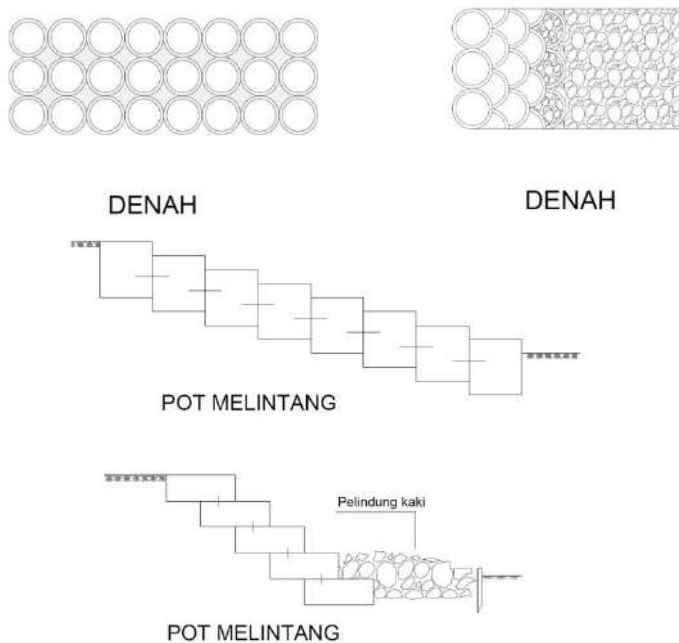
Gambar 7.13. Revetment tipe bronjong
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:210)



Gambar 7.14. Revetment dari tumpukan batu pecah
(Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:210)

Dinding pantai atau revetment yang dibangun dari tumpukan pipa beton (buis beton) seperti diperlihatkan pada Gambar 7.15 merupakan salah satu bentuk struktur pelindung pantai yang umum digunakan di berbagai daerah di Indonesia, seperti Manado, Pangandaran, Pekalongan, Tuban, Bali, dan wilayah lainnya. Struktur ini tersusun dari pipa beton berbentuk silinder yang mudah ditemukan di pasaran, biasanya digunakan untuk gorong-gorong atau sumur gali. Pipa-pipa tersebut disusun sejajar (Gambar 7.15a) maupun bertumpuk (Gambar 7.15b), dan bagian dalamnya dapat diisi dengan batu atau beton siklop. Jika bagian dalamnya menggunakan beton siklop, maka setiap pipa dihubungkan menggunakan angker baja tulangan. Pada susunan sejajar, angker ditempatkan melalui lubang pada pipa, sedangkan untuk susunan bertumpuk, angker dipasang pada bidang pertemuan antar pipa.

Keunggulan jenis bangunan ini adalah proses pembuatannya yang relatif mudah dan cepat, tidak membutuhkan alat berat, biayanya lebih ekonomis, serta memungkinkan pelaksanaan oleh masyarakat secara mandiri. Umumnya, pipa yang digunakan berdiameter sekitar 1 meter, tinggi 0,5 meter, dan tebal 0,1 meter. Penggunaan pipa beton ini umumnya terbatas pada wilayah pesisir dengan perairan dangkal dan kondisi tanah dasar yang cukup keras. Namun, untuk daerah dengan dasar perairan yang lunak, perlu ditambahkan struktur pendukung berupa tiang pancang dari bambu atau kayu guna menjaga kestabilan konstruksi (Triatmodjo, 1999).



Gambar 7.15a dan 7.15b. Revetment dari pipa (*buis*) beton (Diadaptasi, Triatmodjo, 1999:211)

7.4.2 Stabilitas revetmen

Stabilitas revetment tipe rubble mound terhadap tekanan gelombang telah banyak diteliti oleh para ahli dan praktisi teknik pantai. Meski demikian, topik ini tetap menjadi perhatian utama karena kegagalan struktur sering kali disebabkan oleh

ketidakstabilan lapisan pelindung tersebut. Oleh sebab itu, uji model fisik di laboratorium maupun pengamatan lapangan masih terus dilakukan untuk memahami perilakunya secara lebih mendalam (CIRIA, 2007).

Lapisan pelindung atau armor layer pada revetment tidak berfungsi secara individu, melainkan bekerja secara kolektif. Keterikatan antarunit pelindung sangat menentukan kekuatan struktur secara keseluruhan. Karakteristik ikatan ini bergantung pada jenis material yang digunakan dan berpengaruh langsung terhadap kestabilan unit pelindung (U.S. Army Corps of Engineering 1995, US Army Corps of Engineers 2006). Stabilitas unit armor ditentukan oleh koefisien stabilitas yang disingkat KD.

Tingkat kestabilan unit pelindung dinyatakan melalui koefisien stabilitas (KD). Nilai KD ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti bentuk batu atau beton pelindung, tingkat kekasaran permukaan, sudut kemiringan struktur, serta cara gelombang pecah di sekitar bangunan. Semakin besar nilai KD, maka berat batu pelindung yang dibutuhkan semakin kecil, sehingga desain struktur menjadi lebih efisien dan ekonomis. Nilai KD dapat dihitung dengan persamaan Hudson (U.S. Army Corps of Engineering 1995, Matsuda, et al. 2003), berikut:

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

Keterangan: γ_b adalah berat jenis armor/batu (kg/m^3), H adalah tinggi gelombang rencana (m), W adalah berat satuan armor (kg), θ adalah sudut kemiringan struktur sisi laut ($^\circ$). S_r adalah kerapatan relatif unit armor terhadap air laut, yang dihitung dengan persamaan (U.S. Army Corps of Engineering 1995):

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

Keterangan: γ_a adalah berat jenis air tawar/laut berat jenis air (air tawar = 1000 kg/m^3 dan air laut = 1025 kg/m^3).

Selain KD, parameter penting lain dalam perancangan revetment adalah rayapan gelombang (*wave run-up*), yaitu ketinggian maksimum yang dicapai gelombang di atas muka air tenang (*still water level*). Nilai rayapan ini perlu dihitung agar konstruksi aman terhadap limpasan air laut (Pullen et al., 2007). Ketika gelombang menghantam revetment, air akan mengalir naik di permukaan dan kemudian turun kembali; gerakan ini disebut rayapan gelombang, dengan puncaknya dikenal sebagai tinggi rayapan (R_u). Tinggi rayapan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kekasaran permukaan revetment, sudut kemiringan (θ), tinggi gelombang (H), serta panjang dan periode gelombang (L_o dan T). Hubungan empiris antara rayapan dan tinggi gelombang dapat dinyatakan dalam bentuk (US Army Corps of Engineers 2006, CIRIA, CUR and CETMEF 2007):

$$\frac{R_u}{H} = f \cdot (I_r)$$

I_r atau angka Irribaren dihitung dengan persamaan (US Army Corps of Engineers 2006, CIRIA, CUR and CETMEF 2007):

$$I_r = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_o}\right)^{1/2}}$$

Dalam pengujian fisik, model revetment harus memenuhi prinsip geometrik (*geometric similarity*), kinematik (*kinematic similarity*) dan dinamik (*dynamic similarity*) agar hasil simulasi dapat menggambarkan kondisi sebenarnya di lapangan. Keserupaan geometrik berarti bahwa bentuk model dan prototipe memiliki perbandingan skala yang sama pada semua dimensi (panjang, lebar, tinggi, dan kemiringan). Perbandingan skala panjang dinyatakan sebagai : $(L_r) = L_m/L_p$. Dimana indeks r, m, dan p masing- masing menyatakan rasio, model dan prototip. Dengan demikian L_r harus sama untuk semua bagian model. Keserupaan kinematik dicapai apabila keserupaan geometrik terpenuhi, di mana setiap partikel fluida pada model berada pada posisi yang proporsional terhadap

partikel pada prototipe dalam waktu yang sama. Dengan demikian, perancangan model bangunan pantai harus memastikan dimensi dan proporsinya setara agar hasil uji dapat diinterpretasikan secara akurat (Hughes, 1993).

DAFTAR PUSTAKA

- Allan, J C, Kirk, R M, Hemmingsen, M & Hart, D. (1999) Coastal Processes in Southern Pegasus Bay: A Review – A Report to Woodward-Clyde New Zealand Ltd. and the Christchurch City Council. Land and Water Studies Ltd. Christchurch.
- Allsop, N.W.H. (2002). *Breakwaters, coastal structures and coastlines*. Thomas Telford.
- Budiman, 2018. Pengaruh *Screen Layer Breakwater* Terhadap Tinggi Runup Gelombang Pada *Revetment*, Journal INTEK. Volume 5 (1): 7-13
- Beer, Tom (1997). *Environmental oceanography*. Boca Raton: CRC Press. hlm. 44.
- Belyea, R (21 January 1992). The Stanley Park Technical Report. Vancouver: Stanley Park Task Force, prepared by Belyea, Sorensen & Associates. P 15.
- Breteler, M. Klein, K. W. Pilarczyk, dan T. Stoutjesdijk. "Design of Alternatif Revetmen." *Coastal Engineering*, 1998: 1587-1600.
- Carter, Bill (1989). *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines*. Boston: Academic Press. hlm. 50.
- CIRIA, CUR, dan CETMEF. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). Vol. C683. London: CIRIA, 2007.
- CERC, 1984. *Shore Protection Manual, Departement of the Army Waterway Experiment Station, Corps of Engineers*, Coastal Engineering Research Center, Fourth Editioan, U.S. Government Printing Office, Washington, Hampshire, London.
- Council of Europe. (1999) European code of conduct for coastal zones, Council of Europe, Strasbourg.
- Clarke, J R. 1994. Integrated Management of Coastal Zones. Fao Corporate Document Repository, USA.
- GeoResources. (2001) Coastal management. Retrieved online 18 April 2011 from: "archived copy". *Diarsipkan dari asli tanggal 2012-08-01. Diakses tanggal 2011-04-30*.

- Hughes, Steven A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993.
- Hendra, H. 2011. Pengaruh Pelindung Kaki Tipe Pancang Terhadap Run Up Gelombang pada Revetmen, Tesis. Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Hsiung AR, Tan WT, Loke LHL, Firth LB and others (2020) Little evidence that lowering the pH of concrete supports greater biodiversity on tropical and temperate seawalls. *Mar Ecol Prog Ser* 656:193-205
- Kamphuis, W J. (2010) Introduction to Coastal Engineering and Management. World Scientific Publishing Co Ltd. Singapore.
- Kusuma, Adriana Nina (9 October 2014). "Indonesia Holds Groundbreaking Ceremony for Giant Sea Wall". The Jakarta Globe. Diarsipkan dari versi asli tanggal 2015-08-01. Diakses tanggal 10 october 2014.
- Kraus, N & McDougal. (1996) *The Effects of Seawalls on the Beach: Part I: An Updated Literature Review* in Journal of Coastal Research. Vol. 12, No. 3.
- Mangor, Karsten. Shoreline Management Guidelines. Hørsholm; Denmark : DHI Water & Environment, 2004.
- Matsuda, Setsuo, Akira Matsumoto, Wakiro Nishigori, Minoru Hanzawa, dan Michio Matsuoka. "Crown Height Effects on Stability of Flat Type Concrete Armor Blocks." The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.631-638.
- Masselink, G and Hughes, M J. (2003) *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Oxford University Press. New York. Ch 11.
- Milligan J, O'riordan T (2007). "Governance for Sustainable Coastal Futures". *Coastal Management*. **35** (4): 499–509.
- NOAA. (2007) Shoreline Management: Alternatives to Hardening the Shore. Retrieved online 15 April 2011.
- Pullen, T., N.W.H. Allsop, T. Kortenhaus, A. Bruce, A. Schüttrumpf, dan J.W. van der Meer. EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Oxford,

- UK: Environmental Agency, UK; German Coastal Engineering Research Council, Germany; Rijkswaterstaat, Netherlands, 2007.
- Puslitbang SDA. Revetmen (Pelindung Pantai) Tipe Blok Beton Bergigi. Bandung: Puslitbang SDA, Balitbang Departemen PU, 2007.
- Puslitbang SDA. Teknologi Penanggulangan Erosi Pantai dengan Revetmen Blok Beton Berkait (3B). Jakarta: Kementerian PU, 2011.
- Raban, A., 2009, "Pelabuhan Sebastos (Caesarea Maritima) dalam Konteks Romawi Mediterania", ed. Artzy, Goodman & Gal, Seri International BAR No. 1930, Oxford, (222 hlm).
- Shankar, N.J., and Jayaratne, M.P.R., 2002. Wave Runup and Overtopping on Smooth and Rough Slopes of Coastal Structure, *Coastal Engineering*, Elsevier, 30 (2003), 221-238.
- Shipman, Brian; Stojanovic, Tim (2007), "Facts, Fictions, and Failures of Integrated Coastal Zone Management in Europe", *Coastal Management*, 35 (2-3): 375-398.
- Short, A. (1999) Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. John Wiley and Sons Ltd. Ch 7.
- Triatmodjo, B. 1999. Teknik Pantai. Beta Offset, Yogyakarta.
- U.S. Army Corps of Engineering. Design of Coastal Revetments, Seawall and Bulkheads. Washington, USA: U.S. Army Corps of Engineering, 1995.
- US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual. USA: US Army Corps of Engineers, 2006.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Imam Rohani, ST., MT.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Luwu, tanggal 1 Juli 1981. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sulawesi Barat. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik sipil universitas Tadulako dan melanjutkan S2 & S3 pada Jurusan Teknik sipil universitas Hasanuddin. Karya Buku yang telah diterbitkan antara lain: Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa, Aliran Eksternal dan Mekanika Fluida Untuk Bidang Ilmu Rekayasa Lanjut, Teknik Sungai Berkelanjutan, dan Hidrologi.

BIODATA PENULIS



Ir. Andi Imran Anshari, M.Si

Dosen Program Studi Teknik Kelautan
Jurusan Teknologi Kemaritiman, Politeknik Pertanian Negeri
Pangkep

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 02 Agustus 1967. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kelautan Jurusan Teknologi Kemaritiman Politeknik Pertanian Negeri Pangkep. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Perikanan dan Melanjutkan Pendidikan S2 pada Jurusan Ilmu Perikanan Universitas Hasanuddin. Penulis Saat ini sebagai Asesor Kompetensi BNSP.

BIODATA PENULIS



Irwan, S.T.,M.T.

Dosen Teknik Kelautan
Jurusan Teknologi Kemaritiman Politeknik Negeri Pertanian
Pangkajene Kepulauan

Penulis lahir di Kota Parepare tanggal 1 November 1983 Anak keempat dari pasangan Mappe Gani dan Netti Herawati. Penulis adalah dosen pada Program Studi Pendidikan Teknik Kelautan Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Tahun 2009 dan menyelesaikan S2 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Tahun 2015. Penulis menekuni bidang Penelitian Teknik Kelautan dan Teknik Pantai.

BIODATA PENULIS



Lulut Alfaris, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknologi Kelautan
Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran

Penulis menyelesaikan pendidikan menengah di SMAN 1 Genteng, Banyuwangi. Selanjutnya, pendidikan sarjana (S1) dan magister (S2) ditempuh di Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Saat ini, penulis mengabdikan diri sebagai dosen tetap di Program Studi Teknologi Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran. Di perguruan tinggi tersebut, penulis dipercaya untuk mengampu beberapa mata kuliah, di antaranya Matematika Teknik, Statistika, dan Oseanografi.

BIODATA PENULIS



Budiman

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Fakfak

Penulis lahir di Soppeng, Tanggal 27 Maret 1984, Anak ke enam dari Pasangan Sodding dan Nadira. Penulis adalah Dosen Program Studi Teknik Sipil Bidang Teknologi Bahan Politeknik Negeri Fakfak. Menyelesaikan Pendidikan S1 dan S2 di Universitas Hasanuddin. Penulis saat ini aktif mengajar mata kuliah Teknologi Material, Teknologi Pantai dan Pelabuhan dan sebagai Tenaga Ahli Penjaminan Mutu Direktorat Penjaminan Mutu Pendidikan Tinggi Vokasi Periode 2024-2026, Asesor Kompetensi BNSP 2016-sekarang dan Wakil Direktur Bidang Akademik Periode 2025-2029.