

DISERTASI

**KINERJA MODEL PEMECAH GELOMBANG KOMPOSIT
VERTIKAL BALOK-KOTAK, BATU DAN TIANG**

*PERFORMANCE OF VERTICAL COMPOSITE BREAKWATER
MODEL OF BOX-BEAMS, ROCK AND PILES*

FRANS RABUNG

NIM P0800314016



PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2019



**KINERJA MODEL PEMECAH GELOMBANG KOMPOSIT
VERTIKAL BALOK-KOTAK, BATU DAN TIANG**

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi
Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

FRANS RABUNG

kepada

**SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2019**



DISERTASI

KINERJA MODEL PEMECAH GELOMBANG KOMPOSIT
VERTIKAL BALOK-KOTAK, BATU DAN TIANG

Disusun dan diajukan oleh

FRANS RABUNG

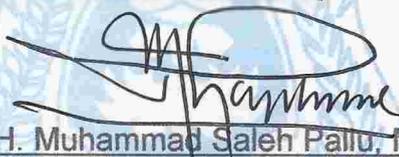
Nomor Pokok P0800314016

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi

Pada tanggal 25 Januari 2019

dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasehat


Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng
Promotor


Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT
Kopromotor


Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D
Kopromotor

Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin


Adji Adisasmita, MS., M.Eng.Sc., Ph.D Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT



PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : FRANS RABUNG
Nomor mahasiswa : P0800314016
Program studi : Doktor Ilmu Teknik Sipil
Konsentrasi : Teknik Pantai

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi dengan judul:

KINERJA MODEL PEMECAH GELOMBANG KOMPOSIT VERTIKAL BALOK-KOTAK, BATU DAN TIANG

yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil-alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebahagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Januari 2019

Yang menyatakan,

Frans Rabung



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa dan Maha Pengasih atas selesainya disertasi ini.

Pikiran yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap keberadaan pelabuhan-pelabuhan laut khususnya di bahagian timur Indonesia yang tidak optimal, baik dalam hal operasional maupun umur berfungsinya, akibat ketiadaan pemecah gelombang sebagai pelindung terhadap serangan ombak dari laut. Keprihatinan penulis juga tertuju kepada kerusakan pantai di Indonesia yang semakin luas, karena ketiadaan pelidung pantai yang memadai. Semua kekurangan itu umumnya disebabkan oleh kesulitan dalam teknologi dan mahalnya biaya yang dibutuhkan untuk pembangunan suatu pemecah gelombang atau konstruksi pelindung pantai. Penulis bermaksud menyumbangkan suatu konsep untuk mengatasi kesulitan-kesulitan tersebut.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan disertasi ini, yang hanya berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, maka disertasi ini selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Muh. Saleh Pallu, M.Eng. sebagai Ketua Tim Komisi Penasehat (Promotor).

2. Dr. Muh. Arsyad Thaha, MT sebagai Anggota Tim Komisi Penasehat (Promotor).



3. Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D. sebagai Anggota Tim Komisi Penasihat (Kopromotor).
4. Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng., Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, MS, M.Eng.Sc., Ph.D, Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT, Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, MT selaku penguji internal.
5. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, MT selaku Dekan Fakultas Teknik UNHAS,
6. Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng. selaku Ketua Departemen Sipil Fakultas Teknik UNHAS.
7. Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, MS, M.Eng.Sc., Ph.D. selaku Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil UNHAS.
8. Prof. Jon B. Hinwood (retired), Research Affiliate Monash University, yang terus mendorong dan mengikuti penelitian-penelitian saya.
9. Staff Departemen Sipil Fakultas Teknik UNHAS, khususnya Ibu Diana bahagian administrasi program S3.
10. Achmad Yani, staff teknik Laboratorium Hidrolika Fakultas Teknik UNHAS.
11. Mahasiswa-mahasiswa program S1 yang membantu saat pelaksanaan pemodelan fisik (*physical modelling*), khususnya Sdr. Darius Leyn dan Muhammad Hasbi Sudirman.
12. Ir. Erik, MT, dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UKIP Paulus Makassar yang telah membantu penyelesaian masalah-masalah

ronika peralatan *data acquisition* (DAQ) pada awal pekerjaan
erimen di laboratorium.



13. Eva Maria Sosang, SAP, isteri saya tercinta yang dengan setia mendampingi dan mendorong penyelesaian studi ini selama bertahun-tahun.
14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu di sini yang telah membantu penyelesaian studi ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Karya ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua penulis, Petrus Tanggo Rabung dan Margaretha Tirumbu Siko, yang tak kenal lelah terus menopang dan mendorong anak-anaknya untuk rajin belajar sejak masa kanak-kanak. Semoga kini mereka dapat beristirahat dengan tenang di rumah Bapa di surga.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini tidak luput dari kekurangan. Untuk itu penulis terbuka bagi saran dan kritik yang konstruktif dari semua pihak demi penyempurnaan disertasi ini. Akhir kata, semoga disertasi ini bermanfaat bagi masyarakat khususnya dunia ke-pantai-an Indonesia sebagaimana dimaksudkan sejak semula.

Makassar, Januari 2019

Penulis,

Frans Rabung



ABSTRAK

FRANS RABUNG. *Kinerja Model Pemecah Gelombang Komposit Vertikal Balok-Kotak, Batu dan Tiang.* (dibimbing oleh Muh. Saleh Pallu, Arsyad Thaha dan Achmad B. Muhiddin).

Sebagai negara kepulauan yang memiliki pantai terpanjang kedua di dunia, Indonesia membutuhkan banyak pemecah gelombang (termasuk groin dan revetment) tidak hanya untuk melindungi pantai dari penggerusan tetapi juga demi menjaga ketenangan air di kolam pelabuhan untuk manuver kapal dan operasi bongkar-muat. Akan tetapi, sampai sekarang di Indonesia, banyak konstruksi pemecah gelombang dan revetment tidak memperhatikan teknik perencanaan dan pembangunan dengan baik atau bahkan tidak ada sama sekali pada tempat-tempat yang seharusnya ada. Banyak pemecah gelombang, groin dan revetment yang telah dibangun untuk melindungi pantai-pantai yang kritis tidak bertahan lama. Contoh terdekat adalah Pantai Tanjung Bunga, Makassar. Beberapa groin yang dibangun di Pantai Akkarena rusak hanya dalam beberapa tahun. Sebuah pemecah gelombang yang terbuat dari silinder-silinder beton, runtuh sebelum selesai.

Penyebab kelangkaan pembangunan pemecah gelombang yang baik adalah biaya tinggi akibat banyaknya dan ukuran material yang dibutuhkan serta kesulitan bekerja di kedalaman laut. Studi ini mencari jalan keluar berupa pemecah gelombang vertikal yang berfungsi seperti pemecah gelombang gundukan batu konvensional. Telah diketahui bahwa pemecah gelombang gundukan batu konvensional adalah yang paling efektif meredam energi gelombang (baik transmisi maupun refleksi), dan bahkan setelah runtuh pun masih dapat berfungsi; dengan sedikit perbaikan pada kerusakan, ia akan berfungsi lagi semakin baik. Persoalan utama adalah kebutuhan material yang sangat banyak, dan sebahagian harus dalam ukuran besar. Material ini biasanya diperoleh dari peledakan gunung-gunung batu yang berkualitas baik ($SG > 2.7$), hal yang sekarang sulit dilakukan karena issue lingkungan. Dengan pemecah gelombang vertikal, ukuran dan jumlah batu yang dibutuhkan sangat berkurang.

Penelitian ini memberikan solusi berupa pemecah gelombang gundukan batu yang vertikal sehingga lebih murah, lebih mudah dilaksanakan, multi fungsi dan lebih ramah lingkungan. Pemecah gelombang ini merupakan komposit dari balok-kotak, gundukan batu dan tiang.

Kata kunci: pemecah gelombang; transmisi; refleksi; model; hidrodinamis.



ABSTRACT

FRANS RABUNG. *Performace of Vertical Composite Breakwater Model of Box-Beams, Rock and Piles.*(supervised by Muh. Saleh Pallu, Arsyad Thaha and Achmad B. Muhiddin).

As an archipelago country that has the second longest coast line in the world, Indonesia requires a lot of breakwaters, including groin and revetment, not only to protect coasts from scouring but also to keep water in port basins still enough for ship maneuvers and loading-unloading operations. However, until now in Indonesia, many constructions of breakwater and revetment do not consider coastal engineering and management carefully. There were many breakwaters, groins and revetment built to protect critical beaches, but the design and construction methods were unprofessional so that they did not last long. The closest example is coast of Tanjung Bunga, Makassar. Some groins built on Akkarena beach, were destroyed only after several years. A breakwater built using concrete cylinders, collapsed before it was finished.

The cause of scarcity of building good breakwaters is high cost required due to the amount of material needed and the difficulty of work at sea depth. This study will look for a way out in the form of vertical breakwaters which function like conventional rubble mound breakwater. It is known that rubble-mound breakwaters are the most effective for absorbing wave energy (either transmission or reflection), and even if broken they still can function; with light repair to the damage, they will return to even better functioning. The main problem is material required for a rubble-mound breakwater is so much and some shall be in great size. This material is usually obtained from blasting rocky mountain of good quality rock ($SG > 2.7$), which is now difficult to do because of environmental issues. By vertical breakwaters, the size and amount of stone required will be much reduced.

This study solves the problems in the form of a vertical composite rubble mound breakwater which is cheaper, easier to construct, multi functions and more environmental friendly. This breakwater is a composite of box-beams, rubble mound and supporting piles.

Key words: Breakwater; transmission; reflection; model; hydrodynamic.



DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGANTAR	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN	xxii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	8
D. Manfaat Penelitian	10
E. Ruang Lingkup/Batasan Penelitian	11
F. Kebaruan Penelitian	15
G. Sistematika Penulisan	17
DAFTAR PUSTAKA	22
Perkembangan Pemecah Gelombang Gundukan Batu	22



B.	Perkembangan Pemecah Gelombang Vertikal	41
C.	Efektifitas Pemecah Gelombang	51
D.	Teori Gelombang yang Digunakan	78
E.	Kerangka Konseptual, Teori Model, Analisa Dimensi dan Reynold Number	95
III.	MATERI DAN METODE PENELITIAN	108
A.	Data Angin	108
B.	Peramalan Gelombang	123
C.	Rancangan Penelitian dan Skala Model	131
D.	Waktu dan Lokasi Penelitian	136
E.	Bahan dan Alat	138
F.	Persiapan Test dan Kalibrasi-kalibrasi	149
G.	Pelaksanaan Test dan Definisi Operasional	160
H.	Teknik Analisis Data	174
IV.	DESKRIPSI HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	176
A.	Gelombang Refleksi	176
B.	Gelombang Tranmisi	183
C.	Energi yang Hilang	188
D.	Hubungan C_r , C_t , C_L	191
E.	Permeabilitas - Porositas	195
F.	Runup dan Rundown	200
G.	Erosi pada Kaki Struktur	202
H.	Pengaruh Balok-Kotak	204
I.	Gambaran Perbandingan Biaya dan Kemudahan Pembangunan	207
J.	Intisari Kinerja Hidrodinamis	213
	SIMPULAN DAN SARAN	219
	Kesimpulan	219
	Saran	221



DAFTAR RUJUKAN	223
LAMPIRAN (buku II)	230



DAFTAR TABEL

nomor	halaman
Tabel 2.1. Hubungan antara jenis struktur dengan parameter $H_s/\Delta D_{n50}$ dan $H_o T_o$	34
Tabel 2.2. Intisari sejarah perkembangan pemecah gelombang	50
Tabel 3.1. Rata-rata statistik dan maksimum 1% tahunan dari kecepatan angin rata-rata harian diurut dari yang terbesar sampai terkecil	113
Tabel 3.2. Pengepasan (<i>fitting</i>) kecepatan maksimum tahunan dari angin harian rata-rata ke dalam beberapa fungsi distribusi menurut metode Goda 1989 – ACES 1992	115
Tabel 3.3. Perhitungan kecepatan angin harian maximum dengan periode ulang U_R , angin rencana dengan tingkat keyakinan 90% U_{RD} dan probabilitas kejadian dalam 30 tahun Pe dengan Weibull ($k=2.0$)	117
Tabel 3.4. Koefisien-koefisien untuk perhitungan deviasi standar periode ulang	117
Tabel 3.5. Rata-rata statistik dan maksimum 1% tahunan dari kecepatan angin terbesar harian diurut dari yang terbesar sampai terkecil	119
Tabel 3.6. Pengepasan (<i>fitting</i>) kecepatan maksimum tahunan dari angin harian terbesar ke dalam beberapa fungsi distribusi menurut metode Goda 1989 – ACES 1992	120
Tabel 3.7. Perhitungan kecepatan angin terbesar maximum dengan periode ulang U_{fR} , angin rencana dengan tingkat keyakinan 90% U_{fD} , dan probabilitas kejadian dalam 30 tahun Pe dengan Fisher-Tippett I	121
Tabel 3.8. Pengecekan teori gelombang yang berlaku menurut pedoman Gambar 1.5	130
9. Jadwal pelaksanaan penelitian di laboratorium	137



DAFTAR GAMBAR

nomor	halaman
Gambar 1.1. Pemecah gelombang dari silinder-silinder beton di suatu lokasi di pantai Tanjung Bunga, Makassar	4
Gambar 1.2. Dua buah groin gundukan batu yang telah runtuh di pantai Tanjung Bunga, Makassar	5
Gambar 1.3. Sketsa model pemecah gelombang vertikal komposit balok-kotak dan tiang pancang dengan pengisi batu	9
Gambar 1.4. Contoh pemecah gelombang yang sisi dalamnya berfungsi pula sebagai dermaga	11
Gambar 1.5. Berbagai teori gelombang dan batasan berlakunya menurut Le Mehaute	13
Gambar 2.1. Profil melintang tipikal dari pemecah gelombang gundukan batu konvensional	26
Gambar 2.2. Profil melintang tipikal dari pemecah gelombang gundukan batu konvensional dengan penutup beton yang berat	26
Gambar 2.3. Profil melintang tipikal dari pemecah gelombang gundukan batu konvensional untuk perhitungan perbandingan volume	27
Gambar 2.4. Pemecah gelombang gundukan batu konvensional vs <i>berm breakwater</i>	28
Gambar 2.5. Profil keseimbangan <i>berm breakwater</i>	30
Gambar 2.6. Profil final pemecah gelombang Grassy, King Island	36
Gambar 2.7. Equilibrium beach profile menurut Bruun dan Dean	38
2.8. Skema ringkasan perkembangan pemecah gelombang gundukan batu sisi miring	40
2.9. Pemecah gelombang caisson konvensional	42



Gambar 2.10.	Pemecah gelombang caisson komposit vertikal	42
Gambar 2.11.	Pemecah gelombang caisson komposit horizontal	43
Gambar 2.12.	Pemecah gelombang <i>perforated front wall caisson</i>	43
Gambar 2.13.	Pemecah gelombang blok beton	44
Gambar 2.14.	Berbagai pemecah gelombang dinding vertikal	45
Gambar 2.15.	Beberapa tipe dari pemecah gelombang vertikal <i>partial protection</i>	48
Gambar 2.16.	<i>Pile-supported vertical wall breakwater</i>	49
Gambar 2.17.	<i>Double rows piles breakwaters</i> dari Koraim	49
Gambar 2.18.	Koef. refleksi gelombang K_r sebagai fungsi dari <i>surf similarity</i> ξ untuk pemecah gelombang gundukan batu, dinding mulus dan pantai alamiah	54
Gambar 2.19.	Koefisien transmisi gelombang K_t untuk pemecah gelombang gundukan batu	55
Gambar 2.20.	Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang vertikal full protection	57
Gambar 2.21.	Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang komposit vertikal	57
Gambar 2.22.	Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang <i>perforated caisson</i>	58
Gambar 2.23.	Koefisien gelombang refleksi C_r dan transmisi C_t untuk pemecah gelombang <i>single perforated screen</i>	58
Gambar 2.24.	Koefisien gelombang transmisi C_t untuk pemecah gelombang komposit vertikal	62
Gambar 2.25.	Koefisien gelombang transmisi C_t untuk pemecah gelombang komposit horizontal	62
2.26.	Model pemecah gelombang gundukan batu vertikal berdinding tipis	66



Gambar 2.27.	Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang relatif (D/h dan B/h) pada koefisien transmisi	67
Gambar 2.28.	Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang relatif (D/h dan B/h) pada koefisien refleksi	68
Gambar 2.29.	Model <i>perforated skirt breakwater</i> (PSB) dari pelabuhan LNG Tangguh, Teluk Bintuni, Papua.	69
Gambar 2.30.	Perbandingan gelombang transmisi dari PSB (Wurjanto dengan HSAR (Armono)	69
Gambar 2.31.	Skets dari caisson kombinasi: (a) penampang melintang; (b) tapak; (c) caisson kombinasi dalam pembangunan di pelabuhan Siracusa, Italy	70
Gambar 2.32.	Perbandingan hasil-hasil semi-analitis dengan eksperimen dari caisson kombinasi	71
Gambar 2.33.	Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang batu vertikal (D/h dan kB) terhadap energi transmisi, refleksi, dan hilang	74
Gambar 2.34.	Pengaruh tinggi relatif (kh) pemecah gelombang dinding vertikal berlubang terhadap energi transmisi, refleksi, dan hilang berdasarkan analisis dan eksperimen	75
Gambar 2.35.	Definisi variabel-variabel dasar dalam <i>small amplitude wave theory</i>	81
Gambar 2.36.	Variabel-variabel dalam penurunan rumus energi gelombang	86
Gambar 2.37.	Perbandingan profil gelombang linier dan orde kedua dari Stoke	90
Gambar 2.38.	Perbandingan hasil analisis numerik gelombang linier dan gelombang orde kedua serta hasil eksperimen dengan gelombang linier pada dinding berlubang dengan $\varepsilon=0,5$, $f=2$, $cm=0$	92
Gambar 2.39.	Paradigma penelitian (hubungan antar variabel)	97
Gambar 2.40.	Parameter-parameter pada model	98
Gambar 2.41.	Lokasi probe 1 dan 2 untuk pengukuran H_{max} dan H_{min}	107



Gambar 3.1.	Laut Jawa sebagai lorong angin musim barat	109
Gambar 3.2.	Panjang fetch di depan pantai Makassar lebih dari 1500 km	109
Gambar 3.3.	Windrose angin terbesar (<i>wind gusts</i>) selama 20 tahun di pantai Makassar	110
Gambar 3.4.	Rasio dari kecepatan angin berdurasi sembarang, U_t , dengan kecepatan angin berdurasi satu jam, U_{3600}	122
Gambar 3.5.	Nomogram untuk prediksi gelombang di air dalam	127
Gambar 3.6.	Prediksi gelombang signifikan dari BMKG tanggal 26 Nopember 2017 saat terjadinya siklon tropis Cempaka dan Dahlia yang berturut-turut	128
Gambar 3.7.	Prediksi gelombang signifikan dari BMKG tanggal 23 Desember 2017 saat terjadinya siklon tropis Kai Tak dan Tembin yang berturut-turut	128
Gambar 3.8.	Flowchart rancangan penelitian	131
Gambar 3.9.	Menyiapkan model	137
Gambar 3.10.	Cara pembuatan dan pemasangan balok-kotak: (a) dengan 4 kotak, (b) dengan 5 kotak	139
Gambar 3.11.	Kerangka model I dengan kotak-kotak bersisi 1.5 cm (kiri), dan model II dengan sisi 2.5 cm (kanan). Ukuran depan model 30 x 44 cm	140
Gambar 3.12.	Material batu untuk model I (sisi 1.5 cm) dan model II (sisi 2.5 cm)	141
Gambar 3.13.	Tiga buah <i>wave probe</i> dengan dua buah <i>wave monitor</i> tipe H40 buatan Armfield, England	142
Gambar 3.14.	Analog to digital data converter buatan Eagle Technology, South Africa	143
Gambar 3.15.	Rangkaian <i>wave probe</i> , <i>wave monitor</i> , <i>data converter/DAQ</i> , komputer desktop dengan penampilan software WaveView	144



Gambar 3.16. Saluran gelombang (<i>wave flume</i>) tipe S6MKII-15M buatan Armfield, England	144
Gambar 3.17. Motor pembangkit gelombang (a), dan <i>wave paddle</i> tipe flap (b)	146
Gambar 3.18. Peredam gelombang berupa bantalan yang disusun terbuat dari jaringan serat sintetis	147
Gambar 3.19. Hasil kalibrasi pembangkit gelombang untuk kedalaman air 20 cm (a), 25 cm (b), 30 cm (c) pada ayunan tetap skala 7	155
Gambar 3.20. Hasil kalibrasi <i>wave probes</i> 1 (a), 2 (b), dan 3 (c) pada kedalaman air 30 cm, 25 cm, 20 cm	156
Gambar 3.21. Perbandingan <i>runup</i> dan <i>rundown</i> relatif berbagai tipe sisi miring	164
Gambar 3.22. Gelombang tidak pecah saat menabrak permukaan model balok-kotak sehingga tidak ada <i>runup</i> . Model dengan lebar batu 10 cm dan kedalaman air 30 cm	165
Gambar 3.23. Model <i>perforated caisson</i> dari kayu untuk pembanding <i>toe erosion</i>	166
Gambar 3.24. Keadaan batu pelindung: (atas) sebelum percobaan, (tengah) model I setelah percobaan, (bawah) <i>perforated caisson</i> setelah percobaan	169
Gambar 3.25. Percobaan dengan model balok-kotak dan tiang tanpa pengisi batu, lebar kotak kosong 20 cm	170
Gambar 3.26. Perbandingan volume material batu antara pemecah gelombang konvensional vs balok-kotak	172
Gambar 4.1. Hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan tinggi gelombang datang H_i , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	178
Gambar 4.2. Hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan lebar batu pengisi B , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	180



Gambar 4.3.	Hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan kedalaman air h , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	182
Gambar 4.4.	Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan tinggi gelombang datang H_i , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	183
Gambar 4.5.	Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan lebar batu pengisi B , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	184
Gambar 4.6.	Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan lebar batu pengisi B , bila seluruh data $B/w = 2.5, 5$ dan 7.5 digabung	185
Gambar 4.7.	Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan kedalaman air h , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	186
Gambar 4.8.	Hubungan antara koefisien energi hilang C_L dengan tinggi gelombang datang H_i , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	188
Gambar 4.9.	Hubungan antara koefisien energi hilang C_L dengan lebar batu pengisi B , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas batu n	189
Gambar 4.10.	Hubungan antara koefisien energi hilang C_L dengan kedalaman air h , angka gelombang $k=2\pi/L$, lebar balok-kotak B/w , dan porositas n	190
Gambar 4.11.	Hubungan antara C_t , C_r , dan C_L dengan kH_i untuk masing-masing porositas $n = 0.57$ dan $n = 0.55$	191
Gambar 4.12.	Hubungan antara C_t , C_r , dan C_L dengan kB untuk masing-masing porositas $n = 0.57$ dan $n = 0.55$	193
Gambar 4.13.	Hubungan antara C_t , C_r , dan C_L dengan kh untuk masing-masing porositas $n = 0.57$ dan $n = 0.55$	194
Gambar 4.14.	Pengaruh porositas n terhadap nilai C_r	197
Gambar 4.15.	Pengaruh porositas n terhadap nilai C_t	198
Gambar 4.16.	Pengaruh porositas n terhadap nilai C_L	199



Gambar 4.17. Contoh lain dengan lebar 30 cm dan kedalaman 20 cm, tidak terjadi gelombang pecah, tak ada runup	200
Gambar 4.18. Erosi pada kaki struktur setelah intensitas gelombang yang sama: (a) keadaan awal, (b) pada model I, (c) pada model pembanding	203
Gambar 4.19. Percobaan dengan model balok-kotak dan tiang tanpa pengisi batu, lebar kotak kosong 10 cm	205
Gambar 4.20. Hubungan antara koefisien transmisi C_t dengan lebar gundukan batu B untuk seluruh data $n=0.57$ dan $n=0.55$	213
Gambar 4.21. Hubungan antara koefisien refleksi C_r dengan lebar gundukan batu B untuk seluruh data $n=0.57$ dan $n=0.55$	215
Gambar 4.22. Hubungan antara koefisien kehilangan energi C_L dengan lebar gundukan batu B untuk seluruh data $n=0.57$ dan $n=0.55$	216
Gambar 4.23. Perbandingan hasil penelitian Rageh (2009) dengan studi ini	217



DAFTAR LAMPIRAN

nomor		halaman
1.	Data Angin dari BMKG Wilayah IV Makassar	230
	A. Tabel Kecepatan Angin Harian Rata-rata	231
	B. Tabel Arah Angin Harian Terbanyak	235
	C. Tabel Kecepatan Angin Harian Terbesar	239
	D. Tabel Arah Angin Harian Terbesar	243
2.	Data Kalibrasi-kalibrasi	247
	A. Kalibrasi Pembangkit Gelombang	248
	B. Kalibrasi Wave Probes	249
3.	Data Pemeriksaan Laboratorium Agregat	250
	A. Test Results of General Properties of Rocks	251
4.	Tabel Analisis Gelombang	252
	A. Tabel Analisis Gelombang Refleksi Model I	253
	B. Tabel Analisis Gelombang Transmisi Model I	256
	C. Tabel Analisis Energi Hilang Model I	259
	D. Tabel Analisis Gelombang Refleksi Model II	262
	E. Tabel Analisis Gelombang Transmisi Model II	265
	F. Tabel Analisis Energi Hilang Model II	268



DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

simbol/singkatan arti dan keterangan

.	pecahan desimal pengganti koma
a	amplitudo gelombang
a_x	percepatan horizontal partikel air
a_y	percepatan vertikal partikel air
ACES	Automated Coastal Engineering System
b	lebar suatu bahagian struktur
B	lebar puncak gundukan batu
BMKG	Biro Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
C	kecepatan rambat gelombang
CEM	Coastal Engineering Manual
CERC	Coastal Engineering Research Centre
d	kedalaman air tenang di laut dalam
D	tinggi total pemecah gelombang vertikal
E	energi gelombang
E_i	energi gelombang datang/total
E_r	energi gelombang refleksi
E_t	energi gelombang transmisi
E_L	energi gelombang yang hilang/diserap
g	percepatan gravitasi
h	kedalaman air tenang di depan pemecah gelombang
H	tinggi gelombang secara umum
H_o	tinggi gelombang di air dalam
H_i	tinggi gelombang yang terjadi/datang
	tinggi gelombang yang direfleksikan
	tinggi gelombang yang ditransmisikan
	angka gelombang = $2\pi/L$



L	panjang gelombang
L_o	panjang gelombang di air dalam
SPM	Shore Protection Manual
u	kecepatan horizontal partikel air
USACE	The United States Army Corps of Engineers
v	kecepatan vertikal partikel air
ξ	percepatan horizontal partikel air
ε	percepatan vertikal partikel air
η	tinggi permukaan air pada suatu saat



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pemerintahan Joko Widodo – Jusuf Kalla sangat menyadari kekuatan, kelemahan, kesempatan dan tantangan yang dihadapi Indonesia dalam keberadaannya sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai terpanjang di dunia. Kekayaan yang terkandung dalam lautnya dapat memberi kemakmuran bagi Indonesia dalam jangka panjang, tetapi tantangan untuk mendapatkan dan mengolahnya tidaklah kecil. Oleh karena itu sejak awal pemerintahannya Jokowi – JK segera mencanangkan program toll-laut Indonesia dan Indonesia sebagai poros maritim dunia.

Toll-laut adalah kebutuhan agar transportasi dari ujung barat sampai ke ujung timur Indonesia berjalan lancar dan cepat, sehingga kebutuhan pangan rakyat dan material untuk pembangunan serta perdagangan umum bisa mudah dan murah didapatkan di mana saja di Indonesia. Sedang program poros maritim dunia dibutuhkan Indonesia untuk melancarkan perdagangannya dengan seluruh dunia. Walaupun kekayaan dari laut melimpah tetapi kalau sulit dijual ke seluruh dunia maka manfaatnya bagi

Indonesia tidak akan maksimal, bahkan lama-kelamaan akan habis tanpa manfaat yang berarti bagi rakyat sebagaimana telah



terjadi dengan minyak bumi dan kayu hutan. Yang tersisa sekarang adalah banjir di musim hujan dan kekeringan di musim panas akibat hutan gundul.

Agar toll-laut dan perdagangan internasional sebagai poros maritim dunia dapat berjalan lancar, dibutuhkan pelabuhan-pelabuhan laut baik yang besar maupun yang kecil yang dapat beroperasi dalam segala keadaan, tidak dibatasi oleh cuaca dan keadaan laut seperti kolam pelabuhan yang sempit atau kedalaman yang kurang akibat sedimentasi. Untuk mendapatkan pelabuhan-pelabuhan yang berkualitas diperlukan pemecah-pemecah gelombang yang berkualitas pula. Pemecah gelombang yang baik akan menghindarkan kolam pelabuhan dari gelombang-gelombang besar dan mencegah sedimentasi dalam kolam pelabuhan, sehingga kapal-kapal dapat berlabuh dan melakukan kegiatan bongkar-muat setiap saat; pelabuhan pun dapat berfungsi baik dalam jangka waktu panjang sedemikian sehingga modal investasi dapat kembali bahkan keuntungan dari sewa pelabuhan dapat diperoleh.

Untuk memanfaatkan dan melestarikan kekayaan laut Indonesia, bukan hanya toll-laut dan poros maritim dunia yang dibutuhkan, melainkan pantainya pun perlu dipelihara. Pantai adalah batas sebuah pulau atau daratan, aset utama sebuah negara; tanpa daratan tidak ada negara. Pantai bukan saja tempat bermukim para nelayan atau tempat rekreasi bagi orang yang mencari penyegaran, melainkan juga tujuan akhir dari pengaliran air

permukaan maupun bawah permukaan tanah yang melalui sungai
maupun segala macam kandungan. Bahkan pantai adalah habitat dan



tempat berkembang biaknya banyak hewan di laut, darat, dan udara seperti penyu, ikan bandeng, dan burung bangau. Sayang sekali sebahagian besar pantai di Indonesia berada dalam keadaan rusak, tidak terawat, akibat gempuran gelombang atau arus refleksi gelombang. Karena itu banyak pantai yang, seperti pelabuhan, memerlukan pemecah gelombang di lepas pantai, groin dari darat ke laut, ataupun tanggul laut (sea walls) sepanjang pantai untuk melindunginya.

B. Rumusan Masalah

Namun, membangun pemecah gelombang, groin atau tanggul laut yang baik tidaklah murah dan tidak mudah. Membangun pemecah gelombang untuk suatu pelabuhan baru bisa lebih mahal biayanya dari pada biaya dermaganya sendiri. Dan membangun pemecah gelombang secara asal-asalan bisa berarti membuang-buang biaya dan merusak lingkungan. Gambar 1.1 memperlihatkan sebuah pemecah gelombang yang terbuat dari silinder-silinder beton yang didudukkan satu di atas yang lain. Pemecah gelombang ini runtuh sebelum selesai akibat terjangan gelombang, dan mutu beton yang rendah menyebabkan air laut menghancurkan betonnya dalam sekejap. Reruntuhannya tersebar di bawah permukaan air sehingga sangat membahayakan pelayaran. Di ujung pemecah gelombang terlihat tiang-tiang pancang, tetapi struktur beton

pancur termakan air laut sebelum selesai. Secara struktural tiang-



tiang itu masih tegak tetapi secara material betonnya sudah rontok mulai dari ujung atas, dan secara fungsional tidak bisa memecahkan gelombang.

Gambar 1.2 memperlihatkan dua buah groin yang semula dimaksudkan untuk melindungi suatu pantai pasir tempat rekreasi, tetapi segera runtuh diterjang gelombang sehingga pantainya mulai tergerus, padahal dapat diperkirakan bahwa di tempat itu gelombang sudah pecah sehingga yang tersisa adalah gelombang translasi. Groin-groin tersebut terbuat dari gundukan batu tetapi baik ukuran maupun cara menyusunnya tidak memperhatikan kaidah-kaidah dalam teknik pantai. Kedua gambar ini diambil di pantai Tanjung Bunga, Makassar, suatu tanah tumbuh (*spit*) yang dahulunya sangat indah terbentuk dari endapan material dari Sungai Jeneberang di bagian selatannya.



Gambar 1.1. Pemecah gelombang dari silinder-silinder beton di suatu lokasi di pantai Tanjung Bunga, Makassar





Gambar 1.2. Dua buah groin gundukan batu yang telah runtuh di pantai Tanjung Bunga,

Masalahnya adalah bagaimana membuat pemecah gelombang yang efektif, murah dan mudah dibangun, tentu saja relatif dibandingkan terhadap pemecah gelombang yang selama ini sudah banyak dipakai. Pemecah gelombang konvensional yang selama ini dikenal dapat dibagi atas dua kelompok utama yaitu pemecah gelombang sisi miring yang biasanya terbuat dari gundukan batu-batu besar, dan pemecah gelombang vertikal yang terbuat dari beton bertulang seperti *caisson*, *concrete blocks*, *vertical walls* dsb. Kedua jenis pemecah gelombang itu boleh dikata sama tuanya karena secara rasional dapat disimpulkan bahwa gundukan batu lebih mudah dibuat, tetapi fakta sejarah menunjukkan bahwa pemecah gelombang yang terbuat dari batu-batu persegi yang disusun vertikal bantuan pasak sudah dibuat oleh bangsa Phoenisia lima ribuan tahun yang lalu (Bruun, 1985). Tentu saja selalu ada tipe campuran yang



merupakan gabungan dari keduanya atau yang dikenal dengan istilah komposit.

Sampai akhir abad 20 pemecah gelombang tipe gundukan batu boleh dikatakan lebih populer, karena dengan ditemukannya bahan peledak dinamit, batu-batu dalam jumlah banyak dapat segera diperoleh dari hasil peledakan gunung-gunung batu. Pemecah gelombang tipe ini sangat efektif menyerap energi gelombang sehingga baik gelombang transmisi maupun gelombang refleksi, dua tujuan utama dibuatnya pemecah gelombang, sangatlah kecil. Pemecah gelombang gundukan batu juga lebih mudah diperbaiki jika terjadi kerusakan. Tetapi pengambilan batu untuk pelindung luar (*armour stone*) yang beratnya sampai 20 ton sangat boros karena untuk mendapatkan satu *armour stone*, volume gunung batu yang harus diledakkan jumlahnya besar; kontrol peledakan sering tidak efektif. Semakin berkembangnya perhatian terhadap masalah-masalah lingkungan di akhir abad 20 menyebabkan penggunaan pemecah gelombang gundukan batu semakin berkurang.

Pada pemecah gelombang vertikal, pemakaian material memang lebih sedikit tapi nilainya mungkin lebih mahal karena banyak membutuhkan semen (untuk beton) bahkan besi baja. Pembangunannya juga membutuhkan peralatan-peralatan berat moderen yang bagi negara-negara maju tidak masalah, tetapi bagi negara berkembang seperti

a terutama di pulau-pulau kecil terpencil bisa merupakan masalah misalnya untuk membuat beton berkualitas yang memenuhi syarat



untuk pemakaian di laut. Transmisi gelombang pada pemecah gelombang vertikal seperti caisson atau blok beton jelas sangat kecil karena fluks energi gelombang yang datang terhambat total, tetapi akibatnya energi gelombang datang terpantul menjadi gelombang refleksi yang besar. Gelombang refleksi sangat mengganggu jalannya kapal yang mendekati pantai terlebih lagi pada mulut pelabuhan. Gelombang refleksi juga berpotensi besar menggerus kaki konstruksi (*toe recession*) yang dapat menyebabkan tergulingnya konstruksi. Caisson yang terguling, apalagi kalau sampai pecah, sangat sulit diangkat/diapungkan lagi.

Pertanyaannya sekarang, dapatkah membuat pemecah gelombang yang memanfaatkan keunggulan-keunggulan dari masing-masing tipe itu? Maksudnya, material alamiah batu yang dapat menyerap energi gelombang dengan efektif dan awet dikombinasikan dengan sifat pemecah gelombang vertikal yang hemat dalam jumlah material yang dibutuhkan dan dapat dibangun dengan cepat. Inilah rumusan masalah atau *research question* dari penelitian ini:

- (1) Sejauh mana efektifitas pemecah gelombang balok-kotak, tiang dan batu dapat mengurangi tinggi gelombang yang datang dalam bentuk gelombang transmisi dan gelombang refleksi?
- (2) Sejauh mana efektifitas pemecah gelombang balok-kotak, tiang dan batu dapat mengurangi tinggi gelombang yang datang dalam bentuk gelombang transmisi dan gelombang refleksi dibandingkan dengan pemecah gelombang vertikal lainnya?



- (3) Sejauh mana pemakaian material pada pemecah gelombang balok-kotak, tiang dan batu lebih hemat dari pada pemecah gelombang sisi miring konvensional?
- (4) Bagaimanakah hubungan antara variabel-variabel yang terlibat seperti lebar pemecah gelombang, tinggi gelombang datang, panjang gelombang datang, kedalaman air dan sebagainya dengan kemampuan mengurangi tinggi gelombang transmisi dan gelombang refleksi pada pemecah gelombang komposit tiang dan batu?

Jadi pengertian efektifitas pemecah gelombang adalah kemampuan suatu pemecah gelombang meredam gelombang datang dalam bentuk rasio gelombang transmisi atau refleksi terhadap gelombang datang.

C. Tujuan Penelitian

Bertolak dari kebutuhan dan masalah-masalah di atas penulis melakukan studi pemodelan fisik pemecah gelombang komposit balok-kotak, batu dan tiang (Gambar 1.3) dengan tujuan sebagai berikut:

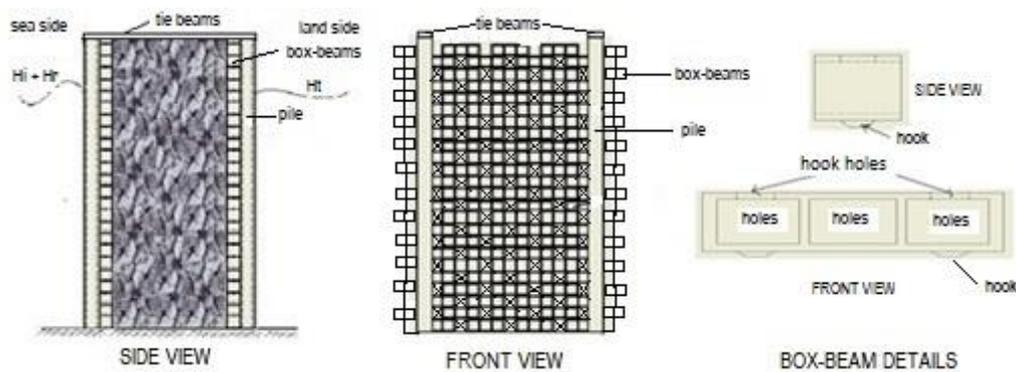
- (1) Mengukur efektifitas pemecah gelombang balok-kotak, batu dan tiang dalam mengurangi tinggi gelombang yang datang dalam bentuk gelombang transmisi dan gelombang refleksi.
- (2) Menganalisis efektifitas pemecah gelombang balok-kotak, batu dan

tiang dalam mengurangi tinggi gelombang yang datang dalam



bentuk gelombang transmisi dan gelombang refleksi dibandingkan dengan pemecah gelombang vertikal lainnya.

- (3) Membandingkan pemakaian material pada pemecah gelombang balok-kotak, tiang dan batu dengan pemecah gelombang sisi miring konvensional.
- (4) Merumuskan hubungan antara variabel-variabel yang terlibat dalam aksi-reaksi antara gelombang datang dengan struktur pemecah gelombang balok-kotak, batu dan tiang.



Gambar 1.3. Sketsa model pemecah gelombang vertikal komposit balok-kotak dan tiang pancang dengan pengisi batu

Dengan demikian akan diperoleh suatu jenis baru pemecah gelombang yang lebih murah biayanya, relatif mudah dibuat, efektif fungsinya dan tahan lama (durable) dibandingkan dengan jenis-jenis konvensional. Pemecah gelombang seperti ini diharapkan dapat terjangkau untuk dibangun sampai ke pulau-pulau kecil sekalipun sehingga seluruh dan pantai yang kritis dapat terlindung dari gelombang.



D. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan suatu jenis pemecah gelombang yang efektif meredam gelombang seperti pemecah gelombang gundukan batu, sedang pemakaian material relatif lebih sedikit seperti pemecah gelombang vertikal, dan mudah dilaksanakan karena komponen-komponen bahan pembuatannya relatif kecil sehingga dapat dikerjakan dengan peralatan yang sudah umum terdapat di seluruh Indonesia seperti *mobile crain* 50 - 80 ton dan *orange bucket*. Sebagai contoh, balok-kotak dengan ukuran kotak 500x500 mm, lebar 1200 mm dan panjang 5000 mm dapat dibuat setempat; batu pengisi yang sesuai adalah 500x500x500 mm (kubus ekivalen) beratnya hanya sekitar 300 kg tidak terlalu sulit didapat; tiang pancang penumpu berkualitas tinggi sampai diameter 1200 mm dan panjang sampai 24 meter, berat ± 30 ton/batang sudah dapat diproduksi oleh WikaBeton di Makassar (WikaBeton, 2016).

Hampir seluruh pelabuhan kecil sampai menengah di Indonesia, terutama di bahagian Timur, tidak memiliki pemecah gelombang untuk pelindung di waktu badai karena biaya pembuatan pemecah gelombang sangat mahal, bisa lebih mahal dari pada biaya pembuatan dermaga itu sendiri akibat banyaknya material yang dibutuhkan dan sulitnya bekerja di laut yang lebih dalam. Dengan pemecah gelombang jenis baru ini biaya lebih murah dan lebih mudah dibuat, sehingga semua pelabuhan yang memilikinya dapat beroperasi sepanjang tahun sehingga operasional pelabuhan lebih kecil dan kemajuan ekonomi lokal dan



wilyah dapat berkembang. Lebih dari itu, di pantai-pantai yang ombaknya tidak terlalu besar pemecah gelombang ini dapat berfungsi sekaligus sebagai dermaga pada sisi dalamnya. Dermaga semacam itu sudah lama ada tetapi biayanya sangat mahal karena merupakan gabungan antara pemecah gelombang gundukan batu dengan caisson atau blok-blok beton berat (Gambar 1.4).



Gambar 1.4. Contoh pemecah gelombang yang sisi dalamnya berfungsi pula sebagai dermaga (Google Image, Capri, Italy, diakses 8 Sept 2017)

Selain untuk melindungi pelabuhan, model pemecah gelombang yang baru ini diharapkan ekonomis pula untuk melindungi pantai-pantai yang terancam hilang akibat erosi sepanjang masa. Dengan demikian tugas bangsa untuk menjaga kelestarian tanah-air Indonesia dalam arti yang nyata dapat terpenuhi, dan cita-cita untuk menciptakan tol laut demi keamanan kesejahteraan serta menjadi poros maritim dunia dapat



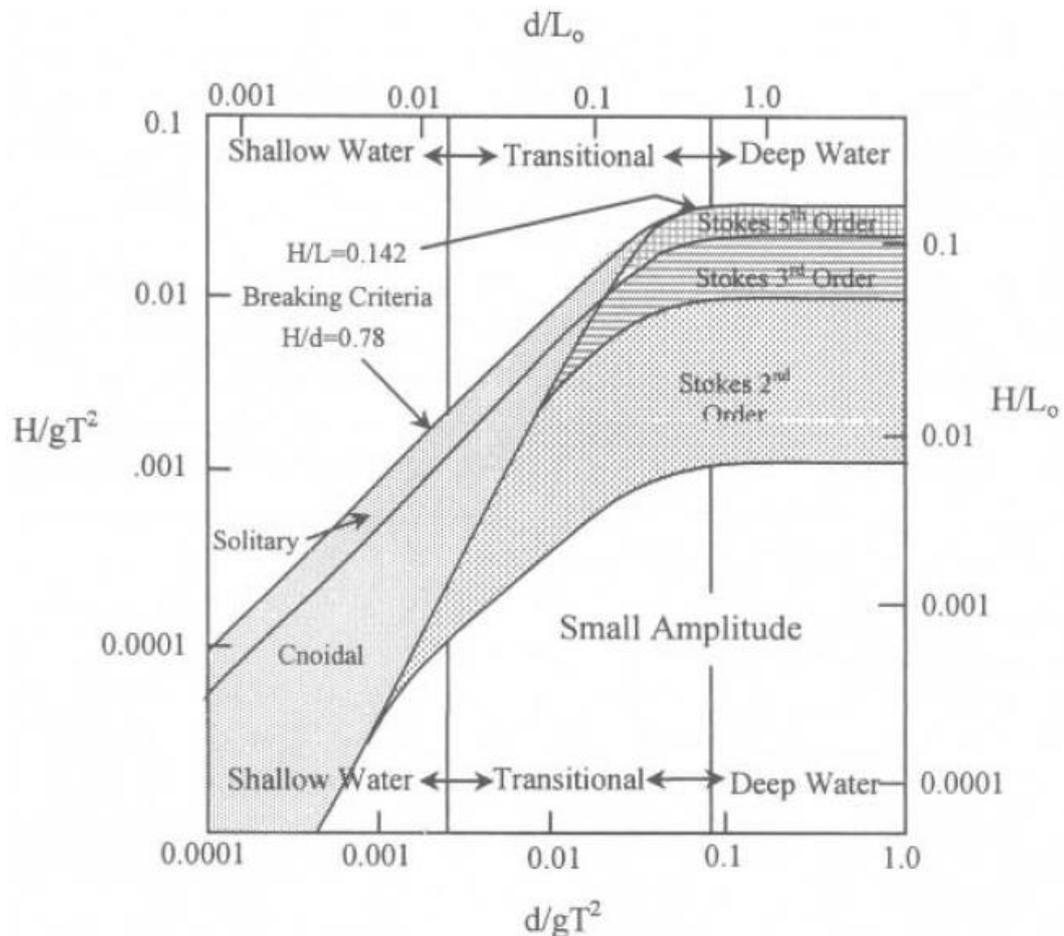
E. Ruang Lingkup/ Batasan Masalah

Penelitian ini mengikuti prosedur ilmiah Model Fisik (*Physical Model*) sebaik mungkin dengan proses deduksi maupun induksi, namun bagaimanapun juga seperti semua penelitian yang lain masalahnya harus dibatasi demi tercapinya kedalaman penelitian yang ilmiah. Akan tetapi, walaupun ada batasan masalah ini namun ruang lingkup penelitian tetap dijaga agar hasil-hasilnya benar-benar dapat diterapkan dalam dunia nyata (*applicable*); itulah sebabnya penelitian ini memakai contoh kasus keadaan pantai Makassar sebagaimana yang tercantum dalam judul. Pengertian “Batasan Masalah” di sini juga dimaksudkan untuk “Asumsi-asumsi”, istilah yang banyak dipakai dalam penelitian di bidang teknik dan rekayasa.

Batasan masalah yang pertama adalah pemakaian *Small Amplitude Wave Theory (Airy Theory)* dan *Stoke 2nd Order Wave Theory*. Walaupun banyak teori-teori gelombang undulasi (*oscillatory waves*) dengan order lebih tinggi telah dikembangkan, namun kebanyakan keadaan di alam masuk dalam wilayah *Small Amplitude Wave Theory* khususnya di perairan dengan fetch terbatas. Teori-teori gelombang yang lebih tinggi biasanya dipakai hanya dalam penelitian dan perencanaan yang sangat kompleks (Kamphuis 2011, 32-33). Selibuhnya adalah teori-teori *translational waves* untuk air dangkal dimana massa air tidak lagi semata ber-undulasi tetapi dapat ber-translasi horizontal seperti *Cnoidal Wave Theory* dan *Shallow Water Wave Theory* (Gambar 1.5). Keadaan-keadaan yang terakhir ini di luar lingkup studi ini. Di air dalam gelombang akan segera pecah apabila



kecuraman gelombang H_0/L_0 mencapai 0,142 sehingga gelombang-gelombang yang sangat curam tidak akan sampai ke tepi pantai.



Gambar 1.5. Berbagai teori gelombang dan batasan berlakunya menurut Le Mehaute (Kamphuis, 2011, Fig.2.7)

Gelombang-gelombang yang curam hanya terjadi di *fully developed sea* seperti Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Laut Jawa masuk kategori *developing sea* dimana tinggi ombak dibatasi oleh *fetch limited* dan *limited*. Gelombang yang tidak pecah di air dalam akan kan perjalanan ke pantai yang lebih dangkal, tetapi juga akan apabila mencapai perbandingan tinggi gelombang dan kedalaman



$H_b/d_b=0,78$. Ini adalah salah satu kriteria perencanaan bangunan pantai yang sangat penting. Pemecah gelombang umumnya ditempatkan sebelum kedalaman pecah d_b dari gelombang rencana karena energi yang dilepas oleh gelombang pecah sangatlah besar, tetapi pada kasus pemecah gelombang sisi miring sering hal ini sulit dihindari. Oleh karena itu studi ini menempatkan model pemecah gelombang di air dalam yaitu sebelum gelombang rencana pecah.. Hal ini akan diuraikan lebih detail pada bab selanjutnya.

Batasan masalah selanjutnya adalah lingkup tinggi gelombang yang dapat dicakup oleh studi ini. Hal ini dibatasi semata karena data lapangan yang bisa penulis peroleh dan kemampuan fasilitas laboratorium yang tersedia. Pada judul tulisan disebutkan “gelombang laut moderat” yang dimaksudkan tinggi gelombang 2 - 5 meter. Gelombang 0 - 2 meter termasuk kecil, sedang 6 meter ke atas termasuk gelombang besar. Pembahagian seperti ini mungkin sulit didapatkan dalam literatur-literatur, melainkan diperoleh dari pengalaman di lapangan dan penelitian di laboratorium. Pengalaman penulis dari *physical model* pemecah gelombang *Grassy King Island* , di Tasmania Australia, tinggi ombak dari Laut Kutub Selatan setinggi 6 – 10 meter (Rabung, 1993a); ini adalah salah satu samudra yang dikenal dengan ombak besar. Sedang ombak 0 – 2 meter sering dilihat mencapai “pantai-pantai sebelah dalam” Indonesia,

pantai Makassar.



Yang dimaksud dengan “pantai sebelah dalam” adalah pantai-pantai di kepulauan Indonesia yang tidak terpengaruh langsung oleh ombak yang terjadi di Samudra Pasifik di utara atau Samudra Hindia di selatan. Pantai-pantai ini terlindung oleh adanya kepulauan Indonesia yang bertebaran dari timur ke barat. Ombak yang terjadi di pantai-pantai ini kebanyakan ditimbulkan oleh angin di laut atau selat di antara kepulauan itu. Besarnya angin dan panjangnya wilayah pembangkitan gelombang (*fetch*) sangatlah terbatas, sehingga tinggi gelombangnyaapun terbatas. Salah satu pantai sebelah dalam yang menerima ombak terbesar dapat diperkirakan adalah pantai Makassar karena panjang *fetch*-nya sepanjang Laut Jawa dan anginnya merupakan angin dari Samudra Pasifik yang terbelok ke Laut Jawa oleh adanya Pulau Kalimantan dan Pulau Jawa, bagaikan terowongan angin (*wind tunnel*). Itulah salah satu alasan mengapa kasus pantai Makassar dipakai sebagai model dalam studi ini.

Studi ini tidak mencakup masalah struktur dan pondasi/geoteknik karena itu diluar konteks teknik pantai dan lebih bersifat analisis perencanaan. Pabrikasi tiang pancang beton prategang sekarang dapat dibuat sampai diameter 1,2 meter dengan panjang 24 meter sehingga memungkinkan perencanaan yang lebih luas jangkauannya. Masalah daya dukung tanah juga kiranya tidak banyak masalah karena batu-batu dapat melesak ke dalam tanah lunak sehingga malah memperbaiki daya dukung

penggunaan matras terbuat dari anyaman bambu atau material lain yang lebih bertujuan untuk menghemat material.



F. Kebaruan Penelitian

Sebagaimana telah disinggung di atas bahwa sejak ribuan tahun manusia telah membuat pemecah gelombang baik sisi miring maupun vertikal, namun semua itu tidak direncanakan dan dilaksanakan berdasarkan prosedur ilmiah sehingga tidak dapat dikategorikan sebagai karya ilmiah. Di masa lalu, kebanyakan pemecah gelombang vertikal hanya terbuat dari tiang-tiang kayu yang ditanam rapat kemudian ada yang diisi batu atau pasir; tidak bertahan lama. Sedang pemecah gelombang sisi miring, yang umumnya terbuat dari gundukan batu, sangat populer dan berkembang di abad 20 sampai mencapai model *Berm Breakwater* (PIANC, 2003) dan *Natural/S-slope Breakwater* (Rabung, 1993b) namun kemudian kurang populer karena karena membutuhkan sangat banyak material batu yang sangat keras (kelas basalt).

Baru akhir-akhir ini penelitian pemecah gelombang dinding vertikal sangat aktif disebabkan oleh dua hal utama: pertama kritik atas penggunaan material alam yang sangat banyak, kedua sepertinya profil *berm breakwater* sudah optimum pada tipe pemecah gelombang gundukan batu. Namun penelitian-penelitian tersebut berfokus pada jenis-jenis *caisson*, dinding vertikal berlubang (*wave screen, slotted walls*), tiang pancang yang disusun rapat atau tiang pancang berlubang (*perforated*). Jadi sama sekali tidak ada hubungannya dengan pemecah gelombang gundukan batu. Hasilnya memang dapat meredam gelombang secara signifikan tetapi tidak efektif meredam gelombang refleksi,



dua hal yang nampaknya memang saling bertolak belakang, sehingga para peneliti terus mencari .

Studi ini memanfaatkan keunggulan-keunggulan gundukan batu untuk perencanaan pemecah gelombang vertikal melalui proses yang ilmiah sehingga dapat meredam baik gelombang transmisi maupun gelombang refleksi secara bersamaan; di sinilah letak utama kebaruan studi ini. Kebaruan lainnya adalah penggunaan balok-kotak beton bertulang yang panjangnya dapat disesuaikan dengan kemampuan alat pengangkat, sehingga tiang pancang penopangnya dapat dibuat berjarak jauh. Balok-kotak ini selain berfungsi untuk menahan batu yang ada di belakangnya, juga berfungsi untuk mengantar massa air ke dalam tubuh gundukan batu untuk diredam sehingga sangat mengurangi refleksi gelombang. Lebar kotak-kotaknya disesuaikan dengan diameter rata-rata unit batu D_{n50} , sedang besarnya batu disesuaikan dengan kemampuan alat penumpuknya misalnya *orange bucket*. Balok-kotak ini meskipun relatif ringan per unitnya dibandingkan *armour stone* namun sangat berat secara kesatuan karena tersusun dan terkancing melalui sistim *hook* dan lubang mulai dari dasar laut sampai ke puncak pemecah gelombang. Ditambah lagi dengan penutup beton berat pada puncaknya yang dapat dibuat monolit dan terangkur dengan tiang pancang.



G. Sistematika Penulisan

Setelah Bab Pendahuluan ini, bab berikutnya adalah Bab Tinjauan Pustaka yang memuat uraian singkat tentang perkembangan pemecah gelombang baik sisi miring maupun vertikal sampai saat ini, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis. Bagian ini dimaksudkan memberikan kerangka dasar yang komprehensif mengenai konsep, prinsip atau teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah, termasuk di dalamnya Teori Gelombang Airy dan Teori Stoke Orde 2. Rujukan yang dikemukakan bersumber dari jurnal ilmiah atau buku teks yang dipilih berdasarkan prinsip relevansi dan kemutakhiran. Sumber dari situs internet (*website*) dipergunakan sepanjang jelas penulis, lembaga dan tanggal aksesnya.

Hasil uraian tinjauan pustaka menjadi Kerangka Konseptual penelitian ini. Kerangka konseptual melukiskan hubungan beberapa konsep yang akan diteliti. Jadi, kerangka konseptual bukanlah gambaran proses atau tahap-tahap penelitian, melainkan berupa hubungan antar variabel yang berpengaruh yang arahnya untuk menjawab rumusan masalah. Kerangka Konseptual disusun secara deskriptif dan dilengkapi dengan bagan hubungan variabel dan indikatornya. Bab Tinjauan Pustaka diakhiri dengan refleksi Teori Model dan Analisa Dimensi sebagai dasar bagi suatu studi dengan Pemodelan Fisik (*Physical Modelling*), sama pentingnya dengan

rumusan Teori Gelombang dalam bab ini.



Bab Materi dan Metode Penelitian merupakan bab berikutnya. Bagian ini memuat bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian, rancangan serta metode pelaksanaan eksperimen, dan akhirnya analisisnya secara rinci.

Bahan bukan saja diartikan sebagai materi untuk pelaksanaan penelitian tetapi juga data yang diperlukan seperti data angin dan prediksi gelombang (*wave hindcasting*) yang dipakai sebagai input untuk eksperimen-eksperimen. Rancangan Penelitian diartikan sebagai strategi untuk melaksanakan penelitian. Variabel-variabel yang berpengaruh diperoleh dari literatur-literatur penelitian terdahulu yang kemudian diturunkan secara matematis untuk mendapatkan hubungan-hubungan yang berlaku pada kondisi penelitian ini. Variabel-variabel yang terseleksi kemudian dikelola dengan analisa dimensi untuk mendapatkan variabel-variabel tak berdimensi menggunakan *Buckingham Π theorem*.

Nilai atau ukuran setiap variabel yang berlaku dalam eksperimen-eksperimen ini diturunkan dari nilai sebenarnya di alam nyata menjadi nilai pada model berdasarkan Teori Model dengan menggunakan *Froude Number* sebagai dasar dari *Dynamic Similitude*. Dengan demikian hubungan dengan realitas, atau dengan kata lain kemungkinan aplikasi hasil-hasil penelitian ini di alam nyata tetap terjaga.

Subjudul Waktu dan Lokasi Penelitian menegaskan di mana dan

penelitian experimental ini dilakukan, disusul kemudian dengan

Bahan dan Alat yang menjelaskan tentang alat-alat dan material



yang digunakan dalam eksperimen di laboratorium. Instrumentasi dan kalibrasi harus memenuhi syarat validitas dan reliabilitas yang diperlukan. Validitas artinya instrumen yang digunakan benar untuk mengukur variabel yang dimaksudkan, sedang reliabilitas artinya instrumen dapat mengukur dalam tingkat keakuratan yang diinginkan.

Persiapan Test dan Definisi Operasional dilakukan dengan S.O.P. (*Standard Operating Procedure*) yang jelas dan telah dipersiapkan lebih dahulu sehingga baik peneliti maupun pembantu peneliti dapat melakukan eksperimen dan pengumpulan data (*data acquisition*) dengan benar; demikian data yang diperoleh dapat dipercaya kebenarannya. **Analisis Data** pada data yang telah dikumpulkan pertama-tama dengan meng-*convert file* data dari software *WaveView* yang dipakai menjalankan komputer untuk *data acquisition* ke dalam format file Excel dari Windows. Data kemudian diolah dengan rumus-rumus yang telah diuraikan di muka, kemudian hasil-hasil diuji dengan statistik.

Bab Hasil Penelitian dan Pembahasan sesuai judulnya terdiri atas dua bahagian. Hasil Penelitian memuat deskripsi sistematis tentang data dan temuan yang diperoleh. Deskripsi hasil penelitian dapat berupa narasi yang disertai analisis statistik, tabel, grafik, gambar atau alat penolong lainnya. Pembahasan menjawab pertanyaan penelitian atau rumusan masalah, menafsirkan temuan-temuan, mengintegrasikan hasil dan temuan pada

teori yang telah mapan, memodifikasi teori yang ada atau un teori baru, dan menjelaskan implikasi hasil penelitian.



Bab Kesimpulan dan Saran. Kesimpulan memuat pernyataan singkat dan tepat yang dijabarkan dari hasil penelitian dan pembahasan serta merupakan hasil pengujian dengan rumus-rumus dan statistik untuk membuktikan pencapaian tujuan penelitian. Kesimpulan penelitian merangkum semua hasil penelitian yang telah diuraikan dan tata urutannya sama dengan urutan yang ada dalam hasil dan pembahasan sehingga konsistensi tetap terpelihara.

Kesimpulan dan Saran dinyatakan secara terpisah. Saran dibuat berdasarkan hasil penelitian dan pengalaman serta pertimbangan peneliti yang ditujukan kepada para peneliti lain yang akan melanjutkan atau mengembangkan penelitian lebih lanjut. Saran juga ditujukan kepada pihak pemakai hasil penelitian termasuk para pemegang kebijakan.



BAB II.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Perkembangan Pemecah Gelombang Gundukan Batu

1. Pengantar

Secara tradisional dikenal dua kelompok pemecah gelombang, yaitu pemecah gelombang sisi miring dan pemecah gelombang vertikal atau sisi tegak. Dahulu, pemecah gelombang sisi miring selalu terbuat dari gundukan batu (*rubble mound breakwater RMB*) karena gundukan batu otomatis akan mengatur sendiri kemiringan taludnya sesuai ukuran, kekasaran dan gaya-gaya luar yang terjadi; oleh sebab itu kedua nama itu bermaksud identik. Namun sekarang sudah ada pemecah gelombang sisi miring yang terbuat dari kubah beton berlubang-lubang. Jadi perlu hati-hati dalam pengertian.

Sedang pemecah gelombang vertikal umumnya terbuat dari tiang-tiang kayu yang dipancang rapat, blok-blok beton yang disusun rapi atau caisson terbuat dari beton bertulang. Keduanya boleh dikata berkembang bersamaan, tetapi ada masa-masa di mana salah satunya lebih populer dari pada yang lainnya.

Perkembangan pemecah gelombang gundukan batu atau sisi miring diuraikan singkat di sini untuk menunjukkan bagaimana usaha-usaha pengembangannya hampir mencapai titik maximum terutama karena pengaruh lingkungan hidup. Disamping itu, topik-topik tertentu penting



untuk penelitian ini seperti *Reynold Number* untuk ukuran batu yang dipakai dalam eksperimen, ukuran-ukuran dan berat batu untuk pemecah gelombang yang umum dipakai, porosity dan permeability, penampang tipikal untuk perbandingan volume batu yang diperlukan. Bagaimanapun juga ide penelitian ini berasal dari pemecah gelombang gundukan batu yang dibuat tegak sehingga dasar-dasar teori untuk penelitian harus berangkat dari sana.

2. Tipe konvensional

a. Iribarren

Iribarren melakukan sangat banyak penelitian selama puluhan tahun karirnya sebagai peneliti bidang teknik pantai. Ada dua rumus yang paling dikenang dari karya Iribarren. Pertama adalah rumus berat (massa) batu pelindung (*armor stone*) M untuk mencapai kestabilan statis dari pemecah gelombang gundukan batu sbb (Iribarren, 1938, *dalam* Bruun, 1985):

$$M = \frac{K_{\Delta}}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \frac{H^3 \gamma_s}{(\gamma_w - 1)^3} \quad (2.1)$$

dimana H = tinggi gelombang, μ = kekasaran, α = sudut kemiringan, γ_s = berat isi batu, γ_w = berat isi air, K_{Δ} = koefisien. Di dalam koefisien K_{Δ} terkandung pengaruh periode gelombang.

Rumus kedua dari Iribarren dikenal berguna untuk berbagai parameter dalam penelitian yang disebut *Iribarren number* I_r (Iribarren dan

1953, *dalam* Bruun, 1985) yang belakangan lebih sering disebut *surf*

$\gamma \xi$:



$$I_r \equiv \xi = tg\alpha / \sqrt{(H/L_0)} \quad (2.2)$$

dimana L_0 = panjang gelombang laut dalam. Bilangan Iribarren ini sangat berguna untuk menjadi kriteria suatu fenomena seperti *run-up* dan *run-down*, saat gelombang pecah, jenis gelombang pecah (*breaker*), bahkan Per Bruun menyebutnya *stability number*.

b. Hudson

Hudson menyederhanakan rumus Iribarren dan memberikan rumus untuk berat batu pelindung M sbb (Hudson, 1953):

$$M = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot \alpha} \quad (2.3)$$

dimana $S_s = \gamma_s / \gamma_w$ dan K_D = *damage coefficient*. Terlihat bahwa Hudson seolah-olah hanya menyatukan K_Δ dan μ dari Iribarren untuk membentuk K_D . Hal ini banyak dikritik oleh ahli-ahli Eropa diantaranya Per Bruun (1985) karena di dalam K_Δ itu terkandung pengaruh periode gelombang, namun Hudson (1953) yang beranggapan bahwa periode gelombang tidak berpengaruh banyak dikonfirmasi oleh banyak peneliti lain diantaranya van Gent (2004), sehingga rumus Hudson di atas menjadi populer disebut rumus konvensional pemecah gelombang gundukan batu (*rubble mound breakwater*).

Rumus di atas dapat dimodifikasi menjadi suatu parameter tak

nsi yang menjadi titik pusat studi penelitian selanjutnya. Dengan

i gelombang signifikan H_s sebagai representatif dari *irregular*



waves, rumus (2.3) dirubah menjadi suatu parameter tak berdimensi yang dikenal sebagai *stability number* (Hudson, 1959):

$$N_s \equiv \frac{H_{des}}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (2.4)$$

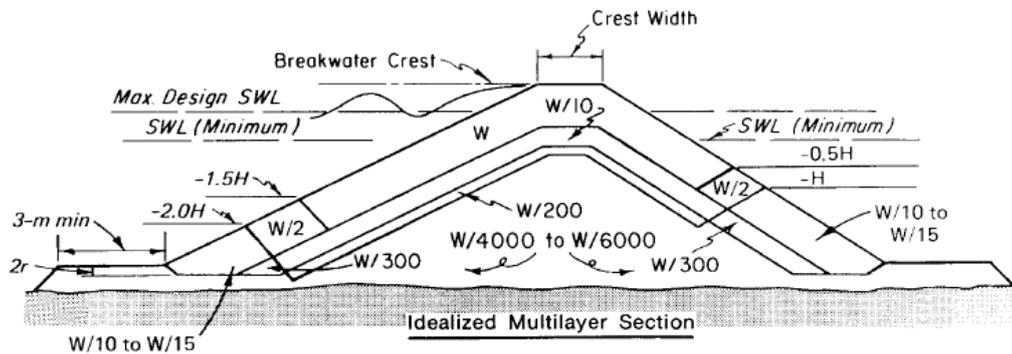
dimana $D_{n50} = \left(\frac{M_{50}}{\gamma_s}\right)^{1/3}$, M_{50} adalah median dari batuan bergradasi, K_D adalah koefisien stabilitas, H_{des} adalah gelombang rencana yang dipilih (rumus Hudson yang asli menggunakan $H_{Hudson} = H_{1/10} \approx 1.27H_s$ sedang van der Meer memakai H_s), $\Delta = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1$ disebut *relative buoyant (mass) density* tak berdimensi. Tingkat kerusakan dalam rumus Hudson biasanya dianggap 0 - 5%. Rumus (2.4) dan (2.3) sebenarnya sama, hanya ditulis dalam bentuk lain untuk mendapatkan bilangan tak berdimensi N_s yang bermanfaat untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu model dalam penelitian-penelitian pemecah gelombang baik sisi miring maupun vertikal.

Rumus Huson adalah rumus pemecah gelombang gundukan batu yang paling populer sampai sekarang, dipakai hampir pada semua keadaan sampai ke *revetment*. Masalah pada pemecah gelombang tipe ini adalah tingginya *wave run-up* dan beratnya batu pelindung yang dibutuhkan sehingga sering dipakai batu pelindung buatan seperti *tetrapod*, *dolos*, *concrete blocks* dan pemakaian *crown concrete* di puncak pemecah gelombang untuk menahan *wave run-up*. Biaya total pemecah gelombang tipe ini sangat ditentukan oleh tinggi puncak untuk menahan run-up

a sering tinggi puncak dikurangi dengan mengizinkan ombak h melalui puncak pemecah gelombang. Gambar 2.1

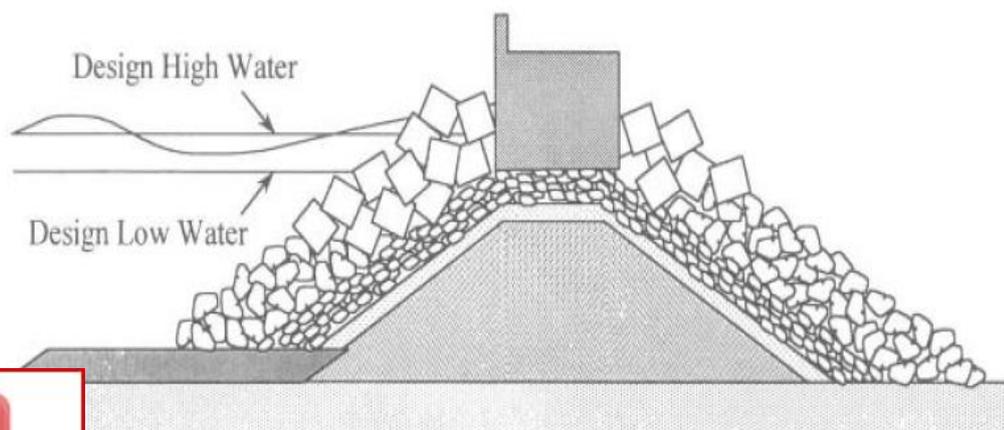


memperlihatkan profil melintang tipikal dari pemecah gelombang tipe ini seperti yang diberikan dalam USACE (1984).



Gambar 2.1. Profil melintang tipikal dari pemecah gelombang gundukan batu konvensional (USACE, 1984, Fig. 7-116)

Dalam perkembangan selanjutnya pengalaman dari lapangan menunjukkan bahwa banyak pemecah gelombang sisi miring rusak dimulai dari puncaknya akibat puncak batu pelindung (biasanya minimum tiga buah berderet) paling rentan terhadap geseran karena tidak tertekan apapun dari sisi atasnya. Juga kebutuhan untuk menjadikan puncak pemecah gelombang sebagai jalan inspeksi, sehingga berkembanglah kebiasaan



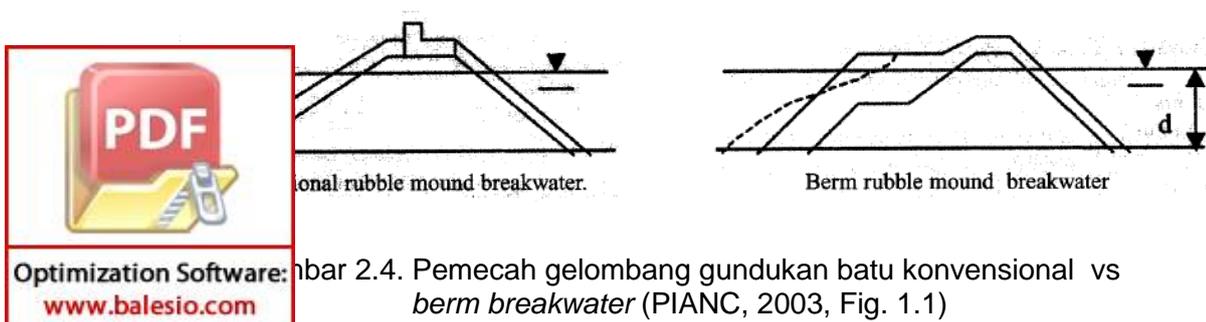
Gambar 2.2. Profil melintang tipikal dari pemecah gelombang gundukan batu konvensional dengan penutup beton yang berat (Kamphuis, 2011, Fig. 10.12).



an lahirlah pemecah gelombang model baru yaitu *S-shaped breakwater* atau *reshaped breakwater* yang kemudian menjadi *berm breakwater*, dimulai dengan pembangunan perpanjangan *runway* ke laut pada lapangan terbang Dutch Harbor, Aleutian Island, Alaska (Rauw, 1987, dalam PIANC, 2003). Banyak proyek kemudian menyusul dan banyak ahli terutama dari Eropa yang melakukan penelitian *berm breakwater* seperti Burcharth (2013), Torum cs. (2012), Sigurdarson & Meer (2013) dan lain-lain, tidak dapat disebut di sini satu persatu.

Untuk menyatukan berbagai hasil penelitian tentang *berm breakwater*, PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses) membentuk sebuah kelompok kerja yang menghasilkan suatu laporan resmi (PIANC, 2003). Namun demikian, PIANC menyimpulkan masih diperlukan penelitian-penelitian lebih lanjut, dan menyatakan perencanaan *berm breakwater* haruslah dengan flexisibilitas yang besar bagi perencana. Keunggulan utama *berm breakwater* dibandingkan dengan pemecah gelombang gundukan batu konvensional adalah penggunaan batu pelindung yang berukuran lebih kecil meskipun jumlah batu yang dibutuhkan lebih banyak.

Gambar (2.4) menunjukkan gambaran perbandingan pemakaian material serta proses pembentukan profil yang stabil pada *berm*

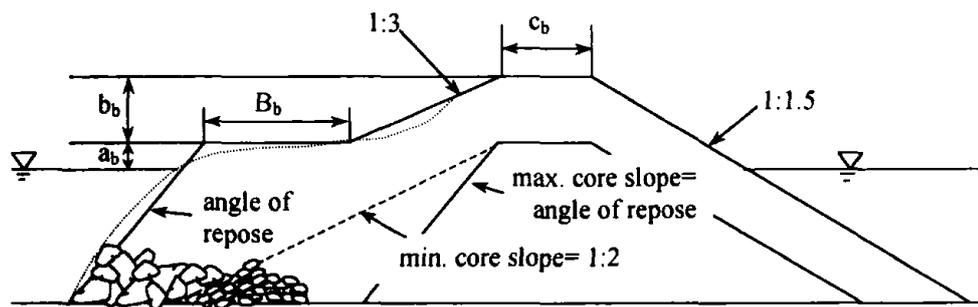


breakwater. Proses ini menunjukkan dua jenis kestabilan struktur pada bangunan-bangunan pantai pada umumnya dan *berm breakwater* pada khususnya, yaitu stabil statis (*statically stable*) dan stabil dinamis (*dynamically stable*). Struktur yang stabil statis adalah struktur dimana tidak ada atau sangat kecil kerusakan (biasanya maksimum 5% yang diizinkan) yang boleh terjadi akibat kondisi rencana yang maksimum. Sedang struktur yang stabil dinamis adalah struktur dimana penyesuaian profil diizinkan terjadi sampai terjadi keseimbangan.

Pada struktur yang stabil dinamis, material halus di sekitar muka air tenang tetap bergerak naik-turun seiring datangnya ombak naik dan turun (*run-up and run-down*), tetapi saat *net transport capacity* telah mencapai nol berarti struktur telah mencapai keseimbangan. Kestabilan dinamis terjadi bila angka kestabilan struktur (*stability number*) $H/\Delta D > 6$. Caisson memiliki $H/\Delta D < 1$, pemecah gelombang gundukan batu konvensional $H/\Delta D = 1 - 4$. *S-shaped* dan *berm breakwater* memiliki $H/\Delta D = 3 - 6$ adalah daerah peralihan. *Berm breakwater* dapat dibuat stabil statis jadi ($H/\Delta D \leq 6$) dengan cara membangun profil keseimbangan berdasarkan prediksi (Gambar 2.5), atau dibuat dalam keadaan stabil dinamis lalu membiarkan dirinya sendiri menyesuaikan dengan ombak yang terjadi sampai terjadi keseimbangan.



Batu dari *quarry* biasanya cukup dibagi atas dua bahagian yaitu *core* dan *armor* sesuai karakteristik produksi *quarry*; pada awalnya mungkin perlu dianggap 50-50. PIANC (2003) memberi Rumus (2.5) untuk menghitung lebar bahu B_b sbb:



Gambar 2.5. Profil keseimbangan *berm breakwater* (PIANC, 2003)

$$B_b = D_{n50} \left[K_b + 7.5 \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right) - 1.1 \left(\frac{D_{n85}}{D_{15}} \right)^2 + 6.1P_r \right] \quad (2.7)$$

dimana P_r adalah prosentase batu yang bulat dan:

$$K_b = -10.4 + 0.5 \left(\frac{H_s}{\Delta_n D_{n50}} \right)^{2.5} \quad (2.8)$$

Nilai-nilai a_b , b_b dan c_b menurut gambar diperoleh dari hubungan:

$$a_b = 0.2H_s \quad \text{dan} \quad b_b = c_b = 1.25H_s \quad (2.9)$$

Dari gambar-gambar di atas jelaslah bahwa tubuh *S-shaped* atau *berm breakwater* lebih lebar dari pada pemecah gelombang gundukan batu konvensional sehingga dengan sendirinya koefisien gelombang transmisi K_t

dan koefisien gelombang refleksi K_r akan lebih kecil atau paling tidak sama yang terjadi pada pemecah gelombang gundukan batu



konvensional sepanjang sama-sama tidak mengalami overtopping. Oleh karena itu masalah ini tidak akan ditinjau lebih jauh mengingat tujuan dari studi ini adalah untuk menunjukkan dan memanfaatkan ke-efektif-an pemecah gelombang gundukan batu dalam bentuk pemecah gelombang vertikal.

4. Self-adjusted dan equilibrium beach profile breakwater

a. Self-adjusted breakwater

Setelah berhasil memformulasikan *S-shaped breakwater* dan/atau *berm breakwater* para peneliti bergerak lebih jauh dengan ide model pemecah gelombang yang alamiah, maka lahirlah istilah *self-adjusted breakwater* atau *natural breakwater*. Pada umumnya pemecah gelombang seperti ini dibiarkan menyesuaikan sendiri bentuknya sesuai gaya-gaya alam (utamanya gelombang) yang mempengaruhinya, namun bagaimanapun juga bentuk akhirnya harus dapat diprediksi sejauh mungkin agar kebutuhan dan ukuran material yang dibutuhkan dapat disiapkan dari awal.

Yang paling mengesankan dari antara penelitian-penelitian itu adalah oleh Jentsje W. van der Meer. Untuk mendapatkan rumus yang bisa berlaku lebih umum untuk bangunan-bangunan pelindung pantai yang terbuat dari gundukan batu, van der Meer melakukan percobaan-percobaan yang ekstensif di Delft Hydraulics antara lain untuk dissertasinya yang

“rock slopes and gravel beaches under wave attack“ (Meer, 1988).



Mula-mula beliau mengusulkan suatu parameter baru tentang tingkat kerusakan (*damage level*) S sebagai:

$$S = A_e / D_{n50}^2 \quad (2.8)$$

dimana A_e adalah luas permukaan yang tergerus pada penampang melintang (parameter lama adalah banyaknya batu pelindung yang berpindah tempat dibandingkan total batu pelindung dalam persen). $S=2$ berarti kerusakan 0-5% (tak ada kerusakan), $S=6$ berarti kerusakan 5-10% (kerusakan ringan), $S=36$ berarti kerusakan 40-50% (rusak berat, tidak diizinkan).

Percobaan-percobaan yang jumlahnya lebih dari 500 itu dibagi atas tiga bahagian:

- (1) percobaan-percobaan dengan skala kecil untuk *static stability*
- (2) percobaan-percobaan dengan skala kecil untuk *dynamic stability*
- (3) percobaan-percobaan skala besar untuk *scale effects* dan ekstrapolasi *dynamic stability* sampai transisi ke pantai berpasir.

Untuk keadaan *static stability*, van der Meer memberikan dua rumus masing-masing untuk *plunging breakers* ($\varepsilon_m = 0.5 - 1.5$) dan *surgings breakers* ($\varepsilon_m \geq 5$). Untuk kondisi *collapsing* ($1.5 < \varepsilon_m < 5$) dan *spilling* ($\varepsilon_m < 0.5$) tidak ada penjelasan.

Kondisi plunging:
$$N_s \equiv \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} / \sqrt{\varepsilon_m} \quad (2.9)$$

Kondisi surging:
$$N_s \equiv \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \varepsilon_m^P \quad (2.10)$$



dimana P adalah permeabilitas pemecah gelombang secara umum. $P=0,1$ untuk batu pelindung dengan inti *impermeable*, $P=0,4$ untuk batu pelindung di atas lapisan *filter layer* di atas *core material*, $P=0,5$ untuk batu pelindung di atas core yang seragam, $P=0,6$ untuk pemecah gelombang yang dibangun seluruhnya dengan batu pelindung (sangat permeable); N adalah jumlah gelombang yang terjadi dimana van der Meer mengusulkan cukup 7500 kali, ε_m adalah *surf similarity parameter* yang menggunakan T_m , periode gelombang rata-rata, menurut rumus:

$$\varepsilon_m = \tan\alpha / \sqrt{2\pi H_s / g T_m^2} \quad (2.11)$$

Dynamic stability ditunjukkan oleh pembentukan profil penampang yang bisa sangat berbeda dari profil penampang awalnya. *Dynamic stability* akan terjadi apabila $H_s / \Delta D_{n50} > 6$. Terdapat suatu daerah transisi antara *static stability* dan *dynamic stability* pada $H_s / \Delta D_{n50}$ antara 3 dan 6. Penelitian-penelitian terdahulu oleh Van Hijum dan Pilarczyk (Hijum & Pilarczyk, 1982) mengungkapkan adanya “*equilibrium profile*” yang terbentuk setelah ‘badai’ yang cukup lama. Wilayah berlakunya *dynamic stability* secara kasar dapat dikatakan mulai dari $H_s / \Delta D_{n50} = 6$ sampai 500. Penelitian Van Hijum dan Pilarczyk berada pada $H_s / \Delta D_{n50} = 13$ sampai 32, artinya wilayah yang tidak diliput masih sangat luas. Namun demikian penelitian mereka menjadi basis untuk penelitian van der Meer ini. Test-

kukan baik dalam saluran skala kecil maupun skala besar.

Penelitian van der Meer untuk keadaan *dynamic stability* sangatlah f dengan variasi untuk semua variabel, jenis material dari kerikil



bulat licin sampai kubus kasar dan pipih, $H_s/\Delta D_{n50}$ dari 3 sampai 250, gelombang monochromatic dan spectral, skala kecil dan besar, 2D dan 3D flume dsb. Namun karena sangat luasnya, tidak ada kesimpulan dalam bentuk rumus-rumus yang sederhana dan berlaku general yang diberikan. Hanya dua buah parameter baru, H_o dan T_o , yang diperkenalkan serta hubungannya dengan Stability Number dalam bentuk tabel.

$$H_o T_o = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} * \sqrt{g/D_{n50}} T_m \quad (2.12)$$

dimana $H_o = H_s/\Delta D_{n50}$ adalah *dimensionless wave height parameter* sedang $T_o = \sqrt{g/D_{n50}} T_m$ adalah *dimensionless wave period parameter* related to D_{n50} .

Van der Meer merekomendasikan rumus-rumusnya untuk *dynamic stability* dipakai dalam praktek hanya untuk daerah $H_s/\Delta D_{n50}$ dan $H_o T_o$ rendah misalnya untuk *berm breakwater* atau *S-shape breakwater* yang masih menggunakan batu armor berat-berat. Untuk keadaan nilai $H_s/\Delta D_{n50}$ dan $H_o T_o$ yang tinggi seperti pada pantai pasir atau kerikil (Tabel 2.1), van der Meer mengusulkan studi lebih lanjut.

Tabel 2.1. Hubungan antara jenis struktur dengan parameter $H_s/\Delta D_{n50}$ dan $H_o T_o$ (Meer, 1988)

Structure	$H_s/\Delta D_{n50}$	$H_o T_o$
Statically stable breakwaters	1 - 4	< 100
rock slopes and beaches	6 - 20	200 - 1500
travel beaches	15 - 500	1000 - 200.000
and beaches	> 500	> 200.000



Wave run-up adalah salah satu faktor yang sangat penting dalam perencanaan pemecah gelombang gundukan batu karena menentukan tinggi puncak air di atas muka air tertinggi (*run-up*), yang pada gilirannya menentukan tinggi pemecah gelombang dan volume material yang dibutuhkan. Van der Meer (2005) memberikan perkiraan yang cukup sederhana sebagai berikut:

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1,5 r_f \xi_p \quad \text{untuk } \xi_p < 2 \quad (2.13)$$

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 3 r_f \quad \text{untuk } \xi_p \geq 2 \quad (2.14)$$

dimana $R_{2\%}$ adalah run-up yang dilampaui tidak lebih dari 2% gelombang, r_f adalah faktor yang mempertimbangkan gesekan, kemiringan permukaan, arah gelombang dsb. Untuk pemecah pemecah gelombang gundukan batu sederhana dengan gelombang datang tegak lurus $r_f = 0,5$; untuk dolos $r_f = 0,45$ sedang untuk permukaan licin $r_f = 1,0$. Faktor ini berkurang dengan bertambahnya sudut datang gelombang. ξ_p adalah *Surf similarity parameter* berdasarkan *peak period* dari spektrum gelombang.

b. Equilibrium-beach-profile breakwater

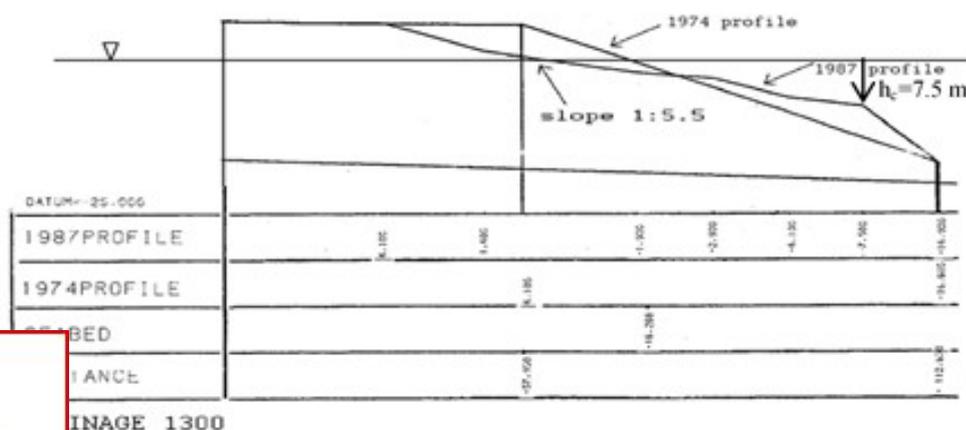
Usaha terakhir untuk membuat pemecah gelombang gundukan batu berdasarkan sifat alamiah adalah pemecah gelombang yang mengiktuti hukum *equilibrium beach profile* (Bruun, 1985, dan Dean, 1991). Contoh

(*prototype*) jenis ini adalah pemecah gelombang di Grassy, King yang terletak di Bass Strait, Tasmania, Australia (Rabung dan I, 1993a, 1993b, 2011). Batuan limbah dari sebuah tambang di



pulau kecil itu berlimpah. Kemudian muncul ide untuk menjadikannya pemecah gelombang untuk pelabuhan setempat. Batu-batu besar yang berukuran kurang lebih 2-10 ton ($M_{50}=6$ ton) per unit dipisahkan dulu, kemudian sisanya dihampar ke laut mulai dari pantai ke tengah laut, tanpa dibentuk sebagai sebuah penampang pemecah gelombang. Kemudian batu-batu besar itu ditumpuk saja di puncak timbunan.

Ketika ombak laut itu, yang terkenal besar (tinggi 6-10 meter), meruntuhkan timbunan maka batu-batu besar itu ikut runtuh dan menjadi batu pelindung di daerah “bahu“. Timbunan kemudian diperbaiki dengan menambahkan lagi material baru. Proses ini berlangsung beberapa tahun. Ketika pihak *Assessor* menyatakan profil yang terjadi sudah stabil, Rabung dan Hinwood dari Monash University melakukan studi dengan model fisik berskala 1:10. Hasilnya kemiringan profil pada model sama dengan di lapangan yaitu kurang lebih 1:5,5 dan nilai $S=3$ (Gambar 2.6); ini artinya dengan berat batu pelindung rata-rata $M_{50}=6$ ton, pemecah gelombang itu sudah dalam keadaan stabil, meskipun material-material halus yang keluar



Gambar 2.6. Profil final pemecah gelombang Grassy, King Island (Rabung dan Hindwood, 1993a).



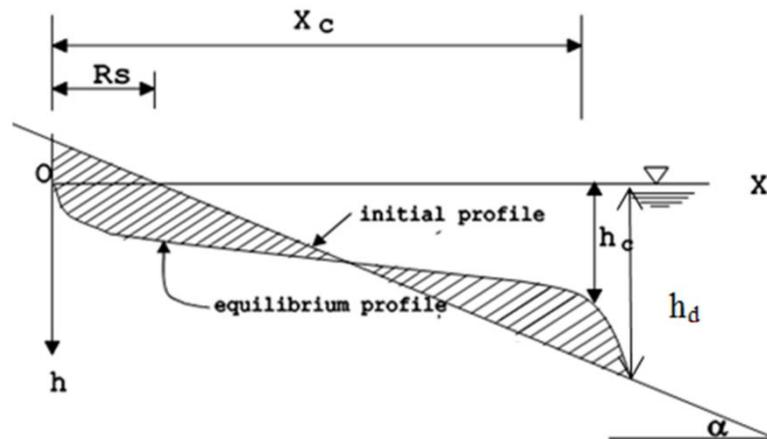
dari tubuh pemecah gelombang masih bergerak naik-turun mengikuti irama gelombang (*dynamic stability*).

Ternyata profil final dari *King Island breakwater*, sangat mirip dengan *equilibrium beach profile* yang diperkenalkan oleh Per Bruun dan kemudian Robert G. Dean seperti yang dirujuk di atas. Bruun dan Dean memperkenalkan rumus keseimbangan profil pantai berpasir berdasarkan pengukuran di lapangan dari ratusan pantai, sebagai berikut:

$$h = Ax^m \quad (2.15)$$

dimana h adalah kedalaman air tenang di titik profil yang sedang ditinjau, x adalah jarak horizontal dari pantai dimana $h = 0$, dan A adalah parameter berdimensi yang mempunyai satuan meter pangkat $1/3$ dan disebut *scale factor* (Gambar 2.7). Nilai A terutama ditentukan oleh ukuran butir pasir, hal ini telah dibuktikan oleh banyak peneliti, sedang m adalah parameter yang menurut penelitian Bruun sama dengan $2/3$ yang mana dibenarkan oleh Dean untuk kebanyakan pantai; tetapi untuk pantai dengan material yang lebih kasar nilai m bisa sampai 0.4. Ping Wang dan Nicholas C. Kraus mengkonfirmasi rumus tersebut dengan percobaan-percobaan laboratorium berskala besar (Wang & Kraus, May 2005) sedang Tuba Ozkan-Haller dan Sarah Brundidge mengujinya dengan data lapangan yang lebih banyak lagi (Ozkan-Haller & Brundidge, 2004).





Gambar 2.7. Equilibrium beach profile menurut Bruun dan Dean

$$h_c = 1.57H_e \quad (\text{Hallermeier and Birkemeier}) \quad (2.16)$$

$$h_c = 1.6H_o \quad (\text{Suh and Dalrymple}) \quad (2.17)$$

dimana H_e adalah tinggi gelombang badai di dekat pantai bersangkutan yang terlampaui hanya 12 jam/tahun, sedang H_o adalah tinggi gelombang air dalam.

Rabung dan Hinwood memperkenalkan pemecah gelombang tipe King Island ini sebagai *Beach Type Rubble-mound Breakwater* (Rabung dan Hinwood, 2011). Cara perencanaan tipe ini adalah sebagai berikut. Mula-mula stok material dibagi atas dua kelompok, kurang-lebih 50-50 dalam perbandingan volume, dengan suatu ukuran batu M sebagai perbatasan. Kelompok pertama yang lebih kecil dari M akan dijadikan material core, sedang yang lebih besar jadi batu pelindung. Median dari kelompok batu pelindung kemudian ditentukan sebagai D_{n50} . Bentuk profil ditentukan berdasarkan rumus *Equilibrium Beach Profile* dari



Bruun-Dean dengan ukuran D_{n50} menentukan koefisien A dalam Rumus (2.15). Sebagai pemeriksaan, kemiringan rata-rata bahu umumnya lebih kecil dari 1:5; jika ternyata lebih besar maka nilai D_{n50} perlu diperiksa dengan merubah nilai batas M . Nilai S kemudian dihitung dengan Rumus (2.8), harus $S \leq 3$. *Depth of closure*, h_c , ditentukan dengan rumus Suh-Dalrymple atau lainnya. Pelaksanaan di lapangan langsung menerapkan profil yang diperoleh ini, jadi tidak perlu menunggu bertahun-tahun untuk ombak membentuk profilnya.

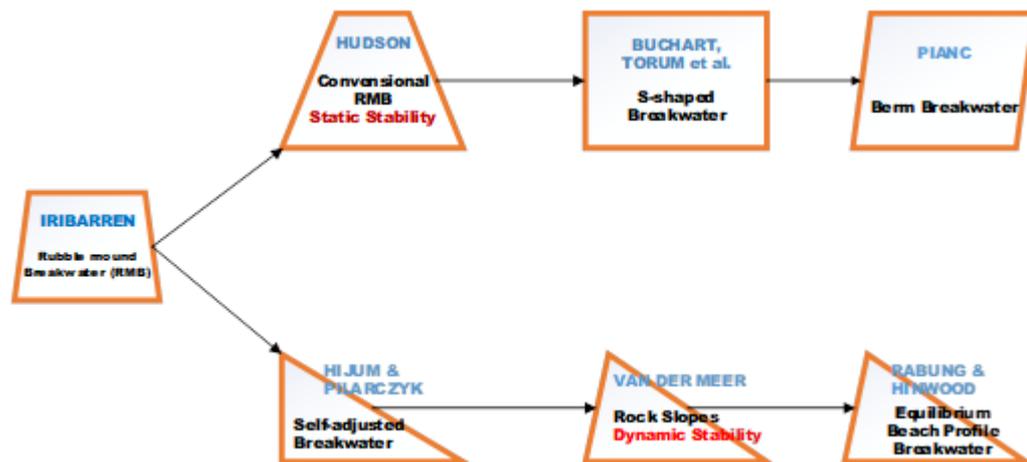
5. Intisari

Pengembangan model pemecah gelombang gundukan batu dengan sisi miring boleh dikatakan telah mencapai puncaknya dengan model *berm breakwater* atau pun *self-adjusted breakwater*. Gambar 2.8 meringkaskan perkembangan model-model pemecah gelombang gundukan batu. Masalah utama dengan pemecah gelombang jenis ini adalah banyaknya material yang dibutuhkan dan tingkat kesulitan yang tinggi untuk menyediakan dan menempatkan batu-batu pelindung yang berukuran besar. Hal ini membuat jenis pemecah gelombang ini sekarang semakin kurang populer, karena biaya pembuatannya mahal dan dianggap kurang ramah lingkungan. Kebutuhan material pada jenis *berm breakwater* dan *self-adjusted breakwater* lebih banyak lagi dibandingkan dengan model konvensional .

amun keunggulannya yaitu kestabilan yang tinggi serta
uan meredam gelombang, baik gelombang transmisi maupun



refleksi, tetaplah yang terbaik. Jenis kerusakan yang banyak terjadi pada pemecah gelombang sisi miring ini adalah kerusakan pada batu pelindung yang mana relatif mudah diperbaiki dan hasilnya akan membuat kestabilan strukturnya lebih baik lagi. Kerusakan pada bahagian pondasi atau tanah dasar jarang terjadi, kecuali jika tanah dasar berupa butiran lepas seperti pasir harus diwaspadai terjadinya *toe erosion* atau material hanyut oleh arus.



Gambar 2.8. Skema ringkasan perkembangan pemecah gelombang gundukan batu sisi miring

B. Perkembangan Pemecah Gelombang Vertikal

1. Pengantar

Uraian di atas tentang pemecah gelombang gundukan batu menunjukkan bahwa meskipun jenis pemecah gelombang tersebut sangat efektif meredam energi gelombang baik dalam bentuk gelombang transmisi maupun refleksi, namun kebutuhan akan material batu berkualitas tinggi baik dalam ukuran satuan maupun dalam jumlah adalah besar menyebabkannya kurang populer lagi, sehingga dalam buku-buku standar teknik pantai seperti Goda (2010) jenis pemecah gelombang ini tidak dibahas lagi, hanya sebagai struktur komposit pada pondasi pemecah gelombang vertikal. Usaha-usaha untuk memanfaatkan material berukuran lebih kecil dengan perencanaan *berm breakwater* atau bahkan *natural slope breakwater* nampaknya sudah maximum. Penelitian-penelitian sekarang lebih populer ke pemecah gelombang vertikal untuk menggantikan pemecah gelombang gundukan batu.

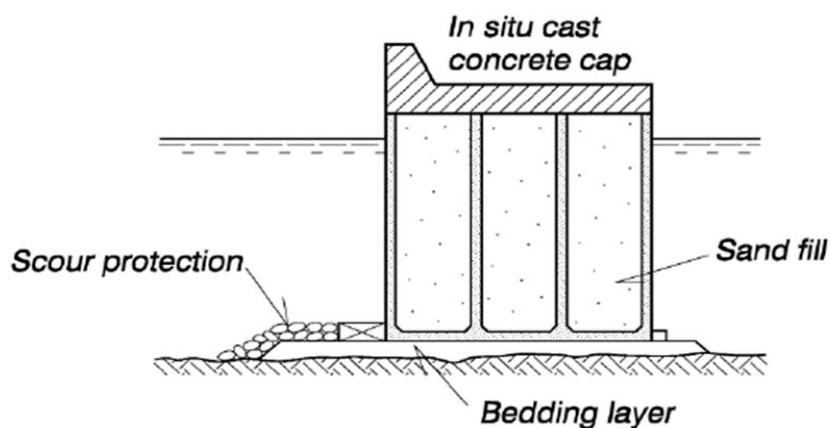
Pemecah gelombang vertikal terbagi atas kelompok *full protection* dan *partial protection*. Pada pemecah gelombang *full protection*, massa air tidak diperkenankan menembus dinding pemecah gelombang, sedang pada pemecah gelombang *partial protection* air diperkenankan menyeberang ke sisi lainnya melalui lubang-lubang pada dinding pemecah

ing atau bahagian bawah yang terbuka. Dengan demikian pemecah
ing *full protection* otomatis sangat efektif dalam hal meredam

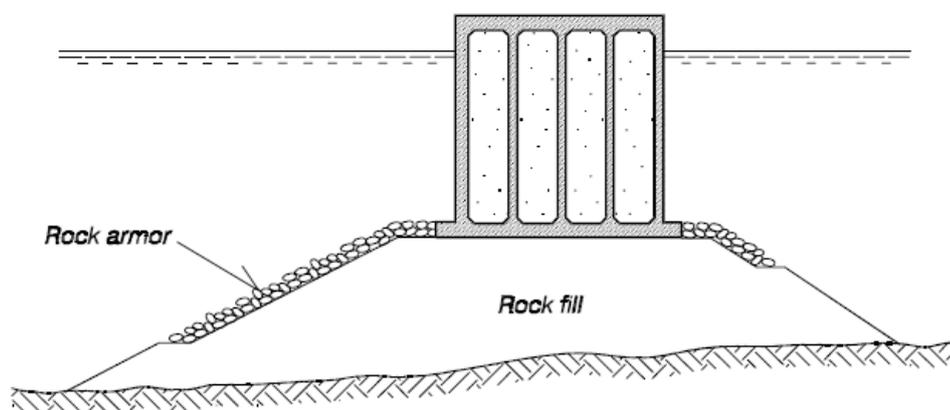


gelombang transmisi, tetapi tidak efektif untuk gelombang refleksi. Sebaliknya, pemecah gelombang *partial protection* dapat meloloskan gelombang transmisi tetapi efektif meredam refleksi. Untung-rugi dalam kedua hal itu merupakan pertimbangan utama dalam perencanaan.

2. Pemecah gelombang vertikal *full protection*



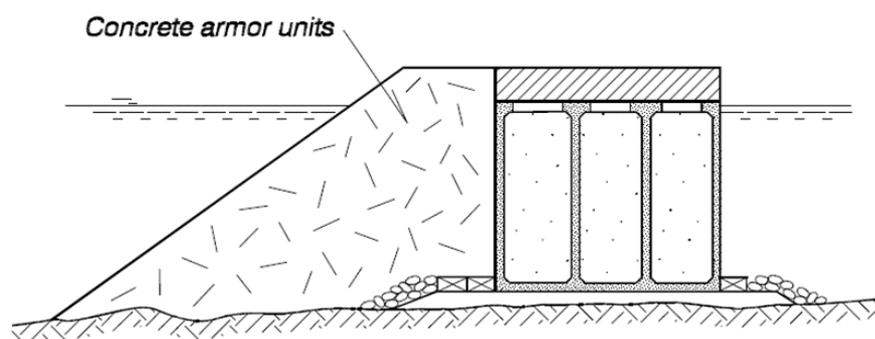
Gambar 2.9. Pemecah gelombang caisson konvensional (USACE, 2011, Fig. VI-2-16)



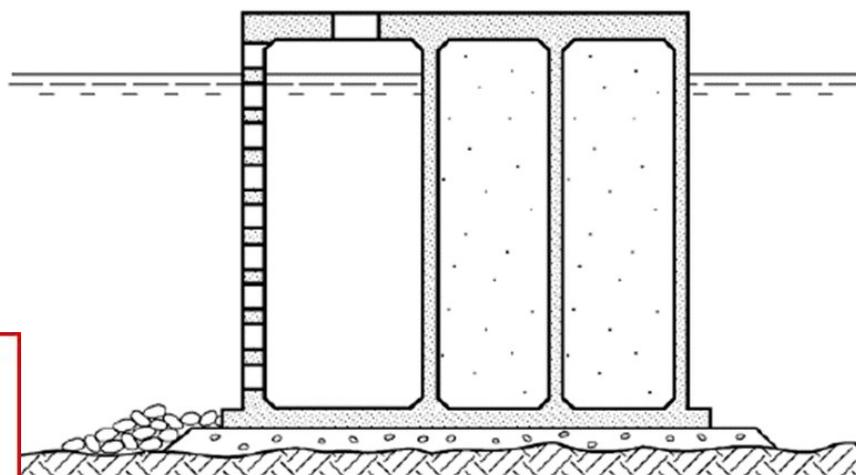
Gambar 2.10. Pemecah gelombang caisson komposit vertikal (USACE, 2011, Fig. VI-2-17)



Pemecah gelombang *full protection* yang klasik adalah caisson dengan dinding vertikal dan blok-blok beton (*concrete blocks*). Gambar (2.9) menunjukkan pemecah gelombang caisson klasik dengan pondasi batu yang tipis (*bedding layer*) dan kepala beton (*concrete cap*) tegak; sedang Gambar (2.10) pemecah gelombang caisson komposit vertikal. Dikatakan komposit vertikal karena dalam arah vertikal sesungguhnya ada dua jenis pemecah gelombang yaitu bagian bawah gundukan batu yang sekaligus berfungsi sebagai pondasi, sedang bagian atas adalah caisson yang berfungsi sebagai penghalang gelombang utama.



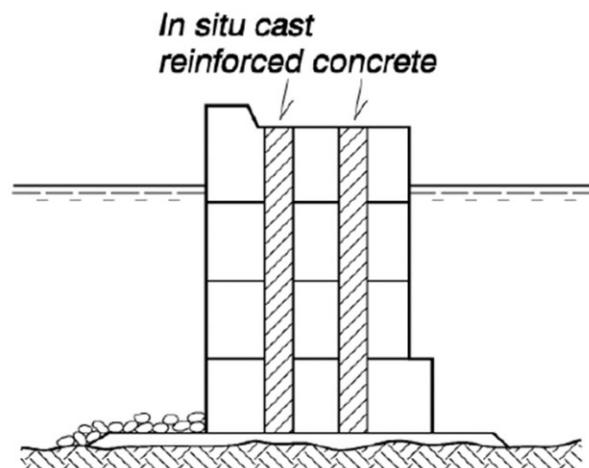
Gambar 2.11. Pemecah gelombang caisson komposit horizontal (USACE, 2011, Fig. VI-2-18)



Gambar 2.12. Pemecah gelombang *perforated front wall caisson* (USACE, 2011, Fig. VI-2-20)



Gambar (2.11) adalah pemecah gelombang caisson komposit horizontal dimana gundukan batu terletak di depan sehingga baik transmisi maupun refleksi dapat diantisipasi. Demikian pula halnya dengan pemecah gelombang *perforated front wall caisson* (Gambar 2.12).



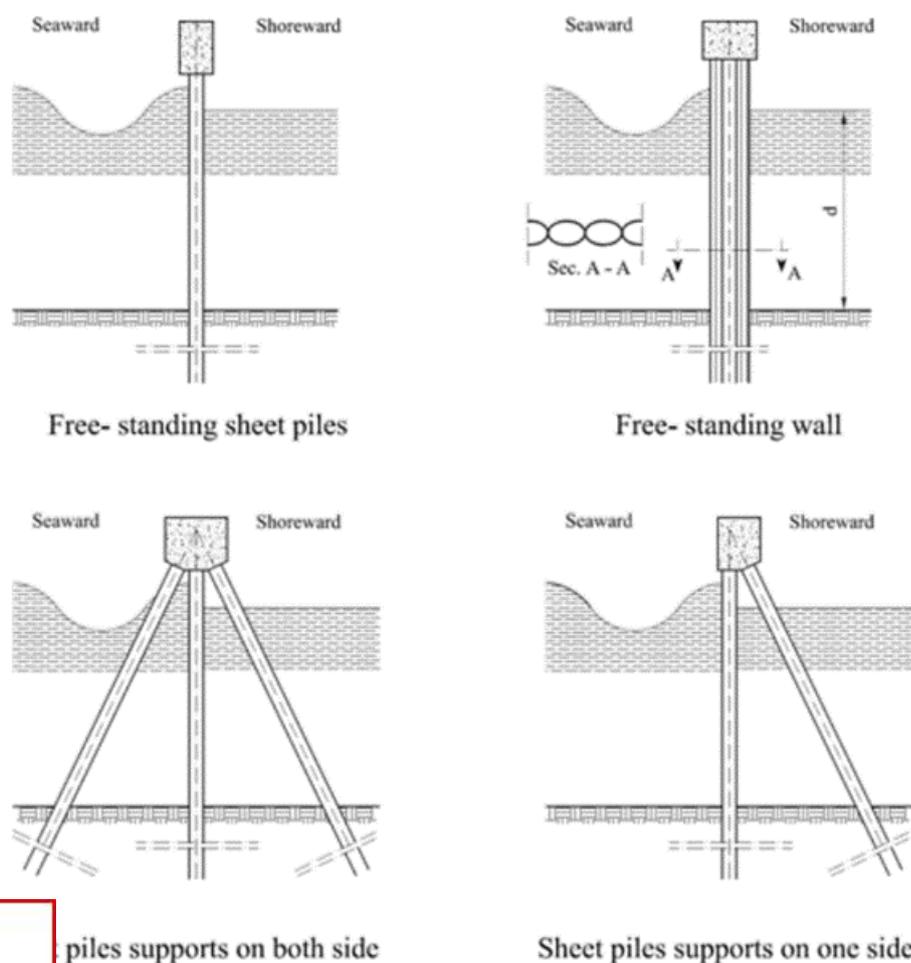
Gambar 2.13. Pemecah gelombang blok beton (USACE, 2011, Fig. VI-2-21)

Gambar (2.13) menunjukkan pemecah gelombang blok beton (*concrete blocks*) yang terbuat dari blok-blok beton yang dibuat terlebih dahulu di tempat lain (*pre-cast*). Untuk menyatukannya di tempat terakhir dapat disediakan cantolan dan lubang (*hook*), atau disediakan lubang menerus yang akan dicor ditempat sehingga seluruh blok beton menyatu dengan kuat. *Caissons* dan *concrete blocks* komposit yang didukung oleh gundukan batu-batu relatif besar yang tinggi bisa saja termasuk pemecah gelombang vertikal yang *partial protection* karena air di sisi darat pemecah

yang masih dapat berundulasi oleh energi gelombang yang disipkan.



Kelompok terakhir yang termasuk dalam pemecah gelombang *full protection* adalah dinding vertikal (*wave screen*) yang tidak berlubang. Kelompok ini terdiri dari banyak jenis (Gambar 2.14) termasuk pemecah gelombang tiang pancang yang diberi dinding (*piled breakwater*). Kelompok ini sangat hemat dalam penggunaan material karena terbuat hanya dari dinding yang dipikul oleh tiang yang terjepit dalam tanah. Tetapi beban gaya dan momen yang dipikul oleh dinding dan tiang sangat besar dan jika terjadi kegagalan akan bersifat total (kegagalan bangunan).



Sheet piles supports on both side

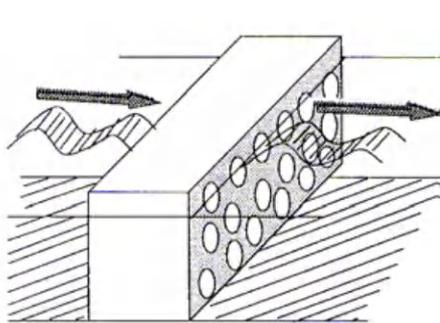
Sheet piles supports on one side

Gambar 2.14. Berbagai pemecah gelombang dinding vertikal (Truit, 1987)

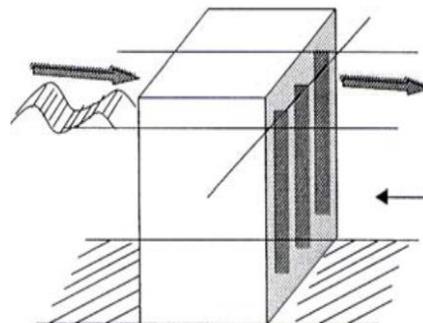


3. Pemecah gelombang vertikal *partial protection*

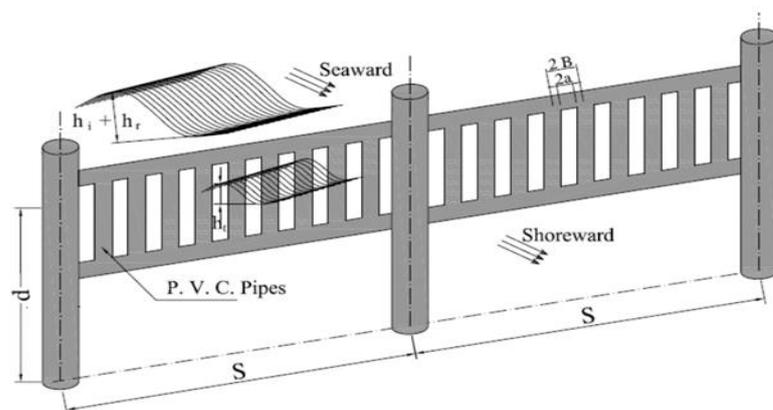
Partial protection breakwaters memberikan perlindungan secukupnya bagi pantai atau kolam pelabuhan, masih mengizinkan air berfluktuasi dalam kolam akibat transmisi gelombang namun sebagai gantinya mengurangi refleksi gelombang dengan segala efeknya; juga memungkinkan air bersikulasi dalam kolam pelabuhan demi kelestarian lingkungan. Ada banyak jenis pemecah gelombang seperti ini mulai dari yang memanfaatkan tekanan angin dan hidraulik, pemecah gelombang terbenam, mengapung, terputus-putus, tiang, pipa, sampai *slotted breakwaters*. Beberapa contoh diberikan pada Gambar 2.15 di bawah ini.



a. Perforated breakwater

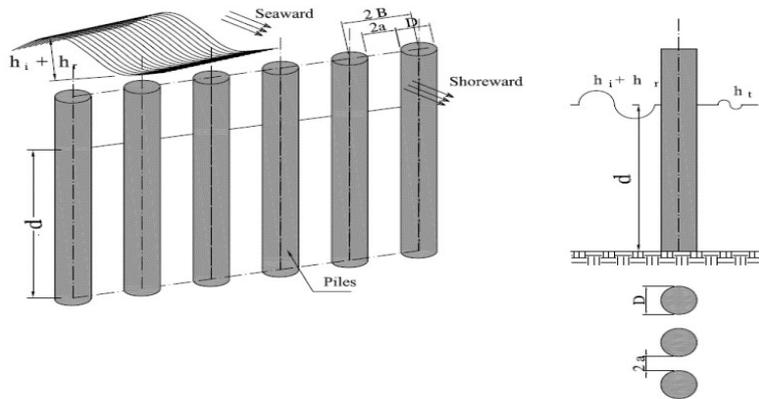


b. Slotted breakwater
(Koraim 2005)

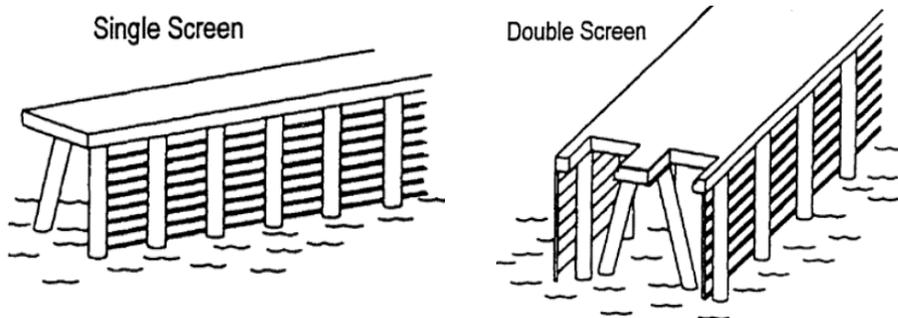


c. *Pipe breakwater* (Galal 2002)

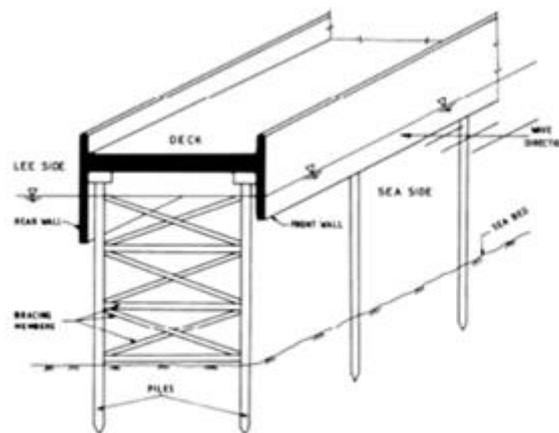




d. *Closely spaced circular pile breakwater (Galal 2002)*



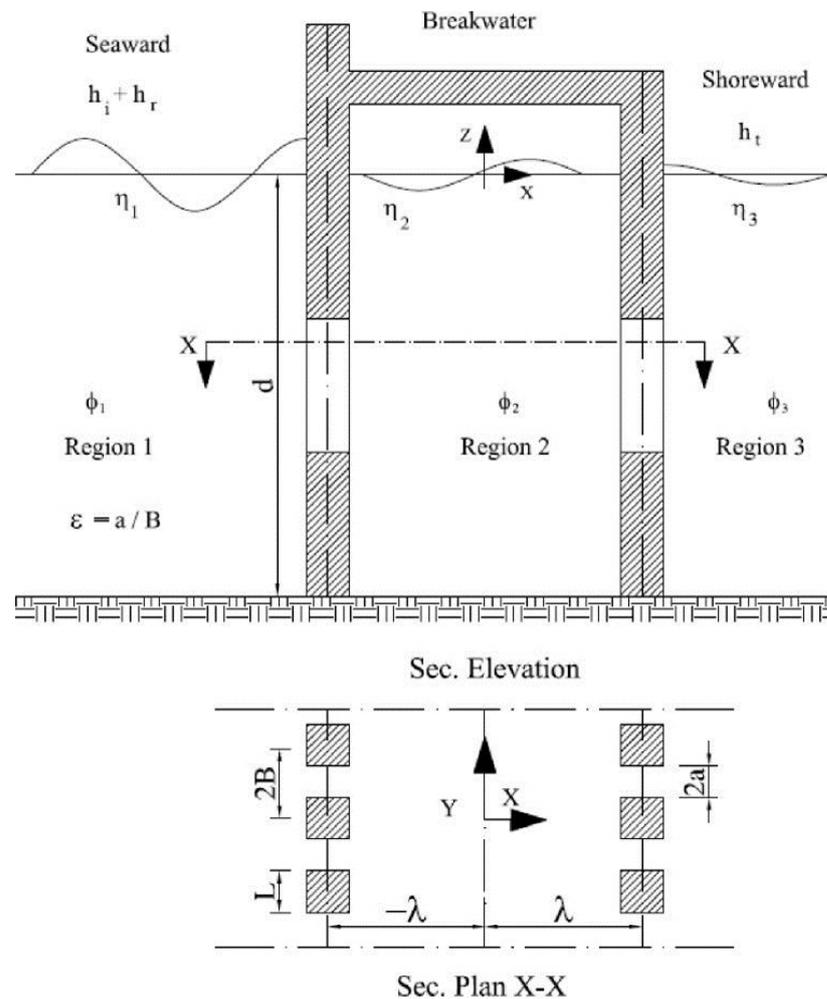
e. *A single and a double wave screen breakwater (Allsop, 1995)*



f. *Twin wall breakwater (Neelamani, 2002)*



Optimization Software:
www.balesio.com



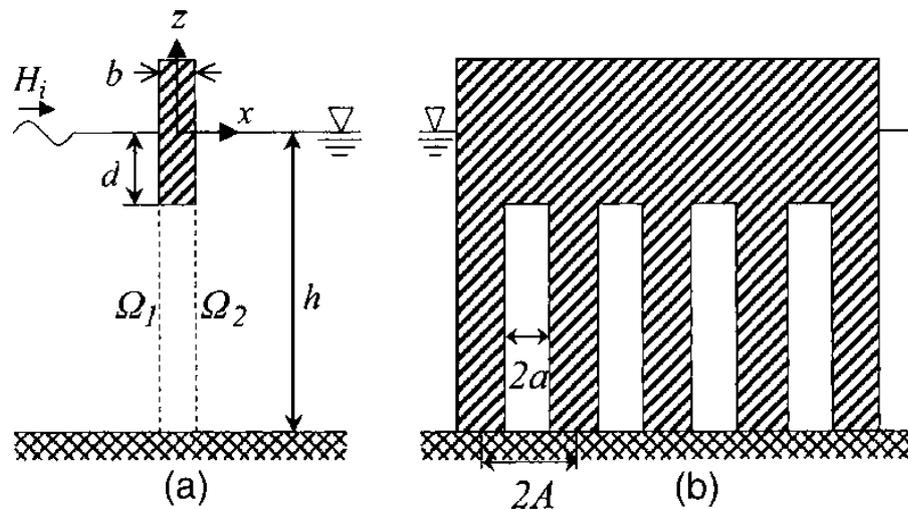
g. Double slotted vertical wall breakwater (Ahmed, 2011)

Gambar 2.15. Beberapa tipe dari pemecah gelombang vertikal *partial protection*

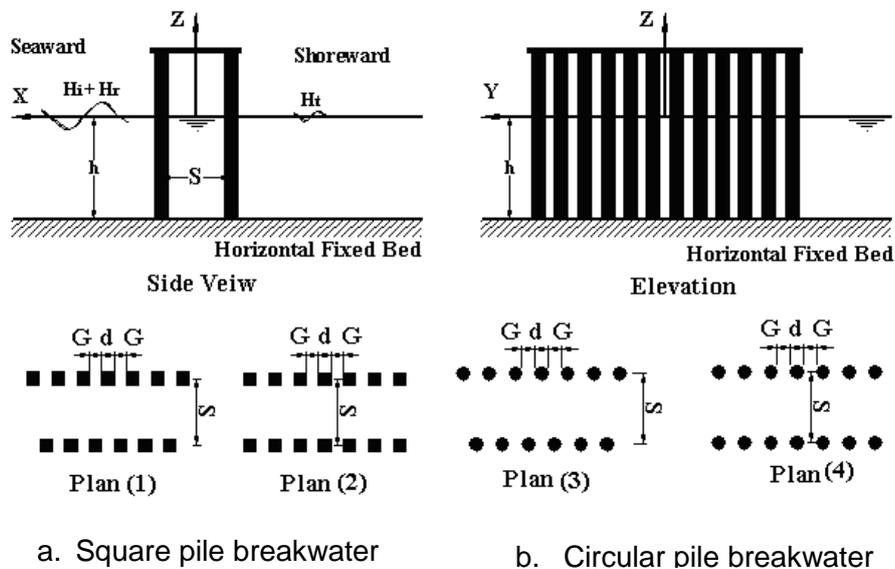
Suh, Shin dan Cox (2006) mengembangkan tipe dinding vertikal yang menyatu dengan tiang pancang pendukungnya (Gambar 2.16). Jenis pemecah gelombang ini sekarang banyak diikuti oleh para peneliti dengan dinding berlapis dan sebagainya. Penelitian Suh, Shin dan Cox dilakukan

model numerik disertai test laboratorium untuk mengecek hasil-
merik.





Gambar 2.16. *Pile-supported vertical wall breakwater* (Suh, Shin and Cox, 2006)



Gambar 2.17. *Double rows piles breakwaters* dari Koraim (2007)

Salah satu pengembangan yang menarik pula adalah *double rows pile breakwaters* oleh Koraim (2007) seperti terlihat pada Gambar (2.17).

nya ini adalah ide lama yang diperbaharui dengan studi ilmiah. gan nyata tipe ini adalah mudah dibuat, apalagi dengan



tersedianya tiang-tiang pancang pra-cetak berukuran besar dan panjang, serta dapat dipancang dengan kuat ke dalam tanah keras. Akan tetapi kebutuhan tiang pancang sangat banyak karena tiang harus dipancang dengan jarak dekat sehingga biaya bisa sangat mahal.

4. Intisari

Perkembangan pemecah gelombang, khususnya pemecah gelombang vertikal, disarikan oleh Takahashi (2002, Table 2.3) seperti terlihat pada Tabel 2.2. Takahashi menyimpulkan hasil kajiannya yang luas tentang perkembangan pemecah gelombang seperti berikut ini:

- 1) *The trend of breakwater development is from mild slope breakwaters to upright ones, i.e., from mild-slope rubble mound breakwaters to steep slope ones, and from high-mound composite breakwaters to low-mound ones, as well as from rubble mound breakwaters to composite breakwaters.*
- 2) *Breakwater development was strongly affected by the development of new technologies.*
- 3) *The failure of new breakwaters always resulted in returning to old breakwater designs.*

Tabel 2.2. Intisari sejarah perkembangan pemecah gelombang (Takahashi 2002, Table 2.3)

Type	1800	1850	1900	1950	2000
Upright		Dover (1847)			
(Low) Composite			Low Mound	Cellular Block Cyclopean Block Caisson (Wave Dissipating)	New Caissons
(High)		Cherbourg (1830)	High Mound	Failures Return to	Horizontally Composite type
(Steep Slope) Rubble Mound	Cherbourg (1781)	Uniform step Placement	(Wave screen)	Tetrapod	Dolos Failures Return to Mild Slope Berm Breakwater
(Mild Slope)		Plymouth (1812)	Concrete Block Marseille type		
Note		Cement 1824 Reinforced concrete 1867 ?		Tetrapod 1949 Model Experiment 1930's Iribarren 1938, Hudson 1958, Vander Meer Hiroi 1919, Sainflou. 1928, Goda 1973, ICCE 1950~ World War II 1939~1945	



C. Efektifitas Pemecah Gelombang

1. Pengantar

Sesuai dengan tujuannya yaitu meredam gelombang yang datang, maka efektifitas pemecah gelombang diukur dalam tinggi gelombang yang di-refleksi-kan dan di-transmisi-kan yang disebut dengan gelombang refleksi dan gelombang transmisi berturut-turut. Gelombang refleksi adalah bahagian dari gelombang datang/terjadi yang kembali ke arah laut setelah menabrak pantai yang curam, pemecah gelombang atau permukaan yang memantulkan lainnya; sedang gelombang transmisi adalah bahagian dari gelombang datang/terjadi yang diteruskan ke sisi lain dari penghalang (seperti pemecah gelombang) setelah mengalami reduksi energi dalam struktur penghalang/pemecah gelombang. Kestabilan maupun durabilitas bukanlah ukuran efektifitas melainkan ukuran kelangsungan hidup pemecah gelombang.

Refleksi dan transmisi gelombang adalah dua faktor yang sangat penting diperhatikan dalam perencanaan bangunan-bangunan pantai, khususnya yang berhubungan dengan pelabuhan. Energi gelombang datang kalau tidak dapat diserap (*dissipation*) dengan baik oleh pemecah gelombang atau bangunan pantai lainnya akan berubah menjadi gelombang refleksi dan transmisi yang dapat mengganggu kapal-kapal baik yang sedang mendekati mulut pelabuhan maupun yang sedang berlabuh dalam pelabuhan; bahkan dapat mengakibatkan erosi pada kaki bangunan pantai sehingga mengancam kestabilan struktur.



2. Efektifitas pemecah gelombang gundukan batu

Efektifitas dalam bentuk refleksi dan transmisi gelombang pada awal pemecah gelombang gundukan batu konvensional belum banyak dibicarakan, terutama untuk refleksi (Allsop dan Hettiarachchi, 1988), mungkin karena belum banyak pilihan struktur untuk dibandingkan; yang penting dapat memecahkan gelombang besar yang datang. Kebanyakan data yang diberikan adalah spesifik dari hasil suatu studi model. USACE (1984) hanya memberikan satu pilihan untuk menghitung gelombang refleksi yaitu metode Battjes (Battjes 1974, dalam USACE 1984, 2:116 – 2:123).

Battjes menemukan bahwa *Iribaren number* atau disebut juga *surf similarity parameter* ξ (Rumus 2.2) sangat berguna untuk menentukan besar gelombang refleksi menurut hubungan:

$$K_r \equiv C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.18)$$

dimana $K_r \equiv C_r$ adalah koefisien gelombang refleksi yang sama; kedua simbol tetap dipakai di sini karena sulit merubah simbol-simbol tersebut dalam grafik-grafik yang dibahas dalam tulisan ini. Simbol K_r dipopulerkan oleh pemakaian dalam USACE 1973 dan 1984, sedang C_r dipopulerkan oleh USACE 2008 – 2011. H_r adalah tinggi gelombang refleksi dan H_i adalah tinggi gelombang datang; dalam hal gelombang datang adalah

yang tidak beraturan (*irregular waves*) maka H_i adalah gelombang
 n H_s . Dalam rumus Iribarren (Rumus 2.2): α atau θ adalah



kemiringan sisi laut dari pemecah gelombang, sedang H adalah H_i tinggi gelombang yang ditinjau, dan L_o adalah panjang gelombang bersangkutan di air dalam. Battjes selanjutnya memberikan grafik (Gambar 2.18) untuk menentukan hubungan antara ξ dan K_r . Dari grafik terlihat bahwa semakin tegak suatu struktur (semakin kecil $\cotg \theta$) maka semakin besar refleksi, namun pada pemecah gelombang gundukan batu K_r tidak pernah lebih besar dari 0.53. Sebaliknya pada dinding yang rata, misalnya caisson, koefisien refleksi bisa mendekati 1,0 atau *standing waves*.

Baru dalam USACE (2011, Formula VI-5-38) diterima rumus koefisien refleksi dari Seelig (1983) yang bersifat umum termasuk untuk batu pelindung buatan(beton) seperti berikut:

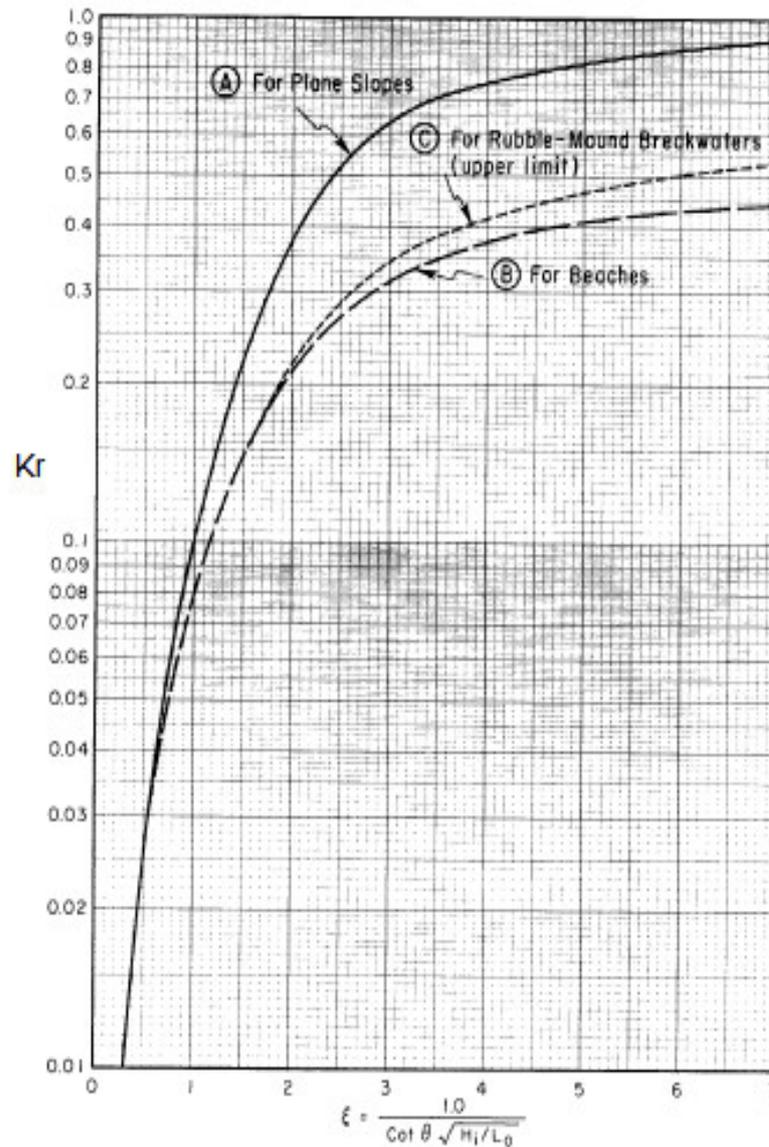
$$C_r = \frac{a\xi}{(b+\xi^2)} \quad (2.19)$$

dimana ξ adalah *Iribarren Number* sedang a dan b koefisien-koefisien yang tergantung kepada jenis batu pelindung dan kemiringan sisi depan tanpa gelombang melimpah (*overtopping*) yang dapat dilihat dalam USACE (2011, Table VI-5-14).

Selanjutnya gelombang transmisi yang sehubungan dengan pemecah gelombang gundukan batu konvensional dapat diakibatkan oleh gelombang yang melimpah (*overtopping waves*) atau gelombang yang menembus (*wave penetration*). Dalam tulisan ini yang ditinjau hanyalah

yang transmisi yang menembus struktur pemecah gelombang, dengan kondisi model yang *no-overtopping*.





Gambar 2.18. Koef. refleksi gelombang K_r sebagai fungsi dari *surf similarity* ξ untuk pemecah gelombang gundukan batu, dinding mulus dan pantai alamiah (Battjes 1974, in USACE 1984, Fig 2-65)

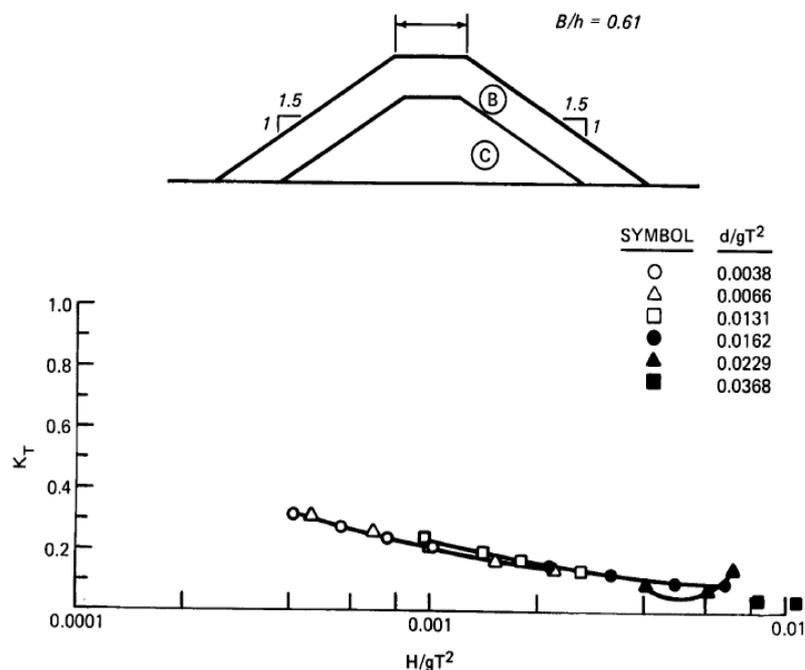
Gambar 2.19 dari USACE (1984) memberikan informasi tentang betapa efektifnya pemecah gelombang gundukan batu meredam energi gelombang yang akan menembus tubuh strukturnya. Jika koefisien

transmisi yang menembus breakwater disebut $K_t \equiv C_t$, maka:

$$K_t \equiv C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (2.20)$$



dimana H_t adalah tinggi gelombang transmisi dan H_i adalah tinggi gelombang datang; dalam hal gelombang datang adalah *irregular waves*, maka yang dipakai sebagai H_i adalah H_s . Terlihat bahwa untuk berbagai keadaan gelombang datang nilai K_t tidak pernah melampaui 0,37. Inilah alasan utama mengapa pemecah gelombang gundukan batu tanpa limpahan (*no-overtopping*) begitu populer di masa lalu.



Gambar 2.19. Koefisien transmisi gelombang K_t untuk pemecah gelombang gundukan batu (USACE 1984, Fig 7-50)

Namun dalam praktek sulit menghindari gelombang melimpah sehingga perlu diantisipasi dalam perencanaan. Gelombang transmisi akibat limpahan terutama ditentukan oleh perbandingan tinggi bebas di atas muka air dan tinggi gelombang datang. Juga, nilai C_t yang



diberikan dalam literatur kebanyakan berasal dari percobaan laboratorium, sehingga kemungkinan besar terkena *scale effects*.

Efektifitas pemecah gelombang gundukan batu yang diberikan di sini hanyalah untuk tipe konvensional sebagai bahan perbandingan dengan obyek studi ini. Untuk tipe *berm breakwater* atau *natural slope breakwater* jelas lebih efektif dari pada tipe konvensional akibat strukturnya yang lebih lebar dan kemiringan depan yang lebih landai.

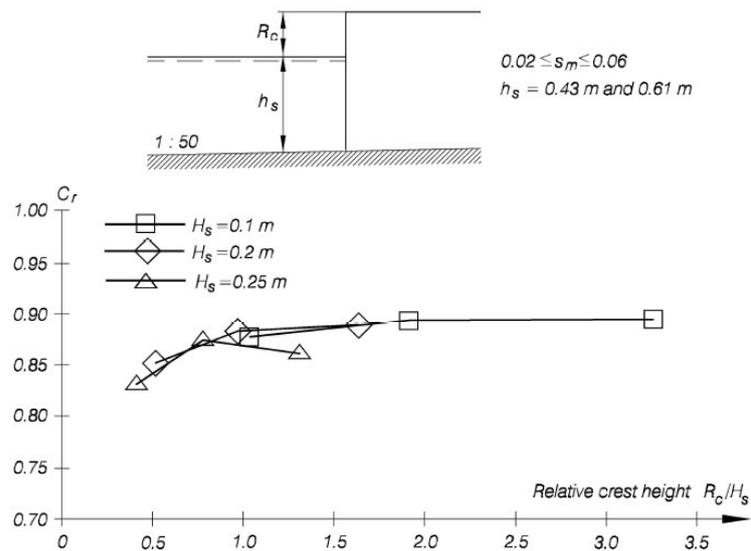
3. Efektifitas pemecah gelombang vertikal

Pada pemecah gelombang vertikal *full protection*, secara teoritis tidak ada penetrasi gelombang ke dalam tubuh konstruksi sehingga semua energi yang tidak dapat diserap oleh struktur akan dipantulkan kembali menjadi gelombang refleksi. Gambar 2.20 memperlihatkan koefisien refleksi pemecah gelombang vertikal berdinding penuh menurut Allsop, McBride, dan Columbo (1994). Nampak nilai-nilai C_r relatif sangat tinggi antara 0,85 sampai 0,90. Tetapi Takahashi (2002) memberi koreksi apabila puncaknya dibuat miring terhadap datangnya gelombang.

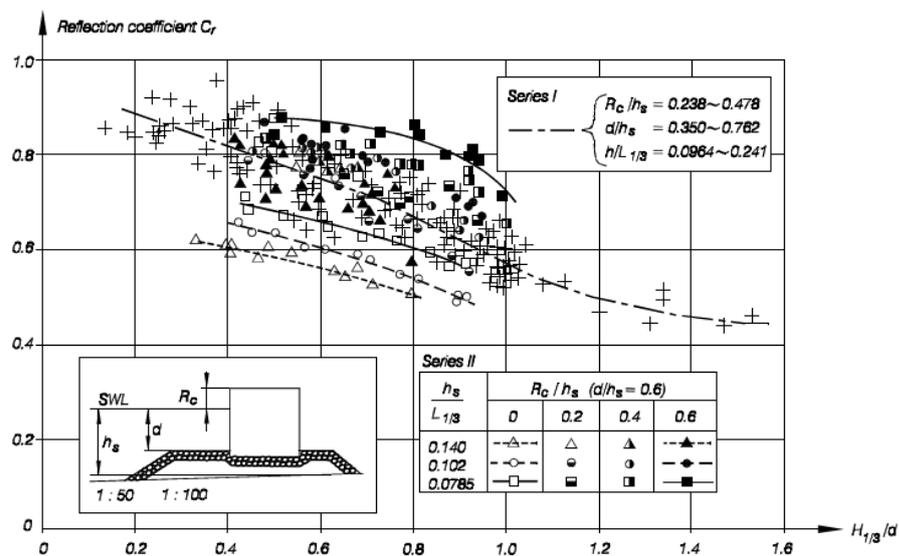
Gambar 2.21 memperlihatkan nilai-nilai C_r untuk pemecah gelombang komposit vertikal menurut Tanimoto, Takahashi, and Kimura (1987, *dalam* USACE, 2011). Jenis pemecah gelombang ini meskipun dimasukkan dalam kelompok full protection namun bahagian bawahnya sesungguhnya adalah pemecah gelombang gundukan batu tenggelam,



sehingga sebahagian energi dapat diserap, itulah sebabnya koefisien refleksi C_r lebih rendah yaitu antara 0,4 sampai 0,85.

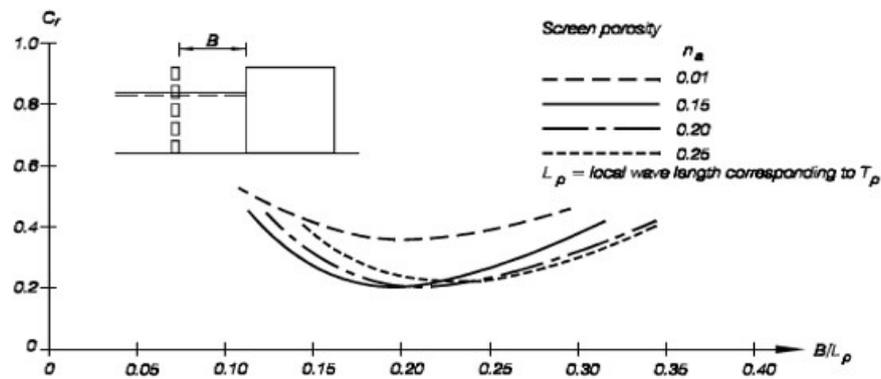


Gambar 2.20. Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang vertikal full protection (Allsop, McBride, and Columbo 1994, in USACE 2011, Fig. VI-5-20)

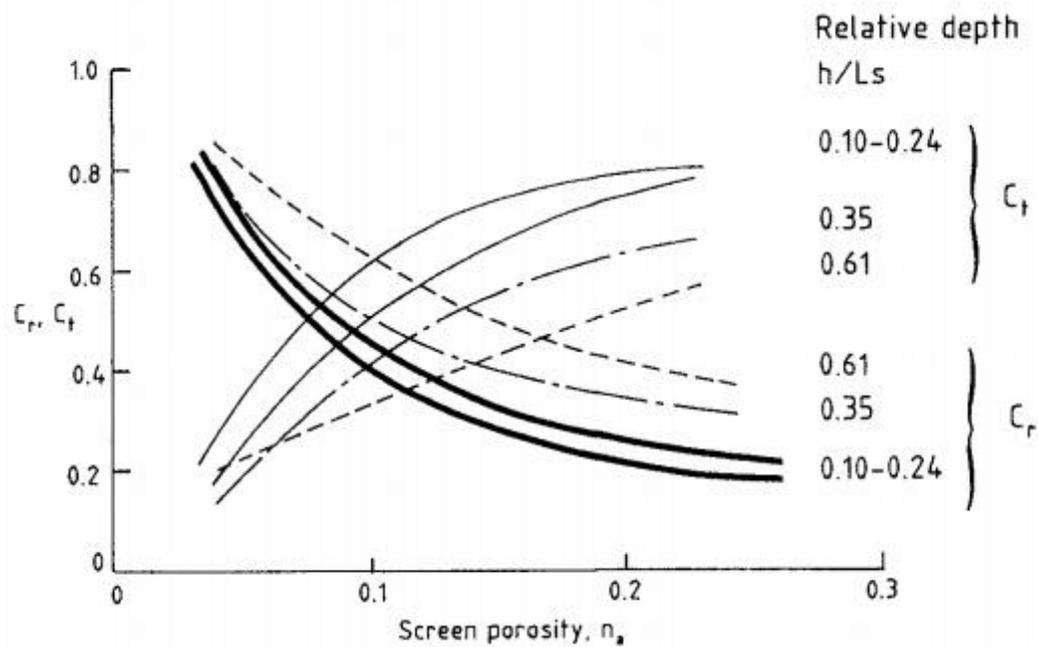


2.21. Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang komposit vertikal (Tanimoto, Takahashi, and Kimura 1987, dalam USACE 2011, Fig VI-5-21)





Gambar 2.22. Koefisien gelombang refleksi C_r untuk pemecah gelombang *perforated caisson* (Allsop and Hettiarachchi 1988, in USACE 2011, Fig. VI-5-24)



Gambar 2.23. Koefisien gelombang refleksi C_r dan transmisi C_t untuk pemecah gelombang *single perforated screen* (Allsop and Hettiarachchi, 1988)

Gambar 2.22 memperlihatkan koefisien refleksi dari *perforated caisson* yaitu konstruksi caisson dengan dua atau lebih kotak dimana kotak paling depan, yang berhadapan langsung dengan ombak yang datang, dibuat berlubang-lubang sehingga ombak dapat terjebak masuk lalu energinya teredam oleh pergolakan di dalam kotak caisson. Sepanjang tidak ada ombak melimpah praktis tidak ada gelombang transmisi; gelombang refleksi pun sangat kecil, nilai terendah mencapai $C_r = 0,2$. Yang menarik adalah ada nilai porositas n_a dan nilai rasio lebar kotak berlubang dengan panjang gelombang B/L_p yang memberikan nilai C_r terendah, artinya ada nilai-nilai optimum yang harus dicari dalam perencanaan.

Walaupun nampaknya sangat efektif, pelaksanaan di lapangan sulit. Pertama, pengangkutan caisson dari tempat pembuatan ke tempat pemasangan umumnya dengan mengapungkan, demikian pula instalasinya di tempat yang tepat memerlukan pengisian dan pengosongan air berulang-ulang. Jarang sekali ada caisson yang bisa diangkut dan ditempatkan dengan mengangkat karena beratnya sangat besar, bisa lebih dari 1000 ton. Kedua, dinding yang berlubang-lubang itu mudah pecah kalau tertumbuk kapal atau sesuatu yang keras. Grafik-grafik pada Gambar 2.22 itu sebenarnya adalah hasil penelitian Allsop and Hettiarachchi (1988) yang di-ilustrasi-kan oleh USACE (2011) dengan caisson berlubang pada kotak depan; Allsop dan Hettiarachchi sendiri dalam tulisan itu tidak memberi

kostruksi kecuali mengatakan "*wave reflection performance of caisson with impermeable rear wall*". Artinya konstruksinya bisa bukan



caisson, bisa dua dinding dari dasar sampai di atas muka air dengan dinding belakang tertutup penuh sedang dinding depan berlubang.

Grafik-grafik pada Gambar 2.23 menunjukkan koefisien refleksi dan transmisi untuk dinding vertikal tunggal berlubang-lubang (*single perforated screen*) dari Allsop and Hettiarachchi (1988), tetapi tidak diberi gambar spesifik konstruksi. Nampak sekali pengaruh porositas; semakin tinggi porositas semakin kecil refleksi tetapi sebaliknya semakin besar transmisi. Hal ini berbeda sekali dengan karakteristik pemecah gelombang gundukan batu vertikal yang akan kita lihat nanti, dimana perubahan satu-dua tingkat dari porosity tidak banyak berpengaruh pada tinggi refleksi atau pun transmisi. Hal ini disebabkan oleh karena gundukan batu itu tebal sehingga zat cair harus berulang-kali melewati hambatan.

Dalam segi kebutuhan material, pemecah gelombang dinding vertikal tunggal atau lebih populer disebut *wave screen* ini paling sedikit menggunakan material. Dari segi struktural, pondasi umumnya terbuat dari tiang pancang yang dapat dipesan pracetak dan dapat dibuat tertanam kuat ke dalam tanah keras, tetapi dinding beton bertulang yang berlubang dan tipis memikul beban pukulan ombak yang besar sehingga rawan pecah. Gelombang transmisi di belakang konstruksi bisa ditimbulkan oleh energi gelombang yang menembus tubuh struktur atau akibat limpahan air melewati puncak, namun terutama disebabkan oleh gelombang melimpah.

kena itu perbandingan (*ratio*) antara tinggi puncak gelombang (R_c) dengan tinggi gelombang yang datang (H atau H_s) adalah parameter yang

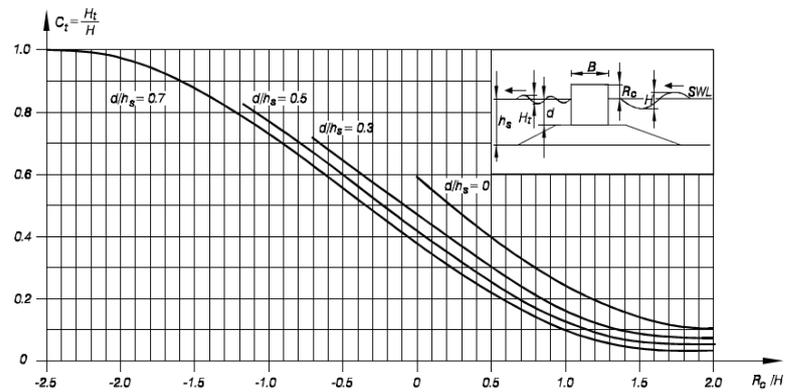


paling penting. Karena studi ini menyangkut pemecah gelombang vertikal yang permeable tanpa air melimpah (*partial protection vertical breakwater with no-overtopping*) maka diskusi selanjutnya difokuskan pada jenis konstruksi sedemikian itu.

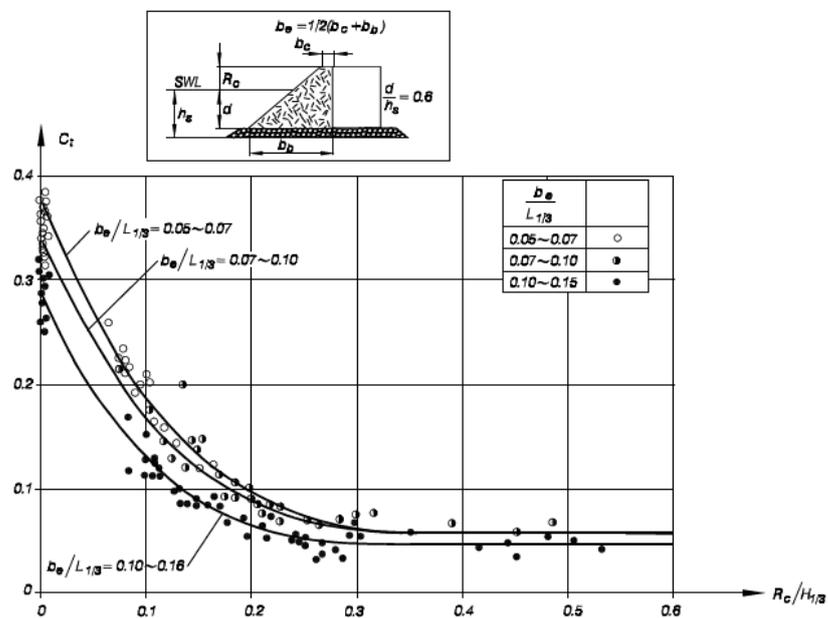
Gambar 2.24 memperlihatkan hasil penelitian yang sangat menarik oleh Goda (2010, 147). Terlihat nilai koefisien transmisi C_t pada pemecah gelombang vertikal tipe caisson bisa dari 1 (*standing wave*) sampai mendekati 0. Faktor yang paling menentukan adalah rasio nilai R_c terhadap tinggi gelombang datang H , semakin besar R_c terhadap H makin efektif peredaman gelombang transmisi. Tinggi pondasi gundukan batu (h_s-d) juga berpengaruh tetapi tidak sebesar pengaruh R_c . Grafik-grafik itu dapat juga dipakai untuk puncak pemecah gelombang berada di bawah permukaan air. Sayang sekali tidak diperlihatkan hasil C_r untuk kondisi yang sama. Di sini pun Takahashi (2002) memberi koreksi bila puncak caisson diberi kemiringan.

Gambar 2.25 (Tanimoto, Takahashi, and Kimura, 1987, dalam Goda, 2010) memperlihatkan koefisien gelombang transmisi untuk pemecah gelombang komposit horizontal. Terlihat nilai C_t sangat kecil hanya $\pm 0,05$ sampai $\pm 0,38$; ini tentu akibat air melimpah karena tak ada porositas sama sekali. Yang terpenting adalah adanya nilai optimum dari R_c/H_s yaitu sekitar 0,3; jadi puncak pemecah gelombang tidak perlu terlalu tinggi di atas muka





Gambar 2.24. Koefisien gelombang transmisi C_t untuk pemecah gelombang komposit vertikal (Goda 2010, Fig 3.56)



Gambar 2.25. Koefisien gelombang transmisi C_t untuk pemecah gelombang komposit horizontal (Goda 2010, Fig 3.56)

Perkembangan selanjutnya dari pemecah gelombang vertikal lebih mengarah ke dinding vertikal atau *wave screen*, baik dinding tunggal maupun ganda, mungkin karena lebih hemat material dan kemajuan dalam pembuatan material konstruksi seperti tiang pancang pra-cetak untuk pondasi. Tetapi pendekatan lebih banyak dilakukan dengan metode numerik (*numerical model*), bukan *physical model*; sebahagian memverifikasi hasil-hasilnya dengan test laboratorium, banyak pula yang tidak. Yang mengherankan adalah walaupun banyak dari studi ini sudah dilakukan sebelum dan selama penyusunan buku pedoman populer *Coastal Engineering Manual CEM* (USACE 2002 – 2011), namun hasil-hasil studi dengan model numerik ini belum/tidak dikemukakan di dalamnya.

Metode numerik ini sangat homogen, dimulai dari rumus-rumus dasar mekanika fluida seperti persamaan Bernoulli dan Laplace kemudian memasukkan kondisi-kondisi batas, lalu menyelesaikan persamaan-persamaan differensial dengan *Eigen function expansion technique* untuk mendapatkan fungsi potensial kecepatan Φ . Suh, Shin dan Cox (2006) dengan penelitian *pile-supported vertical wall breakwater* (Gambar 2.16), Koraim (2007) dengan *double rows pile breakwater* (Gambar 2.17), Rageh dan Koraim (2009) dengan *vertical walls with horizontal slots*, Suh (dalam Kim 2010) dengan berbagai model *curtain-wall-pile breakwaters* sampai *perforated-wall caisson breakwater*, Ahmed and Schlenkhoff (2014) dengan

vertical slotted walls, Ibrahim et al (2016) dengan *vertical perforated*
ter, Liu and Li (2007 dan 2017) dengan *perforated caisson*



breakwaters adalah antara lain yang melakukan prosedur numerik yang sama.

Penjabaran numerik dimaksud dimulai dengan asumsi dasar dalam mekanika fluida bahwa zat cair tidak dapat dimampatkan (*incompressible*) dan gerak aliran tidak berotasi (*irrotational flow*), sehingga terdapat potensi kecepatan (*velocity potential*) $\Phi(x,y,z,t)$ yang memenuhi persamaan Laplace. Meninjau aliran dua dimensi dan syarat batas permukaan bebas, keadaan batas berikut untuk potensi kecepatan $\Phi(x,z,t)$ berlaku:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \text{ pada } z = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ pada } z = -h \quad (2.23)$$

dimana ω = frekuensi sudut gelombang dan g = percepatan gravitasi. Menganggap gerakan periodik dalam waktu t , solusi untuk persoalan di atas adalah:

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re} \left[-\frac{igH_i}{2\omega} \frac{1}{\cosh(kh)} \phi(x, z) \exp(-i\omega t) \right] \quad (2.24)$$

dimana $i = \sqrt{-1}$ dan simbol Re mewakili bahagian riil dari suatu nilai kompleks. Angka gelombang k harus memenuhi hubungan penyebaran $\omega^2 = gk \tanh(kh)$. Variasi ruang dari potensi kecepatan $\Phi(x,z)$ harus

pada setiap wilayah. Penyelesaian pada setiap wilayah itu an persamaan-persamaan matriks yang sangat besar sehingga selesaikan dengan bantuan komputer.



Masalah metode numerik ini tidak akan dibicarakan lebih lanjut karena diluar topik studi ini yang menyangkut pemodelan fisik, lagi pula seperti dikatakan di atas pemakaiannya belum diperkenalkan dalam *Coastal Engineering Manual* (USACE 2002 – 2011) yang menjadi pedoman umum para *coastal engineers*. Pembahasan selanjutnya adalah perkembangan terbaru mengenai pemecah gelombang vertikal yang memanfaatkan gundukan batu sebagai penyerap energi gelombang, sama seperti pokok studi ini.

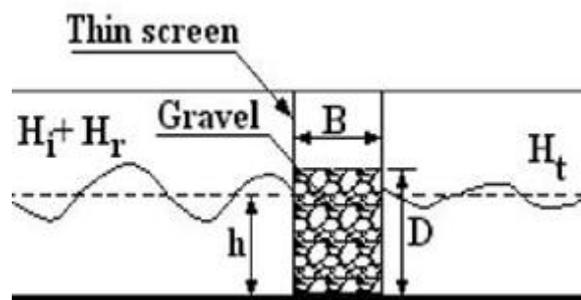
Perkembangan pemecah gelombang vertikal setelah berjalan begitu jauh seperti diuraikan di atas, mulai lagi kembali menggunakan gundukan batu untuk menyerap energi gelombang datang. Apakah terjadi kegagalan-kegagalan sehingga kembali ke prinsip disain lama seperti yang dikatakan oleh Takahashi (2002, p.25)? Penulis sendiri belum mengetahui jelas, namun penelitian-penelitian antara lain oleh Rageh (2009), Wurjanto, Ajiwibowo and Zamzami (2010), Faraci et al (2012), Liu and Faraci (2014) memanfaatkan struktur vertikal yang diisi gundukan batu untuk memaksimalkan penyerapan energi gelombang.

Rageh (2009) melakukan percobaan-percobaan *physical model* dengan sebuah model yang terbuat dari kotak kawat kasa (*steel screen box*) yang diisi batuan (Gambar 2.26); sudut-sudut kotak diperkuat dengan besi siku. Dimensi saluran adalah panjang 15.10 m, lebar 1.00 m, dan tinggi

Pembangkit gelombang tipe *flap* yang membangkitkan gelombang
Kedalaman air (h) = 40 cm; tinggi gelombang datang (H_i) = 7 – 10,5



cm; periode (T) = 0,70 – 1,20 det; panjang gelombang (L) = 75 – 180 cm; lebar model (B) = 0,3h, 0,45h, 0,6h; tinggi model (D) = 0,75h, h, 1,25h; porositas agregat (n) = 0,41 dan 0,46; diameter ekuivalen agregat (d_{50}) = 29 dan 18 mm. Efektifitas transmisi model ini diperlihatkan pada Gambar (2.27). Untuk keadaan puncak pemecah gelombang di atas muka air ($D/h = 1,25$), efektifitas transmisi sangat baik ($K_t = 0,1 - 0,3$). Sebaliknya pada keadaan puncak tenggelam ($D/h = 0,75$), sangat tidak efektif ($K_t = 0,8 - 0,9$).

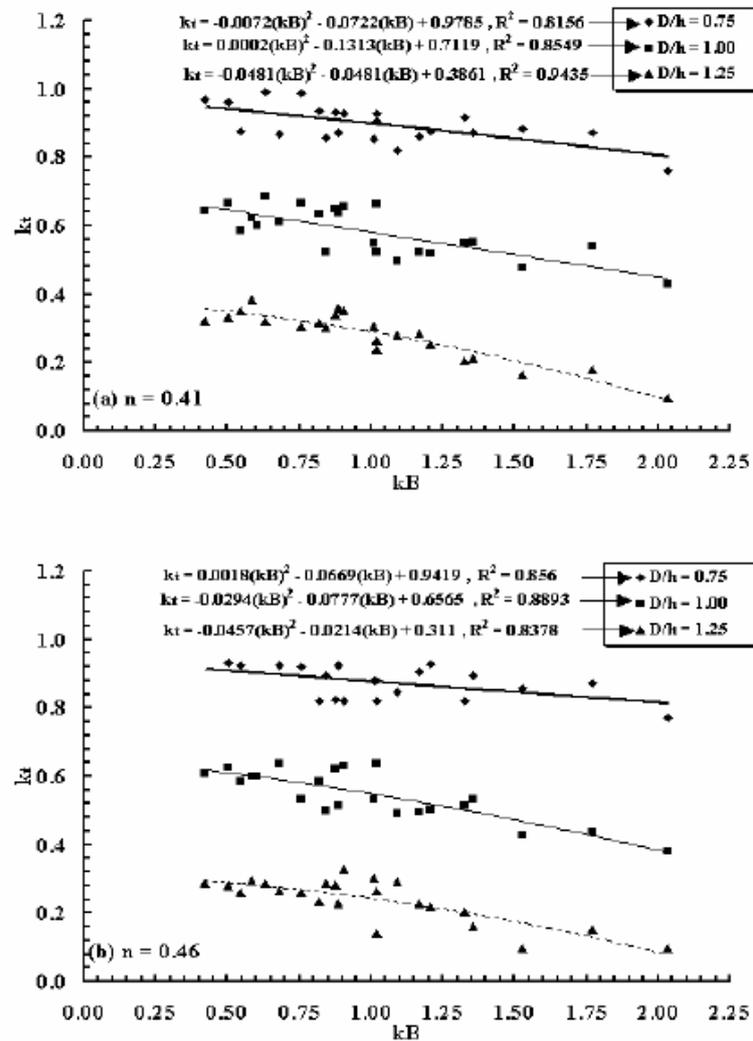


Gambar 2.26. Model pemecah gelombang gundukan batu vertikal berdinding tipis (Rageh 2009)

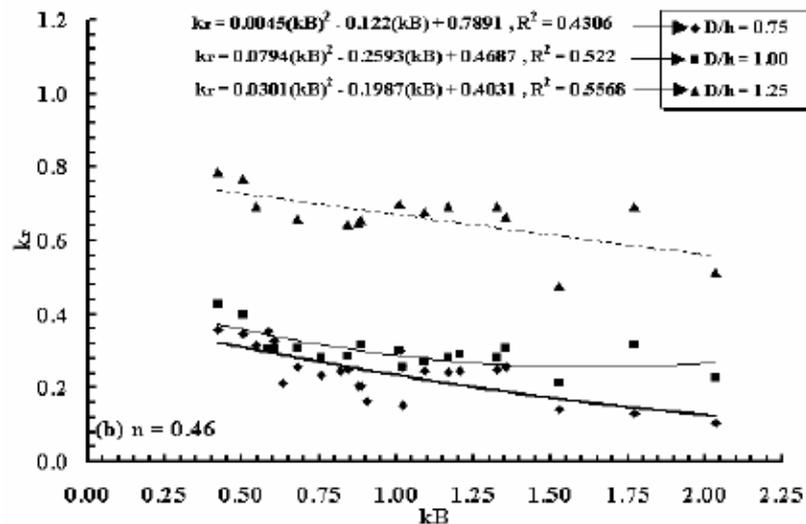
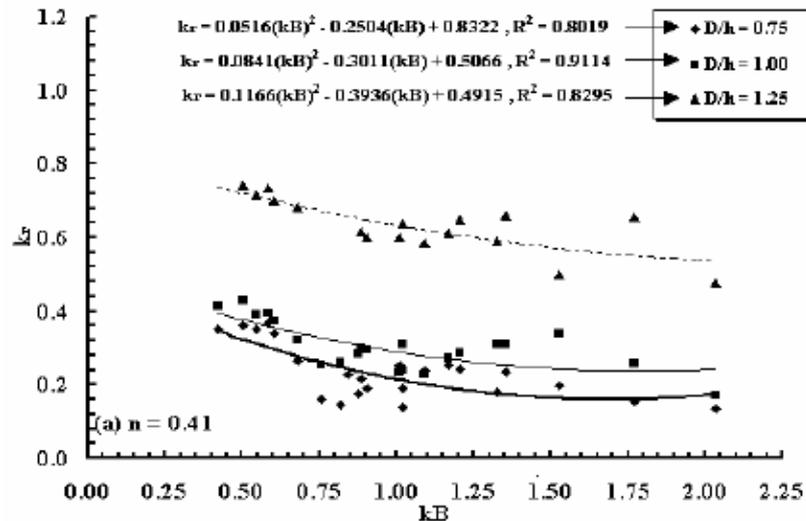
Efektifitas refleksi model Rageh diperlihatkan pada Gambar 2.28. Tampak koefisien refleksi sangat bertolak belakang dengan koefisien transmisi pada gambar terdahulu. Pada saat puncak struktur di atas muka air ($D/h = 1,25$), nilai $K_r = \pm 0,6 - 0,8$; sebaliknya bila tenggelam ($D/h = 0,75$), nilai $K_r = 0,1 - 0,3$ sebab air melimpah menyebabkan transmisi tinggi. Hal

lain yang ditunjukkan oleh penelitian Rageh (2009) adalah bahwa pemecah gelombang gundukan batu pengaruh porositas satu-dua kelas signifikan.





Gambar 2.27. Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang relatif (D/h dan B/h) pada koefisien transmisi (Rageh 2009)



Gambar 2.28. Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang relatif (D/h dan B/h) pada koefisien refleksi (Rageh 2009)

Wurjanto et al (2010) melakukan pemodelan fisik 2-D dari *perforated*

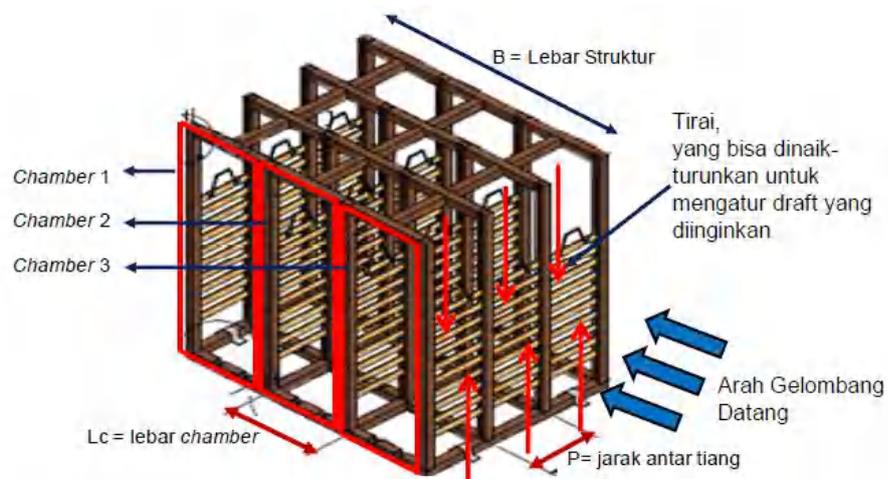
breakwater (PSB) untuk pelabuhan LNG Teluk Bintuni, Papua.

Man air sekitar pelabuhan adalah 6 – 9 m. Pemodelan dilakukan di

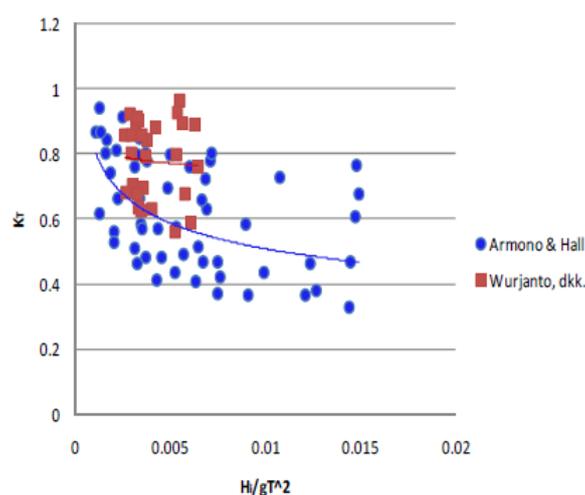
laboratorium Gelombang Teknik Kelautan ITB, Bandung. Saluran



gelombang berukuran panjang 40 meter, lebar 1,5 meter dan tinggi 1,4 meter. Gelombang dibangkitkan oleh pembangkit gelombang tipe piston yang dapat membangkitkan gelombang hingga tinggi gelombang = 30 cm. Investigasi terbatas pada gelombang biasa (*regular waves*). Model PSB diperlihatkan pada Gambar 2.29. Skala model $\pm 1 : 12$.



Gambar 2.29. Model *perforated skirt breakwater* (PSB) dari pelabuhan LNG Tangguh, Teluk Bintuni, Papua. (Wurjanto, Ajiwibowo, Zamzani 2010)

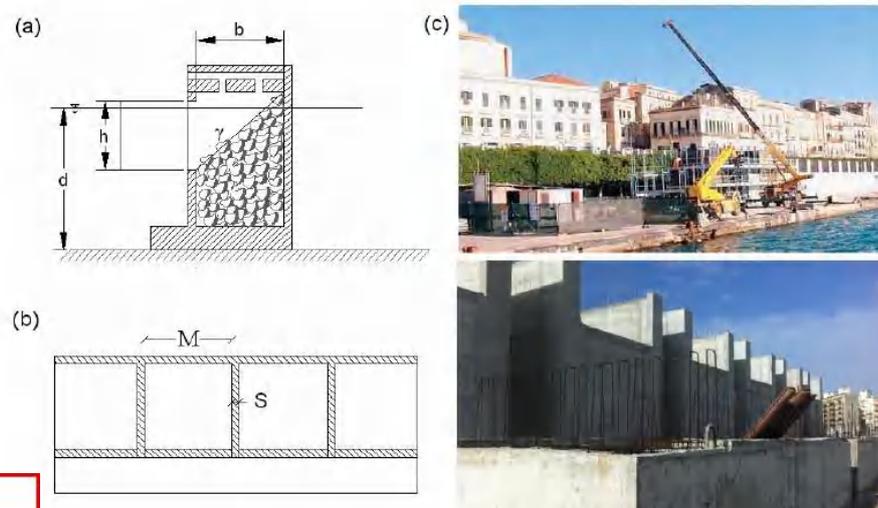


Gambar 2.30. Perbandingan gelombang transmisi dari PSB (Wurjanto, Ajiwibowo, Zamzani 2010) dengan HSAR (Armono and Hall 2003), $h/d \leq 1,0$

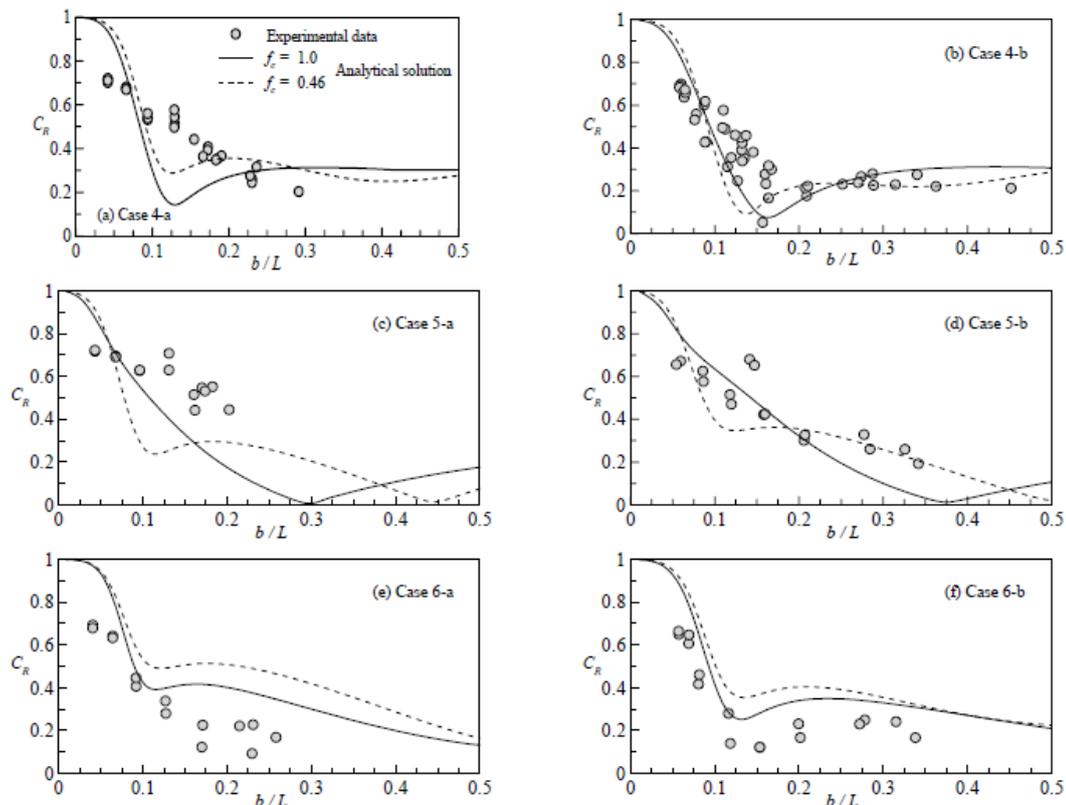


Hasil yang dilaporkan hanya untuk gelombang transmisi. Nampaknya tidak terlalu efektif ($K_t = 0,6 - 1$), mungkin karena puncak pemecah gelombang maksimum setinggi permukaan air ($h/d \leq 1,0$). Hasil-hasilnya dibandingkan juga dengan hasil *hollow hemispherical shape artificial reefs* (HSAR) dari Armono dan Hall (2003) yang ternyata lebih efektif (Gambar 2.30). Namun tingkat efektifitas pemecah gelombang PSB dengan mudah ditingkatkan dengan mengisinya dengan batu.

Faraci et al (2012) mencoba mengatasi tingginya refleksi pada *perforated front wall caisson* dengan mengisinya batu (Gambar 2.31(a)). Pada pemecah gelombang tipe ini tentu saja gelombang transmisi tidak dipersoalkan lagi, kecuali kalau diizinkan ombak melimpah, sehingga seluruh energi gelombang datang akan berubah menjadi energi yang hilang akibat gesekan di rongga batuan dan sisanya menjadi gelombang refleksi. Dengan demikian diharapkan tinggi gelombang refleksi sangat kecil.



Gambar 2.31. Sketsa dari caisson kombinasi: (a) penampang melintang; (b) tapak; (c) caisson kombinasi dalam pembangunan di pelabuhan Siracusa, Italy (Liu and Faraci 2014)



Gambar 2.32. Perbandingan hasil-hasil semi-analitis dengan eksperimen (Liu and Faraci 2014)

Studi tentang caisson kombinasi dilaksanakan dalam dunia nyata di pelabuhan Siracusa, Italia (Gambar 2.31(c)). Tentu saja hal ini menjadi menarik untuk dipelajari lebih lanjut, sehingga Liu and Faraci (2014) membuat studi perbandingan gelombang refleksi antara hasil semi analitis (*semi-numerical method*) dengan eksperimen-eksperimen (*physical model*). Hasil studi perbandingan ini disajikan pada Gambar (2.32). Nampak bahwa hasil-hasil analitis dan eksperimen tidak begitu selaras, mungkin

alasan inilah hasil studi-studi analisa numerik belum diberikan dalam pedoman Coastal Engineering Manual. Kita menantikan hasil perbandingan gelombang-gelombang sebenarnya dari lapangan kelak untuk



memastikan mana yang lebih akurat. Sayangnya sekali regresi dan korelasi untuk hasil-hasil eksperimen tidak diberikan.

4. Energi yang hilang

Pada uraian yang lalu, tingkat efektifitas pemecah gelombang diukur dengan koefisien-koefisien yang membandingkan tinggi gelombang transmisi H_t dengan tinggi gelombang yang datang H_i , $K_t \equiv C_t = H_t / H_i$, dan tinggi gelombang refleksi H_r dengan tinggi gelombang yang datang H_i , $K_r \equiv C_r = H_r / H_i$. Energi yang hilang, akibat dissipasi di rongga-rongga batuan atau melalui lubang-lubang dinding vertikal, belum diperhitungkan; padahal efektifitas pemecah gelombang yang sebenarnya adalah besarnya energi yang hilang akibat diserap oleh tubuhnya.

Untuk menganalisis energi yang hilang kita bertolak dari hukum kekekalan energi yaitu energi gelombang datang E_i harus sama dengan jumlah energi gelombang transmisi E_t ditambah dengan energi gelombang refleksi E_r serta energi yang hilang E_L , atau dengan rumus:

$$E_i = E_t + E_r + E_L \quad (2.25)$$

Sebagaimana yang akan diuraikan di Sub-bab II.E., energi per satuan luas permukaan gelombang dengan tinggi H adalah $E = \rho g H^2 / 8$, maka bila setiap suku pada Rumus (2.25) dibagi dengan E_i menghasilkan:

$$1 = \frac{H_t^2}{H_i^2} + \frac{H_r^2}{H_i^2} + \frac{E_L}{E_i} \quad \text{atau}$$

$$1 = C_t^2 + C_r^2 + \frac{E_L}{E_i} \quad (2.26)$$



Selanjutnya ada dua pendapat berbeda tentang E_L ; yang pertama berasumsi ada gelombang khayal dengan tinggi H_L sehingga $E_L = \rho g H_L^2 / 8$ dan $C_L \equiv K_L = H_L / H_i$ (Rumus 2.27a), sedang pendapat kedua mengatakan E_L tetap sehingga $C_L \equiv K_L = E_L / E_i$. Kedua pendapat itu tetap populer dalam dunia teknik pantai, sehingga tetap diberikan di sini tetapi studi ini untuk selanjutnya menggunakan definisi yang kedua (Rumus 2.27b):

$$K_L \equiv C_L = \sqrt{1 - C_t^2 - C_r^2} \quad (2.27a)$$

$$K_L \equiv C_L = 1 - C_t^2 - C_r^2 \quad (2.27b)$$

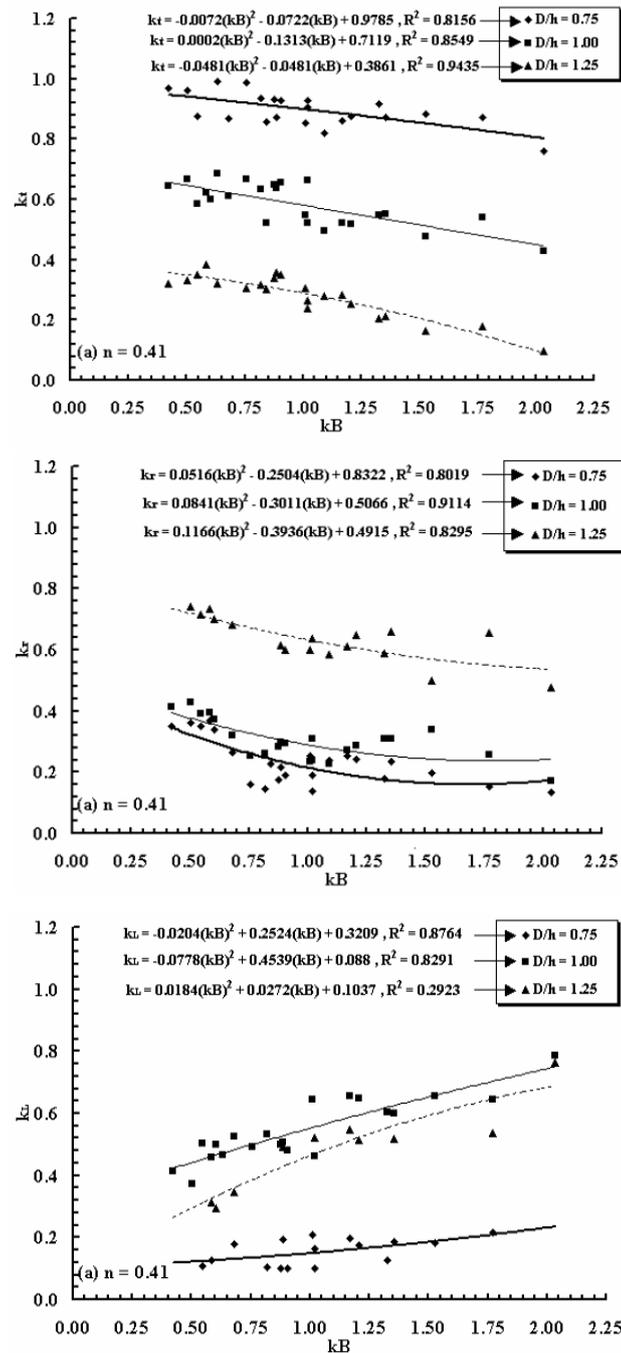
Hubungan antara C_t , C_r , dan C_L untuk hasil model fisik pada gundukan batu vertikal diperlihatkan pada Gambar (2.33) oleh Rageh (2009). Sedang hasil model numerik dan fisik oleh Suh and Shin (2006) untuk *pile-supported vertical wall* (Gambar 2.16) diperlihatkan pada Gambar (2.34). Keduanya menggunakan Rumus (2.27b) sebagai rumusan energi hilang.

Pada gundukan batu vertikal tampak C_t dan C_r sama-sama turun seiring bertambahnya lebar kB , sementara itu nilai C_L terus bertambah; ini artinya semakin lebar pemecah gelombang semakin besar energi yang diserapnya, sehingga gelombang transmisi dan refleksi bisa sama-sama turun. Sebaliknya pada dinding vertikal, nampak bahwa semakin besar kedalaman air relatif kh semakin kecil C_t dan semakin besar C_r , bahkan

refleksi besar kemungkinan mencapai nilai maksimum $C_r = 1$,
waves; sementara itu koefisien kehilangan energi semakin kecil

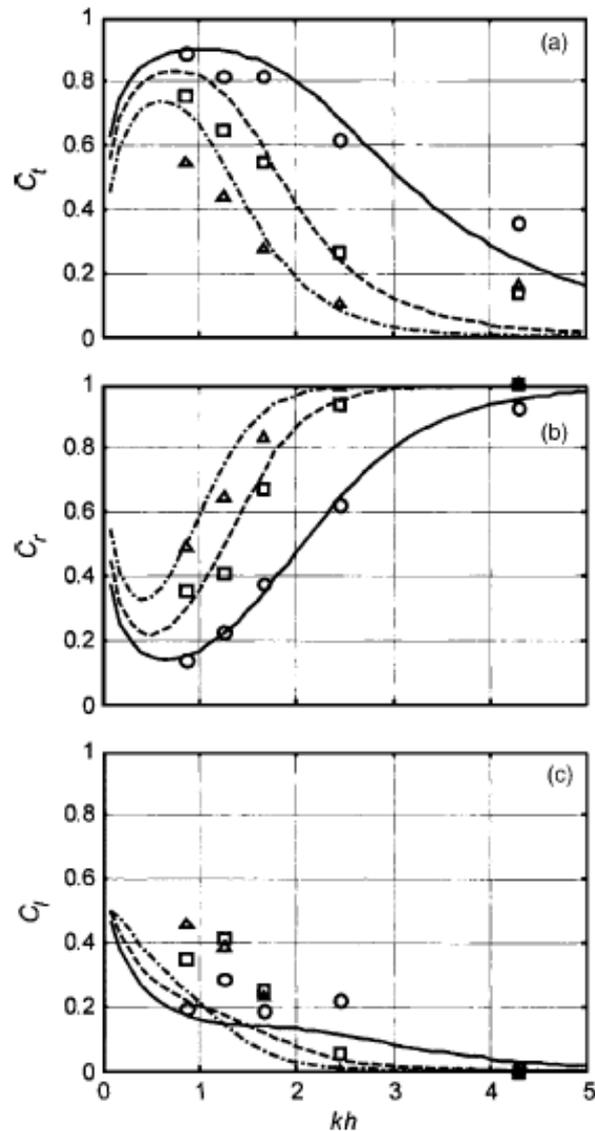


sampai $C_L = 0$. Ini berarti pada dinding vertikal, hampir-hampir tidak ada penyerapan energi oleh lubang-lubang dinding vertikal. Nilai $kh = 0 - 0,5$ dalam praktek tidak ada karena berarti kedalaman air $h = 0$.



Gambar 2.33. Pengaruh tinggi dan lebar pemecah gelombang batu vertikal (D/h dan k_B) terhadap energi transmisi, refleksi, dan hilang (Rageh 2009)





Gambar 2.34. Pengaruh tinggi relatif (kh) pemecah gelombang dinding vertikal berlubang terhadap energi transmisi, refleksi, dan hilang berdasarkan analisis dan eksperimen (Suh,Shin and Cox 2006)

5. Intisari

Dari tinjauan pustaka tentang efektifitas pemecah gelombang dapat disimpulkan bahwa bila efektifitas pemecah gelombang hanya diukur dari energi gelombang refleksi dan transmisi maka pemecah gelombang



gundukan batu lebih unggul sedikit saja dalam hal meredam gelombang refleksi, tetapi mengingat pemakaian material maka orang mungkin akan lebih memilih dinding vertikal asal efek refleksi (misalnya terhadap pelayaran dan *toe erosion*) bisa diatasi.

Tetapi bila efektifitas dilihat dari segi penyerapan energi (*wave energy dissipation*), maka perbedaan nampak jelas. Pada pemecah gelombang gundukan batu vertikal koefisien refleksi dan koefisien transmisi dapat sama-sama turun sedang koefisien energi hilang bertambah, ini berarti energi yang hilang adalah akibat diserap dalam rongga antara batu. Sedangkan pada pemecah gelombang dinding vertikal, koefisien transmisi dapat diturunkan dengan memperkecil porositas tetapi akibatnya adalah koefisien refleksi naik bahkan bisa sampai *standing waves*, sementara koefisien energi hilang tetap saja kecil sampai nol. Ini berarti pemecah gelombang dinding vertikal hampir-hampir tidak menyerap energi gelombang sama sekali, hanya merubah ke transmisi dan refleksi.

Rayleigh (2009) juga menunjukkan bahwa pengaruh perbedaan porositas terhadap penyerapan energi pada gundukan batu sangat kecil, sedang pada dinding vertikal pengaruhnya besar. Hal ini memungkinkan pada gundukan batu vertikal pemakaian batu dengan berbagai ukuran yang jauh lebih kecil dari pada pemecah gelombang gundukan batu konvensional. Kecilnya pengaruh porositas pada gundukan batu

kinan besar disebabkan oleh kenyataan bahwa pengaliran zat cair



harus terus terhambat di antara lapisan-lapisan batu sehingga efeknya sama dengan porositas kecil.

Terakhir, ada kecenderungan kembali memakai pemecah gelombang gundukan batu tetapi vertikal. Perkembangan dalam teknologi material misalnya beton mutu tinggi dan peralatan berat yang dapat mengangkat beban ratusan ton, sangat mendukung perkembangan pemecah gelombang baik gundukan batu vertikal maupun dinding vertikal dengan tiang beton besar sebagai pendukung. Inilah salah satu alasan pemilihan topik studi ini.



D. Teori Gelombang Yang Digunakan

1. Pengantar

Walaupun metode pemodelan fisik tidak menggunakan prosedur matematis yang mekanistik namun pembahasan tentang teori-teori gelombang yang digunakan perlu dikemukakan untuk menunjukkan keabsahan dari variabel-variabel yang dilibatkan dan memperlihatkan hubungan ketergantungan antar variabel. Untuk itu pendapat yang dikemukakan oleh Kamphuis (2011, 32-33) dipegang sebagai pedoman:

Pertama-tama hampir tidak mungkin menemukan suatu teori yang dapat mempresentasikan pembangkitan gelombang di laut yang tidak beraturan. Dapat diharapkan bahwa suatu teori yang sederhana dapat lebih bermanfaat dalam menjelaskan keadaan gelombang *swell* yang lebih teratur. Selama bertahun-tahun pengalaman menunjukkan bahwa untuk kebanyakan kasus tidak perlu membedakan antara keadaan *sea* dan *swell*, ataupun menggunakan suatu teori yang lebih kompleks. *Small Amplitude Wave Theory* dapat dengan meyakinkan dipakai baik untuk keadaan *swell* maupun *sea*, karena konsisten dengan pertimbangan-pertimbangan perencanaan lainnya dan dengan ketidak-pastian dalam data gelombang. Teori-teori gelombang yang lebih rumit banyak dikembangkan, tetapi penggunaannya biasanya hanya untuk penelitian dan perencanaan-perencanaan yang sangat kompleks.

Lebih jauh, batasan-batasan pemakaian teori gelombang yang klasik telah diberikan pada Gambar (1.5). Karena pemecah gelombang umumnya dibangun di air dalam supaya efektif menjalankan fungsinya, maka teori-teori untuk gelombang laut dangkal tidak berlaku di sini. Selanjutnya, karena studi ini menyangkut perairan sebelah dalam dari Indonesia maka

yang terjadi maksimum tinggi 4 meter dengan periode sekitar 4 k (dari berbagai data BMKG via internet). Ini adalah wilayah



berlakunya *Small Amplitude Wave Theory (Linier Wave Theory)* sampai *Stoke's 2nd Order Theory*.

Pertimbangan ketiga dalam pemilihan teori gelombang adalah praktek pemodelan fisik pada laboratorium gelombang sendiri. Alat pembangkit gelombang (*wave generator*) terdiri atas tipe yang hanya dapat membangkitkan *regular waves* dan tipe yang dapat pula membangkitkan *irregular waves*. Pada tipe *regular* terdapat jenis *piston* dan *flap*; jenis *piston* untuk membangkitkan gelombang air dangkal, sedang jenis *flap* untuk membangkitkan gelombang air dalam. Tipe *regular* ini bergerak periodik teratur (*simple harmonic motion*) sehingga gelombang yang ditimbulkannya pasti periodik pula. Untuk menghasilkan *linier simple harmonic motion* (gelombang sinusoidal) adalah relatif mudah, tetapi untuk menghasilkan gelombang ber-orde tinggi sangat sulit; *Stoke's Second Order* saja misalnya membutuhkan setidaknya dua gelombang sinusoidal untuk di-superposisi-kan, tidak bisa dilakukan dengan satu pembangkit gelombang *regular*. Menjalankan pembangkit gelombang mendekati ayunan maksimumnya atau dengan kecepatan tinggi dapat menghasilkan gelombang yang tidak linier, tetapi sering pecah saat keluarnya atau bentuknya sulit dikendalikan untuk mengikuti bentuk yang diinginkan.

Dengan ketiga pertimbangan tersebut di atas, kebanyakan peneliti dalam gelombang *monochromatic* memakai *Small Amplitude Wave Theory*

penelitiannya baik untuk analitis maupun untuk eksperimennya. Suk Suh misalnya (*dalam Kim 2010, 317-339*) menggunakan



Rumus (2.24) yang adalah rumus potensial kecepatan untuk *Linier Wave Theory* untuk menganalisis C_r , C_t , dan F_{max} gaya maximum yang bekerja pada pemecah gelombang vertikal, mulai dari *curtain-wall-pile*, *perforated caisson*, sampai ke deretan dinding vertikal. Dengan alasan yang sama, studi ini memakai *small amplitude wave theory* sebagai pedoman utama dengan tambahan *Stoke's second order theory* sebagai pelengkap sehingga ruang lingkup masalah tercakup semua.

2. Small amplitude wave theory

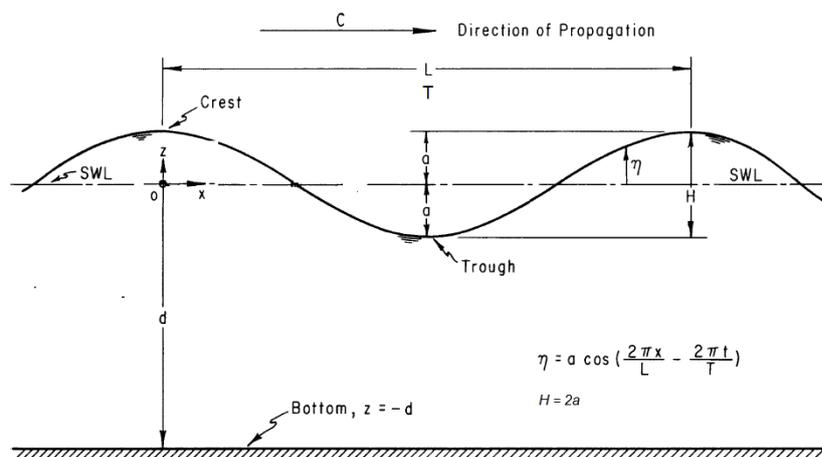
Fenomena gelombang laut adalah kompleks, akan tetapi, seperti yang sudah dikemukakan di atas, banyak aspek dari mekanika fluida hanya memberikan pengaruh yang kecil dalam menyelesaikan kebanyakan persoalan teknik pantai (USACE 1984, 2:4). *Small amplitude wave theory*, atau *linear wave theory*, atau *Airy theory* adalah teori gelombang yang berdasarkan gerak harmonis sederhana yang sinusoidal, paling banyak dipakai dalam pemecahan persoalan teknik pantai terutama dalam eksperimen di laboratorium. Teori ini dikembangkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- (1) Zat cair homogen dan tak mampat, karena itu rapat massa ρ konstan.
- (2) Tegangan permukaan dapat diabaikan.
- (3) Efek coriolis dapat diabaikan.
- (4) Tekanan pada permukaan bebas adalah seragam dan konstan.
- (5) Zat cair adalah ideal atau tidak mempunyai kekentalan (*inviscid*).



- (6) Gelombang tidak berinteraksi dengan gerak zat cair lain.
- (7) Dasar laut adalah horisontal, tetap, dan impermeabel sehingga kecepatan vertikal di dasar laut adalah nol.
- (8) Amplitudo gelombang adalah kecil (terhadap panjang gelombang dan kedalaman air) dan profil gelombang tidak berubah dalam waktu dan ruang.
- (9) Gerak gelombang adalah dua dimensi, sehingga partikel air tidak berotasi.

Beberapa asumsi mungkin perlu dilonggarkan untuk persoalan-persoalan khusus, misalnya asumsi ke (4) untuk pengembangan teori gelombang ber-orde tinggi dimana amplitudo besar serta tinggi puncak dan lembah gelombang tidak lagi simetris terhadap permukaan air rata-rata.



Gambar 2.35. Definisi variabel-variabel dasar dalam *small amplitude wave theory* (USACE 1984, Fig 2.2)



Gambar 2.35 memperlihatkan variabel-variabel yang paling penting dari suatu gelombang sinusoidal sederhana yaitu panjang

gelombang L , tinggi gelombang H yang sama dengan dua kali amplitudo a , periode T yaitu waktu yang diperlukan untuk mencapai satu kali panjang gelombang, dan kedalaman air d yaitu jarak dari dasar laut sampai ke permukaan air tenang (SWL). Dengan asumsi-asumsi tersebut di atas *small amplitude wave theory* dan beberapa *finite amplitude wave theories* yang lebih tinggi dapat dikembangkan untuk menentukan hubungan-hubungan antar variabel-variabel itu.

Untuk maksud itu diperkenalkan fungsi potensial kecepatan $\Phi(x, z, t)$. Komponen-komponen vertikal dan horisontal dari kecepatan partikel air ditentukan pada titik (x, z) dalam cairan sebagai $u = \partial\Phi / \partial x$ dan $w = \partial\Phi / \partial z$. Persamaan dinamis Bernoulli, persamaan Laplace, dan potensial kecepatan bersama dengan syarat-syarat batas yang tepat memberi informasi yang cukup untuk menurunkan rumus-rumus *small amplitude wave*. Penurunan rumus-rumus itu sudah diberikan secara detail dalam banyak buku teori gelombang klasik. Keperluan dalam tulisan ini hanyalah menunjukkan bagaimana hubungan antara variabel-variabel yang relevant dengan studi ini.

Persamaan Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.28)$$

Kondisi batas di dasar laut adalah kecepatan vertikal nol:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{di } z = -d \quad (2.29)$$



Kondisi batas pada permukaan laut diperoleh dari persamaan Bernoulli yang dinamis:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz + \frac{p}{\rho} = 0 \quad (2.30)$$

dimana g adalah percepatan gravitasi, p adalah tekanan setempat, dan ρ adalah rapat massa zat cair.

Karena tinggi gelombang sangat kecil dibanding panjangnya (*small amplitude wave*), maka persamaan di atas dapat di-linierkan, artinya u^2 dan w^2 dapat diabaikan. Pada permukaan $z = \eta$, maka dengan mengambil tekanan di permukaan adalah nol (hanya tekanan atmosfer), persamaan Bernoulli menjadi:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=\eta} \quad (2.31)$$

Dengan asumsi bahwa tinggi gelombang adalah kecil dibandingkan kedalaman, maka kondisi batas di $z = 0$ kira-kira sama dengan di $z = \eta$. Dengan anggapan tersebut maka kondisi batas pada permukaan adalah:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (2.32)$$

Dengan nilai dari persamaan (2.29) dan (2.32), persamaan differensial (2.28) diselesaikan. Ada beberapa cara penyelesaian tergantung tujuan dari perhitungan. Ada yang menggunakan *Eigen function expansion method* dimana penyelesaian persamaan-persamaan

ya lebih cepat dengan komputer seperti pada rumus (2.24), tetapi



banyak pula menggunakan persamaan hiperbola agar hubungan antar variabel dapat terlihat secara langsung seperti berikut ini::

$$\Phi = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.33)$$

dimana Φ adalah potensial kecepatan, g adalah percepatan gravitasi, σ adalah frekuensi gelombang = $2\pi/T$, k adalah angka gelombang = $2\pi/L$, d adalah kedalaman laut, z adalah jarak vertikal suatu titik yang ditinjau terhadap muka air diam, x adalah jarak horisontal, t adalah waktu, dan a adalah amplitudo.

Persamaan (2.33) adalah persamaan dasar *small amplitudo wave theory* atau *Airy theory*, dari mana sifat-sifat gelombang seperti kecepatan rambat, fluktuasi permukaan dan lain-lain dihitung. Kecepatan rambat gelombang C adalah:

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.34)$$

Dengan memasukkan kondisi-kondisi batas pada permukaan air ke dalam persamaan (2.33) akan diperoleh kecepatan rambat gelombang:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.35)$$

Persamaan (2.34) dan (2.35) dapat digabung menjadi:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\frac{2\pi d}{L} \quad (2.36)$$



Persamaan (2.34) dan (2.36) dapat pula digabung untuk mendapatkan persamaan panjang gelombang:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.37)$$

Di air dalam nilai $\tanh(2\pi d/L)$ mendekati 1 sehingga rumus (2.37) menjadi:

$$L_o = 1,56T^2 \quad (2.38)$$

Rumus (2.38) ini sangat penting dalam pemodelan fisik karena T dapat diganti dengan L sehingga mengurangi dimensi waktu dalam analisa dimensi. L_o adalah panjang gelombang di air dalam.

Selanjutnya, dengan memasukkan nilai Φ persamaan (2.33) ke dalam persamaan (2.32) akan didapat persamaan fluktuasi muka air yang periodik terhadap x dan t, yang merupakan gelombang sinusoidal dan progressif yang menjalar dalam arah x positif sbb:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.39)$$

Dan bila nilai Φ dari persamaan (2.33) dimasukkan ke dalam persamaan dasar $u = \partial\Phi / \partial x$ dan $w = \partial\Phi / \partial z$ akan diperoleh:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \right] \\ &= \left[\frac{agk}{\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \right] \\ &= \frac{ag2\pi/L}{2\pi/T} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \end{aligned}$$



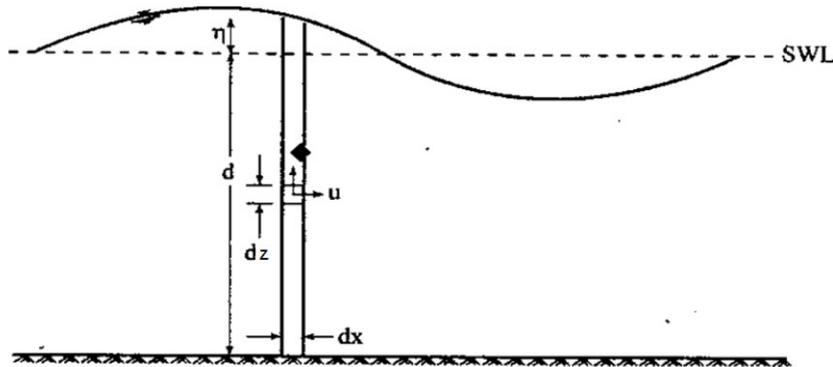
$$= \frac{ag \cosh k(d+z)}{c \cosh kd} \cos(kx - \sigma t)$$

substitusi persamaan (2.36) maka akan diperoleh:

$$u = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.40)$$

Dengan cara yang sama seperti di atas komponen kecepatan vertikal partikel diperoleh:

$$w = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.41)$$



Gambar 2.36. Variabel-variabel dalam penurunan rumus energi gelombang (Triatmojo, Gambar 2.9)

Selanjutnya untuk menurunkan persamaan energi gelombang, dipandang suatu elemen berukuran dx , dz , dengan pias 1 seperti pada Gambar (2.36). Untuk satu elemen kecil tersebut, besar energi kinetik adalah:

$$dE_k = \frac{1}{2} dm V^2 = \frac{1}{2} \rho dx dz (u^2 + v^2)$$



Energi kinetik total adalah integrasi dari persamaan di atas:

$$E_k = \int_0^L \int_{-d}^0 \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dz dx$$

Apabila persamaan (2.40) dan (2.41) disubsitusikan ke dalam persamaan di atas, akhirnya akan didapat:

$$E_k = \frac{\rho}{2} \int_0^L \int_{-d}^0 \left\{ \left[\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \right]^2 + \left[\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \right]^2 \right\} dz dx$$

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.42)$$

Apabila energi potensial dari gelombang dikurangi dengan energi potensial dari massa air diam seperti yang ditunjukkan dalam Gambar (2.36), akan didapat energi potensial yang disebabkan oleh gerak gelombang. Dengan menggunakan dasar laut sebagai bidang referensi, energi potensial yang ditimbulkan oleh satu panjang gelombang tiap satu satuan lebar puncak gelombang E_p adalah:

$$E_p = \int_0^L \rho g (d + \eta) \left(\frac{d + \eta}{2} \right) dx - \rho g L d \left(\frac{d}{2} \right)$$

Substitusi persamaan (2.39) ke dalam persamaan di atas, akhirnya akan didapat:

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.43)$$



Jadi energi kinetik dan energi potensial adalah sama, sehingga energi total tiap satu satuan lebar per satu panjang gelombang adalah:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (2.44)$$

Energi gelombang berubah dari satu titik ke titik lain sepanjang satu panjang gelombang, dan energi rerata per satu satuan luas adalah:

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.45)$$

Rumus (2.45) ini selalu dipakai dalam menghitung energi gelombang di laboratorium sekalipun gelombang tidak dalam keadaan linier.

3. Stoke's second order wave theory

Rumus-rumus gelombang yang disajikan pada subbab di atas tentang teori gelombang linier didasarkan atas asumsi bahwa gerakan adalah begitu kecil sehingga permukaan bebas dapat dinyatakan dalam pendekatan orde pertama sebagai:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) = \frac{H}{2} \cos(\theta) = a \cos(\theta)$$

Untuk orde-orde yang lebih tinggi, ekspresi yang umum adalah sebagai berikut:

$$\eta = a \cos(\theta) + a^2 B_2(L, d) \cos(2\theta) + a^3 B_3(L, d) \cos(3\theta) + \dots + a^n B_n(L, d) \cos(n\theta) \quad (2.46)$$



dimana $a = H/2$ untuk orde pertama (linier) dan orde kedua, sedang $a < H/2$ untuk orde-orde yang lebih tinggi. B^2 , B^3 dan seterusnya adalah fungsi-fungsi yang spesifik dari panjang gelombang L dan kedalaman d .

Teori gelombang linier hanya menggunakan suku pertama dari ruas kanan pada Rumus (2.46), sedang *Stoke's second order* menggunakan suku pertama dan kedua. Demikian seterusnya, semakin tinggi orde suatu teori yang dipilih maka semakin banyak suku dari ruas kanan yang dipakai.

Persamaan tinggi permukaan air bebas pada gelombang orde kedua untuk air dalam menjadi:

$$\eta = \frac{H_0}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_0} - \frac{2\pi t}{T}\right) + \frac{\pi H_0^2}{4L_0} \cos\left(\frac{4\pi x}{L_0} - \frac{4\pi t}{T}\right) \quad (2.47)$$

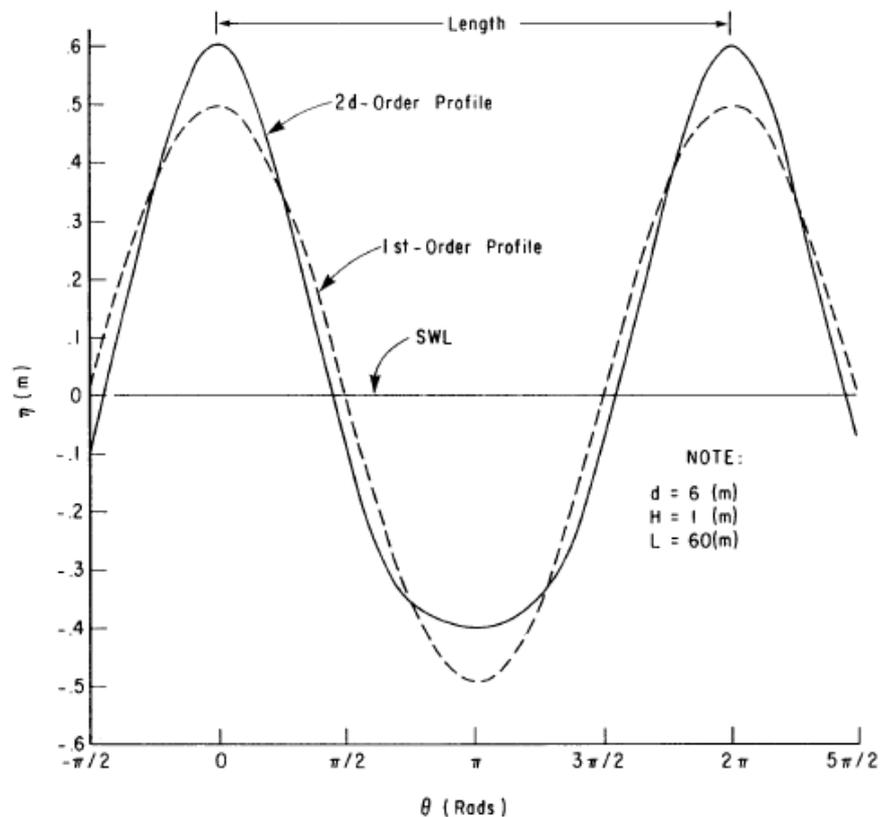
Sedang untuk kecepatan gelombang C dan panjang gelombang L tetap sama dengan teori gelombang linier (Rumus 2.34 s/d 2.38). Energi gelombang juga lazim tetap menggunakan rumus dari gelombang linier karena perbedaan tinggi muka air bebas tidak terlalu signifikan, sebagaimana diuraikan berikut ini.

Gambar (2.37) memperlihatkan perbandingan antara profil gelombang linier yang dihitung berdasarkan Rumus (2.39) dengan profil orde kedua dari Stoke yang dihitung dengan Rumus (2.47) sebagai fungsi dari sudut fase θ . Nampak bahwa profil orde kedua lebih tinggi puncaknya dan lebih datar lembahnya dari pada orde pertama. Puncak orde kedua dari

an air tenang (SWL) berada pada lebih dari setengah tinggi
ng, sebaliknya lembahnya kurang dari setengah; sedang pada
tama tinggi puncak dan lembah adalah sama terhadap SWL yaitu



setengah tinggi gelombang. Konsekuensinya, tinggi gelombang keduanya kurang lebih sama saja sehingga energinya juga relatif sama karena energi gelombang dihitung dari tingginya. Sedangkan periode gelombang T keduanya persis sama.



Gambar 2.37. Perbandingan profil gelombang linier dan orde kedua dari Stoke (USACE 1984, Fig 2-8)

Hany Ahmed (2011) dalam dissertasinya "*Wave Interaction with Vertical Slotted Walls as a Permeable Breakwater*" melakukan studi

perbandingan efektifitas pemecah gelombang dinding vertikal tunggal dan ganda dengan *linier wave theory* dan *Stoke's second order theory* dengan



metode numerik serta memverifikasinya dengan percobaan laboratorium untuk gelombang linier. Ahmed menggunakan metode numerik berdasarkan *Eigen function expansion technique* dengan persamaan potential kecepatan untuk *Stoke's second order theory* sebagai berikut:

$$\Phi(x, z, t) = -iR_e \left[\frac{gh_i}{2\omega} \phi(x, z) \frac{1}{\cosh kd} e^{-i\omega t} + \frac{3\pi h_i}{8kT} \left(\frac{\pi h_i}{L} \right) \phi_n(x, z) \frac{1}{\sinh^4(kd)} e^{-2i\omega t} \right] \quad (2.48)$$

dimana suku pertama dari ruas kanan adalah sama dengan Rumus (2.24) untuk teori gelombang linier.

Salah satu hasil penting dari studi Ahmed diperlihatkan pada Gambar (2.38). Analisis numerik untuk dinding vertikal tunggal dilakukan dengan teori gelombang linier dan non-linier orde kedua untuk tinggi lubang dinding $d_m = 0,2$ dan $0,6$ kali kedalaman air tenang (SWL) di depan dinding d . Hasil perhitungan (*Predicted*) kemudian dibandingkan dengan hasil percobaan di *wave flume* dengan gelombang linier (*Experiment*). Efektifitas pemecah gelombang diukur dalam koefisien refleksi C_R , koefisien transmisi C_T , dan koefisien kehilangan energi C_E . Jadi untuk setiap koefisien ada enam grafik yang ditampilkan.

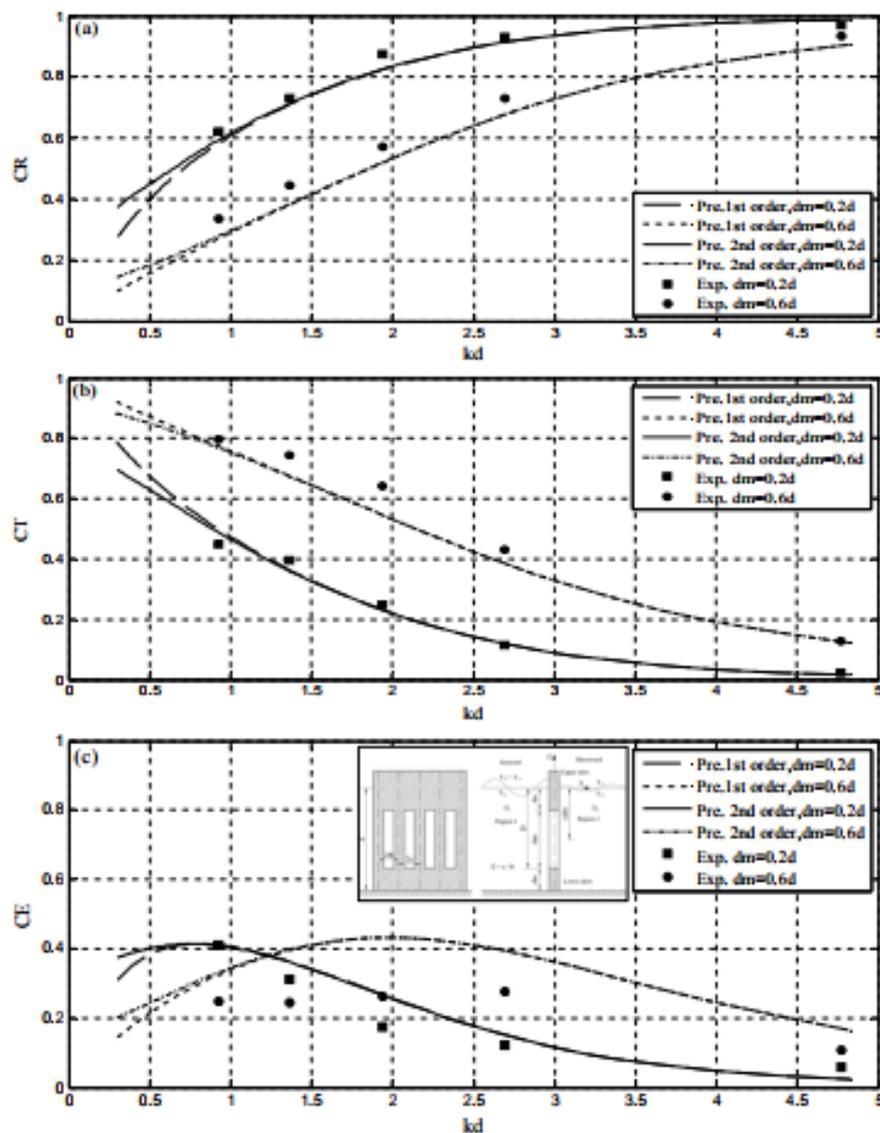
Tetapi pada gambar nampak bahwa hasil-hasil analisis numerik (Pre.) untuk orde pertama dan orde kedua selalu berimpit saja; hanya pada bahagian ujung kiri, sekitar $kd = 0,5$ ($=2\pi d/L$) yang menunjukkan air

ujung grafik-grafik itu sedikit terpisah. Hal ini sekali lagi

menunjukkan bahwa perbedaan antara teori linier dan orde kedua dapat



diabaikan. Sedang hasil-hasil dari percobaan laboratorium (Exp.) cukup dekat dengan prediksi secara analitik. Simbol-simbol lain yang terdapat dalam Gambar (2.38) adalah porositas ε , koefisien geseran f , dan *added mass coefficient* cm .



Gambar 2.38. Perbandingan hasil analisis numerik gelombang linier dan gelombang orde kedua serta hasil experimen dengan gelombang linier pada dinding berlubang dengan $\varepsilon=0,5$, $f=2$, $cm=0$ (Ahmed 2011, Fig 5.18)



4. Intisari

Subbab ini telah menguraikan bahwa *small amplitude wave theory* atau *linier wave theory* atau *Airy theory* masih tetap yang terpopuler dalam studi-studi teknik pantai di air dalam, baik dalam metode numerik terlebih lagi percobaan di laboratorium. Meskipun demikian subbab ini masih mencakup *Stoke's second order wave theory* karena wilayah dari studi ini, yaitu pantai Makassar sebagai representatif dari perairan sebelah dalam Indonesia, mempunyai karakteristik periode dan tinggi gelombang yang kemungkinan besar masuk dalam daerah orde kedua tersebut.

Tujuan mengemukakan teori-teori gelombang yang sebenarnya sudah klasik itu adalah untuk mendapatkan variabel-variabel gelombang, sebagai salah satu kelompok disamping variabel-variabel struktur, yang menentukan jalannya pemodelan fisik di laboratorium. Selain itu, juga untuk menentukan hubungan antar variabel sehingga tidak ada variabel yang saling bergantung (*inclusive*) serta kalau mungkin menyederhanakan jumlah dimensi dalam analisa dimensi. Contoh, rumusan panjang gelombang di air dalam $L_o = 1,56T^2$ dapat dipergunakan untuk mengganti T dengan L sehingga jumlah dimensi dalam analisa dimensi berkurang satu yaitu dimensi waktu. Demikian pula rumusan $C = L / T$, di air dalam disederhanakan menjadi $C_o = 1,56T$ sehingga variabel C tidak kelihatan lagi dalam percobaan di laboratorium.

Subbab ini menunjukkan bahwa variabel-variabel gelombang yang digunakan dalam pemodelan fisik, yaitu kecepatan gelombang C , panjang



gelombang L , periode T tetap sama dalam teori linier maupun orde kedua; bahkan tinggi gelombang H pun relatif tetap sama karena tinggi puncak gelombang orde kedua lebih tinggi tetapi lembahnya kurang dibandingkan pada gelombang linier. Hasil-hasil analisa numerik mengenai efektifitas pemecah gelombang dinding vertikal pada daerah air dalam dengan memakai teori gelombang orde kedua tidak berbeda dengan teori gelombang linier.



E. Kerangka Konseptual, Teori Model, Analisa Dimensi dan Reynold Number

1. Pemodelan Fisik

Penelitian dengan pemodelan fisik (*physical modelling*) adalah kombinasi model mekanistik (*mechanistic model*) dan model empiris (*empirical model*). Termasuk model mekanistik karena, seperti halnya model numerik, ada proses deduksi yang jelas yaitu penjabaran dari teori-teori yang sudah diterima secara umum untuk mendapatkan parameter atau variabel yang berpengaruh atas suatu proses.

Selanjutnya pemodelan fisik dalam teknik pantai menggunakan prinsip keserupaan dinamis dari mekanika fluida untuk meniru prototipe ke dalam model di laboratorium sehingga karakteristik-karakteristik prototipe baik geometris maupun kinematis bahkan dinamis akan terskalakan dengan seimbang. Untuk itu pemodelan harus tunduk pada kesamaan bilangan Froude (*Froude Number*) pada prototipe dan model sebagai konsekwensi dari dominannya gaya-gaya inersia/gravitasi dalam seluruh proses yang dinamis itu; ini berlawanan dengan suatu proses yang didominasi oleh gaya-gaya kekentalan (*viscosity*) dimana kesamaan bilangan Reynold (*Reynold Number*) menjadi prasyarat. Bilangan Reynold adalah perbandingan antara gaya-gaya inersia dan gaya-gaya kekentalan, sehingga pada bilangan Reinold yang tinggi gaya-gaya inersia yang

, sebaliknya pada bilangan Reinold yang rendah kekuatan



kekentalan lebih berpengaruh. Topik ini akan ditinjau lebih detail pada anak subbab berikutnya.

Prinsip berikutnya yang membuat pemodelan fisik dalam teknik pantai termasuk *mechanistic model* adalah penggunaan prosedur Analisa Dimensi (*Dimensional Analysis*). Prosedur ini dinyatakan oleh E. Buckingham (*dalam* Langhaar, 1951, 18) sebagai berikut: *“If an equation is dimensionally homogeneous, it can be reduced to a relationship among a complete set of dimensionless products”*. Dengan Analisa Dimensi jumlah variabel dikurangi dan hubungan antar variabel berlaku dalam sistim dimensi apapun asal konsisten karena variabel-variabel *“products”* tidak lagi mempunyai dimensi. Misalkan suatu hubungan antar variabel dapat dinyatakan dalam fungsi $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$, maka dapat dibuat fungsi produk dari variabel-variabel x_1 sampai x_n dalam bentuk $\Pi_1 = g(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_m)$ dimana Π_1 sampai dengan Π_m tidak berdimensi yang merupakan hasil perkalian dari x_1 sampai x_n . Besarnya nilai m umumnya adalah n dikurangi jumlah dimensi yang terlibat.

Hal yang membuat pemodelan fisik termasuk model empiris adalah karena hubungan antara variabel dari $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$ tidak diperoleh secara mekanis (matematis), melainkan melalui eksperimen. Nilai-nilai x_i diukur dalam percobaan-percobaan, kemudian nilai-nilai gabungannya dalam Π_i dihitung dan dibuatkan hubungan berupa grafik-grafik regressi

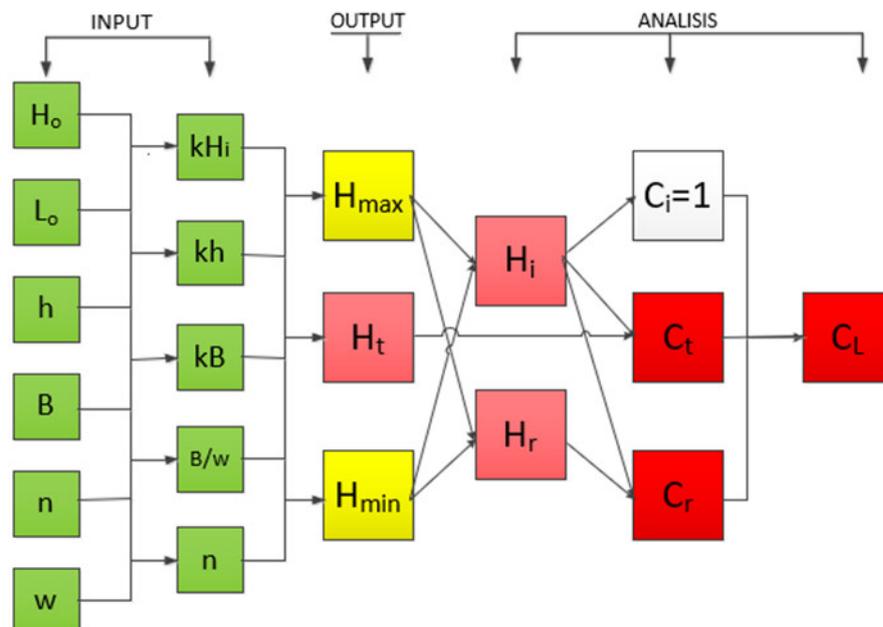
di kuat hubungannya dengan index korelasi. Jadi seperti kata Hery and Runger (2014): *“..... it uses our engineering and scientific*



knowledge of the phenomenon, but it is not directly developed from our theoretical or first-principles understanding of the underlying mechanism“.

2. Paradigma Penelitian

Paradigma penelitian adalah hubungan konsep-konsep dan variabel-variabel yang akan diteliti. Tujuannya ialah agar arah penelitian dan peran setiap variabel dapat terlihat jelas untuk memudahkan analisis guna menjawab rumusan masalah. Gambar 2.39 menunjukkan paradigma dan variabel-variabel yang terlibat dalam penelitian ini.



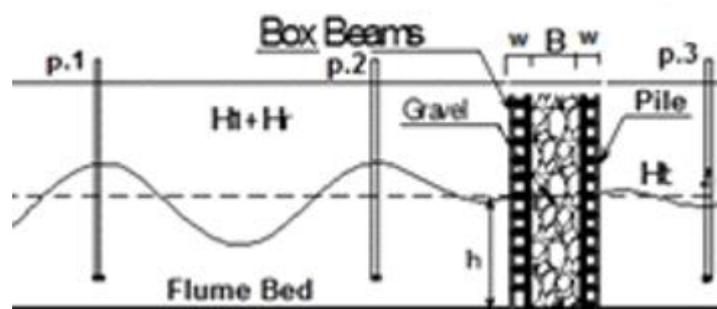
Gambar 2.39. Paradigma penelitian (hubungan antar variabel)

Kotak-kotak warna hijau pada kolom pertama adalah parameter-parameter dari gelombang dan dari struktur yang diperkirakan mempengaruhi fenomena yang akan diselidiki yaitu efektifitas pemecahan tipe ini. Parameter dari gelombang adalah C , H , L , T tetapi



karena pemecah gelombang terletak di air dalam ($h/L > \frac{1}{2}$) maka C dan T dapat dinyatakan dalam L sebagaimana yang telah diuraikan dalam subbab sebelumnya. Jadi tinggalah H_o dan L_o yang menjadi variabel dalam eksperimen.

Parameter-parameter struktur yang mempengaruhi efektifitas sistem ini adalah kedalaman air h , lebar gundukan batu B , lebar balok-kotak w , serta porositas batu n (Gambar 2.40). Parameter-parameter ini dipilih secara rasional dan berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu. Parameter n adalah satu-satunya variabel yang menunjukkan karakteristik batu, tidak berdimensi.



Gambar 2.40. Parameter-parameter pada model

Kotak-kotak berwarna hijau pada kolom kedua adalah hasil penyederhaan dengan analisa dimensi. Setelah itu eksperimen dijalankan, tentu saja didahului dengan testing dan kalibrasi. Semua parameter gelombang dan struktur yang bersifat variabel dimasukkan dalam ratusan an yang dijalankan. *Outputnya* adalah H_{max} dan H_{min} , kotak a kuning yang maksudnya hasil ini belum langsung dapat dipakai,



perlu analisis lebih lanjut; output ketiga adalah H_t , kotak berwarna merah muda sudah dapat langsung dipakai untuk menghitung $C_t = H_t/H_i$.

Output H_{max} dan H_{min} dipergunakan untuk menghitung H_i dan H_r yang akan memberikan $C_r = H_r/H_i$, sedang $C_i = H_i/H_i = 1$ dengan sendirinya. Akhirnya C_L dihitung dari prinsip kekekalan energi $C_L = 1 - C_t^2 - C_r^2$. Ketiga rasio tinggi gelombang itu, C_L , C_t , dan C_r , diberi warna merah tua sebagai tanda tujuan akhir ukuran efektifitas pemecah gelombang.

3. Teori Model dan keserupaan Froude

Teori Model atau keserupaan adalah alat utama untuk menjamin bahwa apa pun yang terjadi pada model akan terjadi dalam keadaan yang sebanding pada prototipe. Dalam pemodelan bangunan-bangunan pantai dituntut pemenuhan *Dynamic Similarity* yaitu keserupaan yang tertinggi, artinya baik ukuran panjang maupun ukuran gerak dan kinematik semuanya sebanding dalam model dan protoipe, walaupun harus diingat bahwa keserupaan yang sempurna tidak mungkin dicapai kecuali besarnya model sama dengan prototipe.

Untuk memenuhi *Dynamic Similarity* disyaratkan bahwa di dalam model, sebagaimana pada prototype, tetap terjadi aliran air yang kendalikan oleh gaya-gaya gravitasi dan inersia. Untuk itu *Reynold Number* harus tinggi. Para peneliti di dunia, misalnya Van der Meer (1988), pada umumnya memakai syarat $Re > 10^4$. Bila persyaratan *gravity flow* sudah terpenuhi,

untuk keserupaan dinamis dapat menggunakan bilangan Froude (*Froude Number*) sebagai pedoman dimana bilangan Froude pada model



harus selalu sama dengan bilangan Froude pada prototype pada setiap karakteristik yang akan diteliti.

Bilangan Froude mempunyai bentuk:

$$F = \frac{V}{\sqrt{Lg}} \quad (2.49)$$

dimana F tidak berdimensi, V adalah kecepatan zat cair (m/det), L adalah panjang karakteristik misalnya kedalaman (m), dan g adalah percepatan gravitasi (m/det²).

Agar model dan prototype serupa, maka bilangan Froude pada prototipe harus sama dengan pada model:

$$F_p = F_m \quad (2.50)$$

$$\frac{V_p}{\sqrt{L_p g}} = \frac{V_m}{\sqrt{L_m g}}$$

Kuadratkan dan diolah menjadi:

$$\frac{V_p^2}{V_m^2} = \frac{L_p}{L_m}$$

Anggaplah dipakai skala panjang:

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (2.51)$$

Maka skala kecepatan:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} = \sqrt{\lambda} \quad (2.52)$$



Skala waktu:

$$\frac{T_p}{T_m} = \frac{L_p/V_p}{L_m/V_m} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda} \quad (2.53)$$

Skala gaya, dimana bahan pada prototipe sama dengan pada model:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p L_p^3}{\gamma_m L_m^3} = \lambda^3 \quad (2.54)$$

Skala percepatan:

$$\frac{A_p}{A_m} = \frac{g_p}{g_m} = 1 \quad (2.55)$$

Dan seterusnya sesuai besaran yang dibutuhkan.

4. Analisa dimensi

Tahap berikutnya adalah analisa dimensi. Proses ini bertujuan menyederhanakan jumlah variabel dan hubungan yang harus diteliti. Ada beberapa metode yang dapat dipakai dalam hal ini, yang paling populer adalah *Buckingham's Π Theorem* yang mengatakan (Gerhart and Gross 1985, 352-368):

If it is known that a physical process is governed by a dimensionally homogeneous relation involving n dimensional parameters, such as $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$ where the x 's are dimensional variables, there exists an equivalent relation involving a smaller number, $(n-k)$, of dimensionless parameters, such as $\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-k})$ where the Π 's are dimensionless groups constructed from the x 's. The reduction, k , is usually equal to, but never more than, the number of fundamental dimensions involved in the x 's.

Dengan analisa dimensi diperoleh keuntungan-keuntungan yang memudahkan dalam eksperimen, sebagai berikut:



- (1) Mengurangi secara nyata jumlah percobaan yang harus dilakukan.
- (2) Efek dari suatu variabel dapat ditentukan dengan variasi variabel yang lain dalam satu percobaan.
- (3) Wilayah berlakunya suatu variabel dapat diperluas melampaui wilayah percobaan. Dalam keadaan ekstrim wilayah berlaku ini dapat diperoleh dengan hanya mengukur satu nilai dari masing-masing variabel.
- (4) Dapat menunjukkan bahwa kadang-kadang suatu besaran tidak punya pengaruh atas fenomena yang sedang diselidiki sehingga dapat dikeluarkan sebagai variabel percobaan.
- (5) Kealpaan suatu variabel independent dalam perencanaan suatu percobaan dapat diketahui.
- (6) Memungkinkan penggunaan "Skala Model" yang sangat berguna untuk memperkecil atau memperbesar ukuran dari sistem yang sebenarnya.

Variabel-variabel yang akan terlibat dalam analisa dimensi pertama-tama diambil dari rumus-rumus yang telah diturunkan secara teoritis seperti rumus-rumus gelombang di atas, ditambah dengan variabel-variabel struktur/lapangan yang secara rasional dan menurut penelitian-penelitian terdahulu berpengaruh. Dalam studi ini variabel-variabel itu adalah:



$H_i, L, h, B, w, n, H_t, \text{ dan } H_r.$

H_i dan L adalah berasal dari H_o dan L_o , gelombang-gelombang rencana dari air dalam pada prototipe, tetapi pada model disebut saja H_i dan L karena banyaknya variasi percobaan dan pengaruh sistem.

Karena hanya ada satu dimensi yang terlibat dalam semua variabel di atas yaitu dimensi panjang, maka variabel L dipilih sebagai pembagi untuk menghilangkan semua dimensi. Kemudian semua variabel dikalikan dengan 2π untuk menggunakan angka gelombang $k = 2\pi/L$. Karena tujuan penelitian adalah mengetahui variasi H_t dan H_r dalam bentuk $C_t = H_t/H_i$ dan $C_r = H_r/H_i$, maka dua produk yang diperoleh tadi dibagi dengan produk H_i sebagai berikut:

$$\frac{2\pi H_t/L}{2\pi H_i/L} = \frac{H_t}{H_i} = C_t$$

dan

$$\frac{2\pi H_r/L}{2\pi H_i/L} = \frac{H_r}{H_i} = C_r$$

Parameter n adalah variabel tak berdimensi sehingga tidak perlu lagi dimanipulasi untuk mendapatkan produk tak berdimensi. Parameter w adalah parameter berdimensi yang tidak berubah-ubah (hanya satu ukuran), maka untuk mendapatkan pengaruh variasinya kB dibagikan dengan kw sehingga diperoleh parameter tak berdimensi B/w , dengan

... dalam grafik-grafik nanti sebanyak mungkin variabel dapat ... kan bersamaan untuk melihat saling pengaruhnya.



Jadi akhirnya diperoleh produk tak berdimensi:

$$kH_i, kh, kB, B/w, n, C_t, C_r$$

C_L diperoleh dari analisis dengan Rumus (2.27b). Untuk presentasi grafik kelak, produk-produk tak berdimensi itu dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C_t, C_r, C_L = f(kH_i, kh, kB, B/w, n) \quad (2.56)$$

5. Reynold Number

Pemodelan fisik (*physical model*) dalam bidang teknik pantai dilakukan dalam keserupaan dinamis (*dynamic similitude*) agar dapat meng-skala-kan dalam model semua aspek dari prototipe yaitu geometris, kinematis, dan dinamis. Untuk itu kesamaan Froude Number pada prototipe dan model menjadi prasyarat. Kesamaan Froude Number artinya kesamaan dalam model dan prototipe bahwa kekuatan-kekuatan inersia (seperti kecepatan dsb.) jauh lebih berpengaruh dari pada kekuatan-kekuatan kekentalan (*viscosity*) sehingga yang terakhir ini dapat diabaikan. Agar kesamaan Froude Number itu benar-benar menghasilkan parameter-parameter sesuai skala, Reynold Number dari mekanisme fisik dalam model harus berada dalam kriteria tertentu, kalau tidak maka akan terjadi apa yang disebut *scale effect*, yaitu gaya-gaya kekentalan turut mempengaruhi hasil percobaan.

Reynold Number adalah bilangan tak berdimensi yang dipakai untuk lkan perbandingan (rasio) antara kekuatan-kekuatan inersia kekuatan-kekuatan kekentalan dari suatu zat cair yang mengalir



menurut hubungan $R_e = \rho V l / \mu$, dimana ρ adalah rapat massa zat cair bersangkutan, V adalah kecepatan zat cair, l adalah panjang karakteristik dari media pengaliran (mis. kedalaman air) dan μ adalah kekentalan zat cair. Fakta-fakta eksperimental menunjukkan bahwa jika R_e “rendah” aliran akan laminar, sedang bila “tinggi” akan turbulen. Kecerupaan Froude meniadakan pengaruh-pengaruh kekentalan artinya pengaliran harus dalam keadaan turbulen. Namun berapa batas R_e untuk laminar dan berapa untuk turbulen sangat bergantung kepada karakter media tempat pengaliran, apakah pipa, saluran terbuka atau lautan bebas, harus ditentukan berdasarkan eksperimen-eksperimen. Secara umum Gerhart and Gross (1985, 167) mengatakan $R_e < \pm 10^3$ adalah “rendah” sedang $R_e > \pm 10^4$ adalah “tinggi”.

Berbagai peneliti (Dai and Kamel 1969; Thomsen et al 1972; Broderick and Ahrens 1982; Jensen and Klinting 1983; Sorensen and Jensen 1985; Burcharth and Frigaard 1987) dalam Meer (1988, 41) menyatakan nilai terendah dimana tidak nampak *scale effects* dalam eksperimen adalah $1 \times 10^4 - 4 \times 10^4$. Lebih lanjut Hijum and Pilarczyk (1982) menemukan bahwa tidak ada *scale effects* pada eksperimen-eksperimen skala kecil apabila $D_{90} > 4 - 6$ mm dalam model, dimana D_{90} menyatakan diameter terbesar dari 90% agregat. Agregat dalam prototipe yang bila di-model-skala-kan menghasilkan diameter yang lebih kecil dari 4 mm pasti

pengaruhi *scale effects*; dalam hal demikian laboratorium skala
butuhkan. Pedoman-pedoman di atas dipakai dalam penentuan



ukuran agregat dalam penelitian ini, sebagaimana akan dibahas lebih detail dalam Bab III.

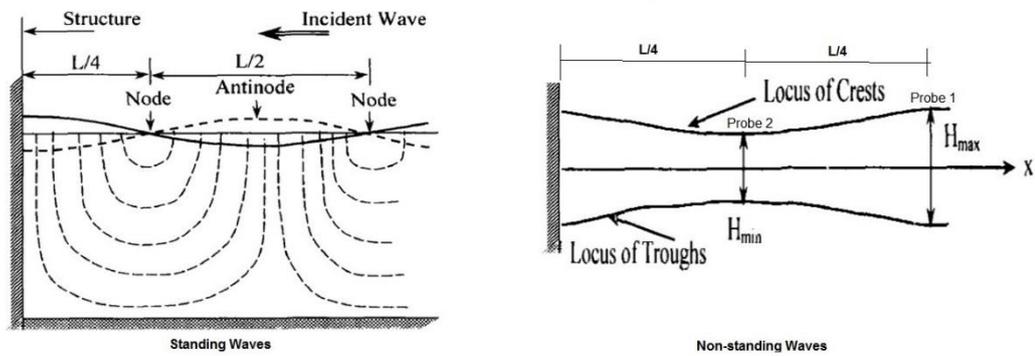
6. Pengukuran H_{max} dan H_{min} untuk perhitungan H_i dan H_r

Tiga buah alat pengukur gelombang (*wave probe*) dipakai dalam eksperimen ini, dua ditempatkan di depan model (probe 1 dan probe 2) dan satu di belakang (probe 3). Yang dua di depan model berturut-turut diposisikan pada titik-titik *antinode* dan *node* (Gambar 2.41) dari *envelope* gelombang refleksi untuk mengukur H_{max} dan H_{min} yang dipakai untuk menghitung tinggi gelombang datang (H_i) dan tinggi gelombang refleksi (H_r) menurut Rumus (2.57) dan (2.58). Lokasi titik-titik *node* ini ada dua pendapat; pendapat yang konvensional mengatakan pada $0,25L$ dan $0,5L$ dari depan model dimana L adalah panjang gelombang (Kamphuis 2011, 47), sedang pendapat lain menyatakan pada $0,2L$ dan $0,7L$ menurut Goda dan Suzuki dalam (Rageh and Koraim 2009). Kedua pendapat tersebut sangat diperhatikan dalam percobaan ini dan tampaknya posisi *node* dan *antinode* memang berubah-ubah terutama oleh perubahan periode gelombang. Alat pengukur gelombang yang ketiga (probe 3) ditempatkan $1,2$ m di belakang model agar pengaruh-pengaruh turbulensi *vortex* air yang baru keluar dari model dapat dihindari; alat ini untuk mengukur langsung tinggi gelombang transmisi (H_t).

$$H_i = \frac{H_{max} + H_{min}}{2} \quad (2.57)$$

$$H_r = \frac{H_{max} - H_{min}}{2} \quad (2.58)$$





Gambar 2.41. Lokasi probe 1 dan 2 untuk pengukuran H_{\max} dan H_{\min}
(Kamphuis 2011, Fig 2.13 dan 2.14)

