

DISERTASI

**PENGARUH DEFORMASI GELOMBANG TERHADAP  
DEBIT OVERTOPPING PADA OVERTOPPING WAVE  
ENERGY CONVERTER (OWEC)-BREAKWATER**

***THE EFFECT OF WAVE DEFORMATION ON  
OVERTOPPING DISCHARGE ON WAVE ENERGY  
CONVERTER (OWEC)-BREAKWATER***

**A.ILDHA DWI PUSPITA**

**P0800315009**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2020**

LEMBAR PENGESAHAN  
UJIAN TERBUKA (PROMOSI)

PENGARUH DEFORMASI GELOMBANG TERHADAP DEBIT OVERTOPPING  
PADA OVERTOPPING WAVE ENERGY CONVERTER (OWEC)-BREAKWATER

THE EFFECT OF WAVE DEFORMATION ON OVERTOPPING DISCHARGE IN WAVE  
ENERGY CONVERTER (OWEC)-BREAKWATER

Disusun dan diajukan oleh:

A.ILDHA DWI PUSPITA  
P0800315009

Telah memenuhi syarat untuk melakukan ujian promosi pada .....



Menyetujui,  
Komisi Penasihat,

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

Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT.  
Co-promotor

Dr. Eng. Ir. H. Farouk Maricar, MT.  
Co-promotor

Mengetahui,

KETUA PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL

Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M. Si., M. Eng. Sc., Pd. D

## **PRAKATA**

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT, atas berkat dan hidayah-Nya sehingga kami dapat menyusun dan menyelesaikan disertasi ini, yang merupakan persyaratan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan studi pasca sarjana Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Disertasi ini tidak sebatas kami selesaikan untuk bisa mendapatkan gelar doktor teknik tapi lebih jauh daripada itu kami melihat adanya potensi besar yang dimiliki oleh gelombang yang disediakan oleh alam untuk menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan. Disertasi ini bermaksud menyampaikan bahwa pelindung pantai yang ada saat ini akan menjadi lebih baik lagi apabila juga mampu mempunyai fungsi lain yaitu juga sebagai penangkap energi gelombang.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan disertasi ini. Berkat bantuan berbagai pihak maka disertasi ini dapat diselesaikan penulis. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M. Eng sebagai ketua komisi penasihat dan Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT serta Dr.Eng Ir. H. Farouk Maricar, MT sebagai anggota komisi penasihat atas bantuan dan bimbingannya yang telah diberikan mulai dari pemilihan minat, penelitian sampai dengan penulisan disertasi ini. Juga kepada Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge,

ST., M.Eng; Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, MT; Dr.Eng. Mukhsan Putra Hatta, ST., MT ; dan Dr. Chairul Paotonan, ST., MT sebagai tim penguji dan Prof. Ir. Nizam, M.Sc., DIC. PhD, IPM, ASEAN Eng sebagai penguji eksternal, yang telah memberikan ilmu dan arahan-arahan yang membangun untuk sempurnanya disertasi ini. Juga kepada senior-senior bidang keairan yang telah lebih dulu menyelesaikan studinya yang telah memberikan inspirasi terhadap format-format penulisan disertasi ini.

Teristimewa ungkapan cinta tak terkira saya kepada kedua orang tua saya yang sungguh sangat luar biasa, Ibunda saya yang tercinta Nurhana Nasir dan Ayahanda saya yang tercinta A. Muh. Arsyad Thaha, serta kepada suami dan anak saya tercinta yang sungguh sangat luar biasa, suami saya tercinta A. Muhammad Yusuf Taufiq dan anak saya tercinta A. Ayra Aulia Yusuf, atas segala hal tak terkira, segala dukungan moril dan materil, bimbingan, kesabaran serta kasih sayang yang telah diberikan kepada saya selama masa studi saya sehingga saya bisa menyelesaikan studi saya ini, semoga ke-empatnya senantiasa diberikan kesehatan dan umur yang panjang oleh Allah SWT amin. Terima kasih juga untuk saudara saya tercinta A. Nur Ftirianti dan Muh. Takbir Habbie; A. Reza Adipurba dan A. Ayu Andini yang juga telah memberikan segala dukungan moril serta kasih sayangnya selama menjalani studi saya. Juga kepada seluruh keluarga besar saya yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu. Juga untuk teman-teman seperjuangan saya angkatan 2015, sahabat saya, yang telah

memberikan dorongan moril, dan adik-adik mahasiswa terkhusus Ika Nur Aidina J dan Mukhlis Ibrahim yang telah membantu dalam penelitian saya. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada mereka yang namanya tidak bisa kami sebut satu persatu atas bantuannya selama ini.

Mudah-mudahan disertasi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan peneliti setelahnya. Mengingat berbagai keterbatasan dan kendala yang ada, kami sadar bahwa dalam disertasi ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu, kami mengharapkan saran dan kritik yang menuju ke arah perbaikan. Wassalam.

Makassar, Mei 2020

A.Ildha Dwi Puspita

## ABSTRAK

**A.ILDHA DWI PUSPITA.** *Pengaruh Deformasi Gelombang terhadap Debit Overtopping pada Overtopping Wave Energy Converter (OWEC)-Breakwater* (dibimbing oleh Muhammad Saleh Pallu, Muhammad Arsyad Thaha, dan Farouk Maricar)

Penelitian ini bertujuan: (1) mempelajari dan menganalisis interaksi parameter hidrolis, geometrik struktur dan parameter reflektif untuk mendapatkan hubungan pengaruh deformasi gelombang khususnya refleksi gelombang dan breaker parameter terhadap run-up dan debit overtopping pada OWEC-breakwater; (2) menemukan bentuk geometrik lereng OWEC-breakwater yang dapat menghasilkan run-up dan debit overtopping yang maksimum; dan (3) mendapatkan formula hubungan tak berdimensi yang menunjukkan pengaruh variabel hidrolis, variabel reflektif dan geometrik struktur terhadap run-up gelombang dan sekaligus pengaruh run-up relatif terhadap debit overtopping untuk digunakan sebagai pendekatan disain breakwater menjadi OWEC-breakwater. Penelitian ini menggunakan studi eksperimental dengan melakukan simulasi model fisik pada saluran gelombang dua dimensi di laboratorium. OWEC-breakwater merupakan model *breakwater* yang dimodifikasi dengan melengkapi reservoir pada puncaknya untuk keperluan memutar turbin. Inovasi model dibuat dengan lereng ganda yang dilakukan variasi pada sudut lereng bagian bawah atau *sub-slope*, yakni  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $105^\circ$ . Tinggi *sub-slope* relatif terhadap kedalaman air ( $s/d$ ) divariasikan dengan nilai  $s/d=1$ ,  $s/d=0.882$  dan  $s/d=0.789$  untuk melihat pengaruhnya terhadap tinggi *run-up* dan *overtopping* gelombang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *run-up* dan *overtopping* gelombang maksimum diperoleh pada nilai  $s/d=1$  atau elevasi muka air sama dengan elevasi puncak *sub-slope*. Run-up dan overtopping gelombang maksimum juga diperoleh pada model dengan *sub-slope* tegak atau model  $90^\circ$ . Pada bagian akhir penelitian ini telah ditemukan rumus empiris *run-up* dan *overtopping* gelombang yang dikembangkan dari kedua kondisi maksimum tersebut.

Kata Kunci: *overtopping wave energy converter-breakwater*, deformasi, *run-up*, *overtopping*

## ABSTRACT

**A.ILDHA DWI PUSPITA.** *Effects of Wave Deformation on Overtopping Discharge on Overtopping Wave Energy Converter (OWEC)-Breakwater (Supervised by Muhammad Saleh Pallu, Muhammad Arsyad Thaha and Farouk Maricar)*

This study aims (1) to study and analyze the interaction of hydraulic parameters, geometric structures and reflective parameters to get the relationship between the effects of wave deformation especially wave reflection and breaker parameters on run-up and overtopping discharge at OWEC-breakwater; (2) to find geometric shapes of OWEC-breakwater slopes that can produce maximum run-up and overtopping discharge; (3) to obtain a dimensionless relationship formula that shows the influence of hydraulic variables, reflective variables and geometric structures on wave run-up and at the same time the effect of run-up relative to overtopping discharge to be used as a breakwater design approach to OWEC-breakwater. The research method used was an experimental study by conducting physical model simulations on two-dimensional wave channels in the laboratory. OWEC-breakwater was a modified breakwater model by completing the reservoir at its peak for rotating turbines. Model innovations were made with double slopes, where variations were made at the bottom slope angle or bulb slopes, which were  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $105^\circ$ . The height of the sub-slope relative to the depth of the water ( $s/d$ ) is varied with the value of  $s/d = 1$ ,  $s/d = 0.882$  &  $s/d = 0.789$  to see the effect on the height of wave run-up and overtopping. The results showed that the maximum wave run-up and overtopping were obtained at  $s/d = 1$ , or that the water level is the same as the sub-slope peak elevation. Maximum wave run-up and overtopping are also obtained in models with upright sub-slope or  $90^\circ$  models. At the end of this research, an empirical formula for wave run-up and overtopping were developed from the two maximum conditions.

Keywords: Overtopping Wave Energy Converter-Breakwater, deformation, run-up, and overtopping

## DAFTAR ISI

	<b>halaman</b>
DISERTASI	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	1
BAB I PENDAHULUAN	3
A. Latar Belakang	3
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	6
D. Manfaat Penelitian	7
E. Batasan Masalah	7
F. Kebaruan/Novelti	8
G. Definisi Operasional	9
H. Penelitian Terdahulu	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	20
A. Konsep <i>Wave Energy Converter (WEC)</i>	20
1. Wave Activated Body (WAB)	21
2. Point Absorber	21
3. Oscilating Water Coloumn (OWC)	22
4. <i>Overtopping Wave Energy Converter (OWEC)</i>	23



B.	Integrasi <i>Overtopping WEC–Breakwater</i>	26
1.	<i>Seawave Slot-Cone Generator (SSG)</i>	27
2.	<i>Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC)</i>	28
C.	Teori Dasar Gelombang	30
1.	Parameter Gelombang	30
2.	Deformasi Gelombang	32
D.	Energi Gelombang	39
E.	<i>Run-up</i> Gelombang	42
F.	<i>Overtopping</i> Gelombang	51
G.	Hukum Dasar Model	64
1.	Sifat Sebangun	64
2.	Angka <i>Froude</i>	66
H.	Metode Analisis Dimensi	68
I.	Kerangka Pikir	70
J.	Hipotesis	71
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN		72
A.	Tempat dan Waktu Penelitian	72
B.	Pra Penelitian	72
1.	Saluran Gelombang ( <i>Wave Flume</i> )	72
2.	Mesin Pembangkit Gelombang( <i>Wave Generator</i> )	73
3.	Karakteristik Gelombang yang Dihasilkan di Laboratorium	74
C.	Jenis Penelitian dan Sumber Data	75
1.	Jenis Penelitian	75
2.	Sumber Data	76
D.	Alat dan Bahan	76

1. Alat	76
2. Bahan	77
E. Variabel yang Diteliti	78
F. Karakteristik Gelombang	78
1. Tinggi Gelombang	78
2. Panjang Gelombang dan Periode Gelombang	79
G. Perancangan Model	79
1. <i>OWEC-breakwater</i>	79
2. Variasi Parameter Struktur dan Parameter Hidrolik	84
3. Penentuan Skala, Dimensi Model, dan Rancangan Simulasi	85
H. Prosedur Pengambilan Data	88
I. Bagan Alir Proses Penelitian Laboratorium dan Analisa Data	89
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	92
1. Pengaruh ( $H_i/L$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ )	95
2. Pengaruh ( $\xi$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ )	99
3. Pengaruh ( $K_r$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ )	105
4. Pengaruh ( $s/d$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ )	108
5. Pengaruh ( $\xi s/d$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ )	115
6. Pengaruh ( $H_i/L$ ) terhadap ( $q/(gH_i^3)^{0.5}$ )	117
7. Pengaruh ( $\xi$ ) terhadap ( $q/(gH_i^3)^{0.5}$ )	122
8. Pengaruh ( $K_r$ ) terhadap ( $q/(gH_i^3)^{0.5}$ )	128
9. Pengaruh ( $R_c/H_i$ ) terhadap ( $q/(gH_i^3)^{0.5}$ )	132
10. Perhitungan $q$ berdasarkan $R_u$ secara analitis	134
11. Pemilihan model terbaik	148
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	153

A. Kesimpulan	153
B. Saran	155
DAFTAR PUSTAKA	156

## DAFTAR TABEL

<b>Nomor</b>		<b>halaman</b>
Tabel 1.	Matriks penelitian terdahulu	12
Tabel 2.	Karakteristik teknologi WEC berkonsep <i>overtopping</i>	24
Tabel 3.	Deskripsi parameter yang berpengaruh	83
Tabel 4.	Variasi parameter struktur & parameter reflektif	84
Tabel 5.	Variasi parameter hidrolis	85
Tabel 6.	Dimensi model	87
Tabel 7.	Rancangan simulasi	88
Tabel 8.	Penentuan nilai $\alpha$ , $\beta$ dan $\tau$	94
Tabel 9.	Penentuan bilangan tak berdimensi ( $\pi_i$ )	95
Tabel 10.	Statistik data <i>run-up relative</i> untuk $(s/d) = 1$	109
Tabel 11.	Statistik data <i>run-up relative</i> untuk $(s/d) = 0.882$	110
Tabel 12.	Statistik data <i>run-up relative</i> untuk $(s/d) = 0.789$	110
Tabel 13.	Pembagian kondisi <i>overtopping</i>	148
Tabel 14.	Kalkulasi kisaran <i>run-up</i> dan debit <i>overtopping</i>	152

## DAFTAR GAMBAR

<b>Nomor</b>		<b>Halaman</b>
Gambar 1.	Empat konsep <i>Wave Energy Converter</i> (WEC)	20
Gambar 2.	Presentasi pengembangan <i>Wave Energy Converter</i>	21
Gambar 3.	Konsep <i>wave activated body</i>	21
Gambar 4.	Konsep <i>Point Absorber</i>	22
Gambar 5.	Konsep <i>Oscilating Water Coloumn</i>	22
Gambar 6.	Konsep teknologi <i>Overtopping</i> WEC	23
Gambar 7.	<i>Tapered Chanel</i> (TAPCHAN)	25
Gambar 8.	<i>Wave Dragon</i>	25
Gambar 9.	<i>Seawave Slot-Cone Generator</i> (SSG)	27
Gambar 10.	<i>Innovative rubble mound breakwater</i> (OBREC).	28
Gambar 11.	Sebaran lokasi pengoprasian konsep <i>WEC</i>	30
Gambar 12.	Sketsa definisi gelombang linier	32
Gambar 13.	Deskripsi bidang gelombang berdiri.	34
Gambar 14.	Skema bidang gelombang berdiri sebagian (parsial).	34
Gambar 15.	Grafik hubungan $\xi$ terhadap $Kr$	37
Gambar 16.	Sketsa macam-macam <i>breaker type</i>	39
Gambar 17.	Konsep dasar penurunan rumus energi gelombang	40
Gambar 18.	Sketsa definisi <i>Run-up</i> gelombang	41
Gambar 19.	Grafik <i>run-up</i> gelombang Iribaren	44
Gambar 20.	Grafik Iribaren number terhadap $Ru/H$	46
Gambar 21.	Grafik surf similarity terhadap $Ru/H$ oleh Shankar	47

Gambar 22.	Hubungan <i>breaker parameter</i> dengan <i>run-up</i> relatif	48
Gambar 23.	Pengaruh $\xi$ terhadap $Ru/H$ oleh Janaka	49
Gambar 24.	Hubungan $\xi$ terhadap $Ru/H$ oleh EurOtop	50
Gambar 25.	Hubungan $H_i/L$ terhadap $Ru/H$ oleh Alfansuri	51
Gambar 26.	Definisi gelombang <i>overtopping</i> pada struktur	52
Gambar 27.	Hubungan $H_i/L$ terhadap $(q/(gH_i^3))^{0.5}$	56
Gambar 28.	Pengaruh ( $\xi$ ) terhadap $(q/(gH_i^3))^{0.5}$ Jiménez	57
Gambar 29.	Hubungan $H_i/L$ dengan $(q/(gH_i^3))^{0.5}$ EurOtop	58
Gambar 30.	Pengaruh ( $\xi$ ) terhadap $(q/(gH^3))^{0.5}$ EurOtop	59
Gambar 31.	Hubungan $(R_c/H_m0)$ $(q/(gH^3))^{0.5}$ Klabber dkk	60
Gambar 32.	Hubungan $(F')$ terhadap $(Q')$ Ward & Ahrens	61
Gambar 33.	Hubungan $(Rh)$ terhadap $(Qh)$ oleh Allsop	62
Gambar 34.	Pengaruh $(R)$ terhadap $(Q)$ oleh Soliman	63
Gambar 35.	Hubungan $Ru$ terhadap $V_{rata-rata}$ N.J. Shankar	64
Gambar 36.	Kerangka pikir penelitian	70
Gambar 37.	<i>Wave flume</i> yang digunakan untuk uji model	73
Gambar 38.	Pembangkit gelombang tipe <i>flap</i>	74
Gambar 39.	Ilustrasi gerakan flap pembangkit gelombang	74
Gambar 40.	Sketsa (H & T) melalui pengaturan	75
Gambar 41.	Bahan akrilik untuk pembuatan model	77
Gambar 42.	Ilustrasi breakwater konvensional satu fungsi	80
Gambar 43.	Ilustrasi breakwater dwifungsi (penangkap gelombang)	81
Gambar 44.	Sketsa tiga variasi model <i>OWEC-breakwater</i>	81
Gambar 45.	Sketsa gambar tiga model <i>OWEC-breakwater</i>	83
Gambar 46.	Parameter yang berpengaruh	84

Gambar 47.	Tampak samping <i>wave flume</i> & posisi model uji	87
Gambar 48.	Bagan alir ( <i>flow chart</i> ) penelitian di laboratorium	90
Gambar 49.	Bagan alir ( <i>flow chart</i> ) proses analisa data	91
Gambar 50.	Hubungan ( $H_i/L$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M75)	96
Gambar 51.	Hubungan ( $H_i/L$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M90)	97
Gambar 52.	Hubungan ( $H_i/L$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M105)	97
Gambar 53.	Hubungan ( $\xi$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M75)	100
Gambar 54.	Hubungan ( $\xi$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M90)	101
Gambar 55.	Hubungan ( $\xi$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M105)	101
Gambar 56.	Fenomena gelombang berdiri pada penelitian	104
Gambar 57.	Hubungan ( $K_r$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M75)	106
Gambar 58.	Hubungan ( $K_r$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M90)	106
Gambar 59.	Hubungan ( $K_r$ ) terhadap ( $R_u/H_i$ ) untuk (M105)	107
Gambar 60.	Rekapitulasi jumlah data $R_u$ pada (M75)	110
Gambar 61.	Rekapitulasi jumlah data $R_u$ pada (M90)	111
Gambar 62.	Rekapitulasi jumlah data $R_u$ pada (M105)	111
Gambar 63.	Hubungan ( $s/d$ ) dengan % $R_u/H$	112
Gambar 64.	Hubungan ( $s/d$ ) dengan $((R_u/H_i)^{33})$	112
Gambar 65.	Hubungan ( $s/d$ ) dengan $((R_u/H_i)_{rerata})$	113
Gambar 66.	Sketsa temuan pengaruh bentuk lereng model	114
Gambar 67.	Sketsa temuan pengaruh <i>sub-slope</i> relative ( $s/d$ )	115
Gambar 68.	Grafik $(\xi s/d)$ terhadap $R_u/H_i$ pada M75	116
Gambar 69.	Grafik $(\xi s/d)$ terhadap $R_u/H_i$ pada M90	116
Gambar 70.	Grafik $(\xi s/d)$ terhadap $R_u/H_i$ pada M105	117
Gambar 71.	Grafik ( $H_i/L$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M75)	118

Gambar 72.	Grafik ( $H_i/L$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M90)	119
Gambar 73.	Grafik ( $H_i/L$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M105)	119
Gambar 74.	Penggunaan tinggi <i>freeboard</i> yang berbeda	122
Gambar 75.	Grafik ( $\xi$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M75)	123
Gambar 76.	Grafik ( $\xi$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M90)	124
Gambar 77.	Grafik ( $\xi$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M105)	124
Gambar 78.	Fenomena <i>surgings</i> pada penelitian	126
Gambar 79.	Grafik ( $K_r$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M75)	129
Gambar 80.	Grafik ( $K_r$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M90)	129
Gambar 81.	Grafik ( $K_r$ ) terhadap $(q/(gH^3)^{0.5})$ pada (M105)	130
Gambar 82.	Grafik ( $R_c/H_i$ ) dengan $(q/(gH^3)^{0.5})$	132
Gambar 83.	Hubungan $R_u/H_i$ dari kedua percobaan pada (M75)	135
Gambar 84.	Hubungan $R_u/H_i$ dari kedua percobaan pada (M90)	135
Gambar 85.	Hubungan $R_u/H_i$ dari kedua percobaan pada (M105)	136
Gambar 86.	Sketsa Gambar hitungan analitis volume <i>overtopping</i>	136
Gambar 87.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M75) $s/d=1$ $R_c=0.08$	138
Gambar 88.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M75) $s/d=0.882$ $R_c=0.06$	138
Gambar 89.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M75) $s/d=0.789$ $R_c=0.06$	139
Gambar 90.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M90) $s/d=1$ $R_c=0.08$	139
Gambar 91.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M90) $s/d=0.882$ $R_c=0.06$	140
Gambar 92.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M90) $s/d=0.789$ $R_c=0.06$	140
Gambar 93.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M105) $s/d=1$ $R_c=0.08$	141
Gambar 94.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M105) $s/d=0.882$ $R_c=0.06$	141
Gambar 95.	Grafik $R_u$ dengan $V$ pada (M105) $s/d=0.789$ $R_c=0.06$	142
Gambar 96.	Hubungan ( $R_u/R_c$ ) terhadap $(q/(g.H^3)^{0.5})$ pada (M75)	143



Gambar 97.	Hubungan ( $Ru/Rc$ ) terhadap ( $q/(g.H^3)^{0.5}$ ) pada (M90)	144
Gambar 98.	Hubungan ( $Ru/Rc$ ) terhadap ( $q/(g.H^3)^{0.5}$ ) pada (M105)	144
Gambar 99.	Grafik ( $\xi s/d$ ) terhadap $Ru/Hi$ pada M90	149
Gambar 100.	Hubungan ( $Ru/Rc$ ) dengan ( $q/(g.Hi^3)^{0.5}$ ) pada (M90)	150
Gambar 101.	Sketsa model/struktur <i>OWEC-breakwater</i> M90	152

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
$A$	Luas Dasar <i>Reservoir</i> ( $m^2$ )
$a_m$	Percepatan di Model ( $m/s^2$ )
$a_p$	Percepatan di Prototip ( $m/s^2$ )
$c$	Cepat Rambat Gelombang ( $m/s$ )
$d$	Kedalaman Air (m)
$D; P$	Daya (J/s atau W)
$E$	Energi Rata-Rata Gelombang per Satuan Luas ( $J/m^2$ )
$Fr$	Angka <i>Froude</i> , akar perbandingan antara gaya inersia dan gaya berat
$g$	Percepatan Gravitasi : $9,81 (m/s^2)$
$h_e, h$	BedaTinggi Muka Air di <i>Reservoir</i> Terhadap Tinggi Muka Air Laut (m)
$H$	Tinggi Gelombang (m)
$H_i; H_{m0}$	Tinggi Gelombang Datang (m)
$H_{max}$	Tinggi Gelombang Maksimum (m)
$H_{min}$	Tinggi Gelombang Minimum (m)
$I_r$	Bilangan <i>Irribaren</i>
$L$	Panjang Gelombang (m)
$L_o$	Panjang Gelombang di Air Dalam (m)
$L_m$	Ukuran Panjang di Model (m)
$L_p$	Ukuran Panjang di Prototipe (m)
$n$	Faktor Energi Gelombang

$n_a$	Skala Percepatan
NDP	<i>Non Dimensional Parameter</i> (parameter tak berdimensi)
$n_L$	Skala Panjang
$n_t$	Skala Waktu
$n_v$	Skala Kecepatan
OWEC	<i>Overtopping Wave Energy Converter</i>
$\rho$	Rho, Rapat Massa ( $\text{kg/m}^3$ )
$q; Q; Q'; Qh$	Debit <i>Overtopping</i> ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$R_c$	Tinggi <i>Freeboard</i> (m)
$R_c/H_i; R; R_h; F'$	<i>Freeboard relative</i>
$R_u$	<i>Run-up</i> Gelombang (m)
$R_u/H$	<i>Run-up relative</i>
SSG	<i>Seawave Slotcone Generator</i>
S	tinggi <i>sub slope</i> (m)
$s/d$	<i>sub-slope relative</i>
T	Periode Gelombang (s)
$t_m$	Waktu di Model (s)
$t_p$	Waktu di Prototip (s)
t	Waktu Penangkapan Gelombang (s)
$v_m$	Kecepatan di Model (m/s)
$v_p$	Kecepatan di Prototip (m/s)
$\gamma$	Berat jenis air laut ( $\text{N/m}^3$ )
WAB	<i>Wave Activated Bodies</i>

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah tersedia di bumi ini adalah energi gelombang laut. Lebih dari tujuh puluh persen bagian permukaan bumi adalah lautan. Indonesia sendiri memiliki wilayah perairan yang sangat luas dan menyimpan potensi energi yang cukup tersedia dan belum dimanfaatkan. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan akan energi saat ini, selangkahnya Indonesia mampu memanfaatkan lautnya sebagai sumber energi alternatif, disaat bahan bakar fosil dan minyak yang tak terbarukan, semakin menipis persediaannya.

Sejauh ini, energi gelombang laut, merupakan sumber energi alternatif yang sangat bersih, ramah lingkungan, senantiasa ada dan terbarukan, dapat diprediksi, dan telah berkembang menjadi sumber energi alternatif yang sangat potensial untuk bersaing dengan sumber energi tak-terbarukan saat ini. Berbagai macam penelitian dalam bidang energi terbarukan telah gencar dikembangkan guna membuka dimensi baru teknologi energi terbarukan ramah lingkungan yang dapat mengurangi ketergantungan penggunaan bahan bakar fosil, namun dalam pengaplikasiannya, teknologi sumber energi terbarukan

khususnya energi gelombang laut, masih menghadapi masalah utama, yakni biaya pembuatan yang sangat besar, jika dibandingkan dengan teknologi energi tak-terbarukan konvensional.

Biaya tinggi pada aspek ekonomi *Wave Energy Converter* (WEC) atau teknologi konverter energi gelombang laut, dapat diimbangi dengan meningkatkan performa dan efisiensi dari sistem teknologi energi gelombang laut. Hal lain yang dapat dilakukan untuk mengimbangi atau mengatasi masalah utama biaya yang tinggi dari teknologi ini adalah dengan mengintegrasikannya dengan atau pada struktur maritim lain seperti *breakwater* atau pelindung pantai.

*Breakwater* yang ada saat ini, hanya berfungsi sebagai penghancur energi gelombang, padahal gelombang adalah salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial apabila mau dimanfaatkan. Oleh karena itu, *breakwater* konvensional satu fungsi penghancur energi gelombang, dirubah paradigmanya menjadi *breakwater* dual-fungsi penangkap energi gelombang, untuk dimanfaatkan selain sebagai pelindung pantai, juga sebagai konverter energi gelombang. *Breakwater* konvensional tersebut dilengkapi dengan *reservoir* pada puncak bangunan, untuk menangkap dan mengumpulkan limpasan gelombang (*overtopping*) yang melewati puncak bangunan, sehingga *breakwater* konvensional tersebut berubah menjadi *wave energy converter – breakwater* (WEC *Breakwater*).

Debit *overtopping* merupakan salah satu fenomena paling dinamis yang terjadi pada bangunan pantai. Besarnya debit *overtopping* dipengaruhi oleh banyak faktor dan masih menjadi ranah penelitian yang menarik hingga saat ini. Rumusan besar debit *overtopping* diperoleh dari kajian-kajian empiris hasil penelitian, dan beberapa penelitian tentang deformasi gelombang terhadap debit *overtopping* khususnya pada konsep gabungan *WEC-breakwater* masih terbatas.

Berdasarkan hal tersebut maka hadir suatu ide tentang model pelindung pantai yang sekaligus dapat berfungsi sebagai penangkap energi gelombang, yang selanjutnya diberi nama *OWEC-breakwater* (*Overtopping Wave Energy Converter – breakwater*). Konsep pemikirannya adalah memodifikasi *breakwater* untuk dapat menangkap dan menampung gelombang limpasan (*overtopping*) pada *reservoir* yang dibuat di puncak model. Air yang tertampung di *reservoir* tersebut, yang letaknya lebih tinggi dari muka air laut, memiliki kandungan energi potensial untuk dimanfaatkan. Selain itu gelombang, yang merupakan parameter utama berpengaruh, akan dikaji deformasinya dan pengaruhnya terhadap *run-up* dan debit *overtopping*, dalam upaya meningkatkan efisiensi model *OWEC-breakwater*.

Untuk itu, dilakukan pendekatan dengan melakukan uji model fisik di laboratorium.

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah, dalam tulisan ini akan dipelajari pengaruh deformasi gelombang terhadap *run-up* dan debit *overtopping* pada *OWEC-breakwater* dengan uji model fisik, dengan rumusan masalah yang akan dikaji adalah :

1. Bagaimana interaksi parameter hidrolis, geometrik struktur dan parameter reflektif untuk mendapatkan hubungan pengaruh deformasi gelombang khususnya refleksi gelombang dan breaker parameter terhadap *run-up* dan debit *overtopping* pada *OWEC-breakwater*?
2. Bagaimana bentuk geometrik lereng *OWEC-breakwater* yang dapat menghasilkan *run-up* dan debit *overtopping* yang maksimum?
3. Bagaimana formula hubungan tak berdimensi yang menunjukkan pengaruh variabel hidrolis, variabel reflektif dan geometrik struktur terhadap *run-up* gelombang dan sekaligus pengaruh *run-up* relatif terhadap debit *overtopping* untuk digunakan sebagai pendekatan disain breakwater menjadi *OWEC-breakwater*?

## C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian dalam tulisan ini adalah :

1. Mempelajari dan menganalisis interaksi parameter hidrolis, geometrik struktur dan parameter reflektif untuk mendapatkan

hubungan pengaruh deformasi gelombang khususnya refleksi gelombang dan breaker parameter terhadap *run-up* dan debit *overtopping* pada *OWEC-breakwater*.

2. Menemukan bentuk geometrik lereng *OWEC-breakwater* yang dapat menghasilkan *run-up* dan debit *overtopping* yang maksimum.
3. Mendapatkan formula hubungan tak berdimensi yang menunjukkan pengaruh variabel hidrolis, variabel reflektif dan geometrik struktur terhadap *run-up* gelombang dan sekaligus pengaruh *run-up* relatif terhadap debit *overtopping* untuk digunakan sebagai pendekatan disain breakwater menjadi *OWEC-breakwater*.

#### **D. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian dalam tulisan ini adalah :

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan *overtopping wave energy converter (OWEC)* sekaligus pelindung pantai yang sejauh ini belum pernah dikembangkan di Indonesia.
2. Hasil penelitian menjadi tambahan alternatif tipe bangunan pelindung pantai yang sekaligus sebagai penangkap energi gelombang yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan daya listrik.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis perencanaan bilamana model bangunan yang berfungsi ganda ini menjadi pilihan untuk dilaksanakan di suatu lokasi.



4. Hasil penelitian menjadi tambahan referensi dalam kajian *run-up* dan *overtopping* gelombang pada pelindung pantai.

#### **E. Batasan Masalah**

Ruang lingkup penelitian dalam tulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Hanya mengkaji tahap pertama konversi energi, yaitu upaya meningkatkan nilai debit dan tinggi head *reservoir*.
2. Sudut datang gelombang tegak lurus terhadap model dan kemiringan dasar perairan adalah rata dan konstan.
3. Hanya mengkaji deformasi gelombang berupa *wave refleksi dan wave breaking*.
4. Gelombang yang dibangkitkan adalah gelombang teratur (*regular wave*).
5. Gaya gelombang terhadap stabilitas model pelindung pantai tidak dikaji.
6. Tidak mengkaji turbin dan tahap kedua konversi energi.
7. Fluida yang digunakan adalah air tawar, salinitas dan pengaruh mineral air tidak diperhitungkan.

#### **F. Kebaruan/Novelti**

Kebaruan atau novelti yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah

1. Ditemukannya bentuk geometri struktur pelindung pantai *OWEC-breakwater* yang efektif menangkap gelombang untuk konversi energi.
2. Ditemukannya pengaruh parameter reflektif gelombang terhadap besaran Run-up dan Overtopping gelombang yang merupakan fungsi dari besarnya daya gelombang yang bisa ditangkap
3. Ditemukannya pengaruh parameter tinggi dinding struktur dan kedalaman air terhadap besarnya Run-Up dan overtopping *OWEC-breakwater*.
4. Ditemukan persamaan *run-up* dalam fungsi *breaker parameter* dan ketinggian dinding struktur relatif terhadap kedalaman yang selanjutnya menemukan rumusan hubungan run-up gelombang dengan debit overtopping model *OWEC-breakwater* yang hasilnya dapat dikomparasikan dengan hasil Iribaren dan peneliti-peneliti sebelumnya.

### G. Definisi Operasional

VARIABEL PENELITIAN	DEFIENISI
Deformasi gelombang	Perubahan bentuk gelombang akibat menabrak rintangan/struktur yang dinyatakan dalam gelombang refleksi ( <i>wave reflection</i> ) dan gelombang pecah ( <i>wave breaking</i> ).
Tinggi <i>run-up</i> gelombang ( <i>Ru</i> )	Jarak vertikal antara titik tertinggi <i>run-up</i> gelombang (rayapan gelombang pada permukaan struktur pantai) dan permukaan air.
Debit <i>overtopping</i> gelombang ( <i>q</i> )	Jumlah volume limpasan air/gelombang yang melalui puncak struktur dalam rentang waktu tertentu.

Tinggi gelombang datang ( $H_i$ )	Tinggi gelombang datang di depan struktur.
Panjang gelombang ( $L$ )	Jarak yang diukur untuk satu gelombang (jarak yang diukur dari puncak gelombang ke puncak gelombang selanjutnya)
Kecuraman gelombang ( $H_i/L$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan perbandingan antara tinggi gelombang datang terhadap panjang gelombang.
<i>Run-up relative</i> ( $R_u/H_i$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan tinggi <i>run-up</i> gelombang terhadap tinggi gelombang datang.
<i>Breaker parameter</i> ( $\xi$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan interaksi antara parameter struktur (kemiringan/ <i>slope</i> struktur) dengan parameter hidrolik/gelombang (kecuraman gelombang).
<i>Reflection Coefficient</i> ( $K_r$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan/mengukur karakteristik reflektif dari suatu struktur pantai.
Kedalaman air ( $d$ )	Jarak vertikal antara muka air laut/permukaan air dengan dasar perairan/dasar <i>wave flume</i> .
Tinggi <i>sub-slope</i> ( $s$ )	Jarak vertikal antara puncak <i>slope</i> bagian bawah struktur dengan dasar struktur.
<i>Sub-slope relative</i> ( $s/d$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan perbandingan antara tinggi <i>sub-slope</i> terhadap kedalaman air.
Tinggi <i>freeboard</i> ( $R_c$ )	Jarak vertikal antara puncak struktur dengan permukaan air.
<i>Freeboard relative</i> ( $R_c/H_i$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan perbandingan antara tinggi <i>freeboard</i> terhadap tinggi gelombang datang.
<i>Dimensionless run-up</i> ( $R_u/R_c$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan perbandingan antara tinggi <i>run-up</i> gelombang terhadap tinggi <i>freeboard</i> .
<i>Dimensionless overtopping discharge</i> ( $q/(gH^3)^{0.5}$ )	<i>Non dimensional parameter</i> yang menyatakan perbandingan antara debit <i>overtopping</i> terhadap karakteristik gelombang.

## H. Penelitian Terdahulu

Pada Tabel 1 diberikan matriks beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan dalam ranah integrasi *breakwater* dan *wave energy*

*converter (WEC)* berkonsep *overtopping*, refleksi gelombang serta *run-up* dan *overtopping* gelombang pada struktur pantai.

Tabel 1. Matriks penelitian terdahulu

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
1.	M.Azlan Musa, A.Yazid Maliki, M.Fadhli-Ahmad, W.Nik Sani, Omar Yaakob, K.B.Samo	<i>Numerical Simulation of Wave Flow Over the Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) Device</i>	<i>Procedia Engineering Volume194, 166-173 (2017).</i>	Mensimulasi secara numerik aliran gelombang <i>overtopping</i> pada OBREC untuk konversi energi	Model numerik aliran gelombang <i>overtopping</i> pada OBREC untuk konversi energi.	Meneliti Breakwater atau pelindung pantai yang juga sekaligus berkonsep konverter energi gelombang.	Model Fisik
2.	P. Oliveira, F. Taveira-Pinto, T. Morais, P. Rosa-Santos	<i>Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator.</i>	<i>Energy Conversion and Management, 165-175 (2016).</i>	Menganalisa model fisik efek dan kinerja dari dinding pemusat gelombang yang ditambahkan pada SSG konverter energi gelombang berbasis breakwater.	Model fisik WEC SSG breakwater dengan dinding pemusat gelombang, yang menghasilkan kinerja lebih baik.	Eksperimental studi di laboratorium untuk menguji model fisik WEC berbasis breakwater/pelindung pantai.	Bentuk model fisik.
3.	Kerpen, Schoonees, & Schlurmann.	<i>Wave Overtopping of Stepped Revetments.</i>	<i>Water, volume 11, 1035 (2019).</i>	Melakukan penelitian eksperimental tentang gelombang <i>overtopping</i> pada revetment bidang miring dengan bentuk lereng bertingkat (tangga).	Mengusulkan formula empiris baru untuk memprediksi gelombang <i>overtopping</i> pada revetment bidang miring dengan bentuk lereng bertingkat (tangga).	Mengkaji gelombang <i>overtopping</i> .	Kajian breakwater berkonsep WEC dan bentuk model fisik.

Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
4.	Muttray, Oumeraci, & Oever.	<i>Wave reflection and wave run-up at rubble mound breakwaters</i>	<i>Proceedings of the 30th International Conference - San Diego, California, USA (3 – 8 September 2006)] Coastal Engineering 2006</i>	Mengkaji gelombang refleksi dan gelombang <i>run-up</i> pada breakwater tipe rubble mound bidang miring secara eksperimental dengan model fisik skala besar	Mengusulkan formula empiris refleksi gelombang untuk struktur pantai tipe rubble mound bidang miring	Mengkaji gelombang refleksi dan gelombang <i>run-up</i> .	Kajian breakwater berkonsep WEC dan bentuk model fisik
5.	Shaswat Saincher, Jyotirmay Banerjee	<i>Influence of wave breaking on the hydrodynamics of wave energy converters: A review.</i>	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews, 704-717 (2016).</i>	Menyoroti dan mengkaji pengaruh dari gelombang pecah pada hidrodinamika dari konverter energi gelombang.	Hasil analisa pengaruh gelombang pecah pada hidrodinamika konverter energi gelombang.	Ada analisa tipe gelombang pecah (breaker type).	Pemodelan dan pengujian model fisik di laboratorium, tidak sekedar review.
6.	Shankar & Jayaratne	<i>Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures.</i>	<i>Ocean Engineering, Volume 30, 221-238 (2003)</i>	Meneliti secara eksperimental pada wave flume di laboratorium tentang pengaruh parameter gelombang dan parameter struktur terhadap <i>run-up</i> dan <i>overtopping</i> gelombang pada struktur pantai halus dan kasar	Menghasilkan formula empiris pengaruh parameter gelombang dan parameter struktur terhadap <i>run-up</i> dan <i>overtopping</i> gelombang	Menganalisa parameter gelombang dan parameter struktur terhadap <i>run-up</i> dan <i>overtopping</i> gelombang.	Kajian breakwater berkonsep WEC ;Meninjau pengaruh gelombang refleksi dan bentuk ;model fisik (geometri lereng).

Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
6.	Matthew J.Wesley, Kwok Fai Cheung	<i>Modeling of wave overtopping on vertical structures with the HLLS Riemann solver.</i>	<i>Coastal Engineering, 28-43 (2016).</i>	Memodelkan gelombang <i>overtopping</i> pada struktur tegak dengan pemodelan matematis yang di validasi dengan pemodelan fisik laboratorium.	Model gelombang <i>overtopping</i> pada dinding tegak yang disajikan dalam model matematik dan model fisik.	Menganalisa gelombang <i>overtopping</i> .	Eksperimental laboratorium dan bentuk model fisik.
7.	Mariano Buccino, Dimitris Stagonas, Diego Vicinanza	<i>Development of a composite sea wall wave energy converter system.</i>	<i>Renewable Energy, 509-522 (2015).</i>	Mengembangkan model fisik konverter energi gelombang yang sekaligus dapat berfungsi sebagai sea wall atau pelindung pantai.	Model fisik konverter energi gelombang dwifungsi.	Mengembangkan model fisik konverter energi gelombang yang sekaligus dapat berfungsi sebagai pelindung pantai.	Bentuk/geometri lereng model fisik.
8.	Park & Cox	<i>Empirical wave run-up formula for wave, storm surge and berm width</i>	<i>Coastal engineering, xxx-xxx, (2015).</i>	Mengkaji secara matematis model empiris untuk memprediksi gelombang <i>run-up</i> pada pantai dengan mempertimbangkan pengaruh badai dan lebar berm pantai.	Menghasilkan formula untuk memprediksi gelombang <i>run-up</i> pada pantai dengan pengaruh badai dan lebar berm pantai.	Mengkaji gelombang <i>run-up</i> .	Uji model fisik struktur pantai berkonsep WEC.

Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
9.	Molines, Herrera, Gómez-Martín, & Medina.	<i>Distribution of individual wave overtopping volumes on mound breakwaters.</i>	<i>Coastal Engineering, Volume 149, 15-27, (2019).</i>	Pengujian model 2D dengan skala kecil untuk mengidentifikasi jumlah <i>overtopping</i> gelombang dan volume gelombang <i>overtopping</i> individual pada mound breakwaters.	Mengusulkan metodel baru untuk mengestimasi prediksi yang lebih baik pada volume gelombang <i>overtopping</i> individual maksimum pada mound breakwaters.	Mengkaji gelombang <i>overtopping</i> .	Uji model fisik struktur pantai berkonsep WEC dan bentuk model fisik.
10.	Mohammad Navid Moghim, Razieh Forouzan Boroujeni, Mahmoud Mohammad Rezapour Tabari	<i>Wave overtopping on reshaping berm breakwaters based on wave momentum flux.</i>	Applied Ocean Research, 23-30, (2015).	Menganalisa dan menghasilkan formula baru untuk menghitung debit <i>overtopping</i> pada breakwater lereng bertingkat.	Formula baru untuk menghitung debit <i>overtopping</i> pada breakwater lereng bertingkat.	Menganalisa debit <i>overtopping</i> .	Bentuk geometry model.
11.	A. Thaha, F. Maricar, A. F. Aboe, A.I.Dwipuspita	<i>The breakwater, from wave breaker to wave Catcher.</i>	<i>Procedia Engineering, 69 1-698, (2015).</i>	Menganalisa besarnya debit <i>overtopping</i> yang dapat ditangkap oleh pelindung pantai yang juga diciptakan sebagai converter/penangkap energy gelombang.	Mengembangkan model fisik yang berfungsi tidak hanya sebagai pelindung pantai tetapi juga dapat berfungsi sebagai penangkap energy gelombang.	Mengembangkan model fisik yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung pantai tetapi juga sebagai penangkap energy gelombang.	Bentuk geometry model.



Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
12.	Diego Vicinanza, Pasquale Contestabile, Jørgen Quvang Harck Nørgaard, Thomas Lykke Andersen	<i>Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion.</i>	<i>Coastal Engineering, 154-170, (2014).</i>	Mengembangkan model fisik breakwater tipe rubble mound yang sekaligus dapat berfungsi sebagai wave energi converter	Model fisik breakwater dwi fungsi bernama OBREC.	Mengembangkan model fisik pelindung pantai yang sekaligus dapat berfungsi sebagai wave energi converter.	Bentuk model fisik.
13.	A.Ildha Dwi P.	Model Pelindung Pantai sebagai Penangkap Energi Gelombang.	Tesis magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tahun 2014.	Menganalisa besarnya debit <i>overtopping</i> yang dapat ditangkap oleh pelindung pantai yang juga diciptakan sebagai converter/penangkap energy gelombang, dengan parameter gelombang dan parameter model.	Mengembangkan model fisik yang berfungsi tidak hanya sebagai pelindung pantai tetapi juga dapat berfungsi sebagai penangkap energy gelombang.	Mengembangkan model fisik yang berfungsi tidak hanya sebagai pelindung pantai tetapi juga dapat berfungsi sebagai penangkap energy gelombang. Serta menganalisa debit <i>overtopping</i> yang dapat ditangkap.	Bentuk geometry model.

Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
14.	B.W. Lee,, C. Lee,	<i>Development of wave power generation device with resonance channels.</i>	<i>Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), 533-537. Tahun 2013.</i>	Mengembangkan model <i>wave power generation device with resonance channel</i> . Model ini selain dapat berfungsi sebagai <i>breakwater</i> , juga dapat berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik.	Model konverter energi gelombang yang sekaligus berfungsi <i>breakwater</i> , yang dilengkapi <i>resonance channel</i> .	Mengembangkan model konverter energi gelombang yang sekaligus berfungsi <i>breakwater</i> .	Tidak dilengkapi saluran <i>resonance channel</i> .
15.	Barbara Zanuttigh, Elisa Angelelli	<i>Experimental investigation of floating wave energy converters for coastal protection purpose</i>	<i>Coastal Engineering, 48-159, (2013).</i>	Studi eksperimental <i>converter energy gelombang terapung</i> yang sekaligus berfungsi sebagai pelindung pantai.	Model fisik <i>converter energy gelombang terapung</i> yang sekaligus berfungsi sebagai pelindung pantai	Studi eksperimental <i>converter energy gelombang</i> yang sekaligus berfungsi sebagai pelindung pantai. <i>Energy converters</i> untuk pelindung pantai yang dimaksud adalah tipe terapung	Bukan tipe terapung.

Tabel 1. Lanjutan

No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
16.	H. Fernandez, G. Iglesias, R. Carballo, A. Castro, J.A. Fraguela, F. Taveira- Pinto, M. Sanchez	<i>The new wave energy converter Wave Cat: Concept and laboratory tests.</i>	<i>Marine Structure, 58-70 (2012).</i>	Mengembangkan konsep baru model fisik konverter energi gelombang dan menguji laboratorium.	Menghasilkan model fisik baru konverter energi gelombang bernama WaveCat.	Mengembangkan model fisik baru model konverter energi gelombang (dwi fungsi) dan menguji laboratorium	Bentuk dan tipe bangunan.
17.	L. Victor, J.W. van der Meer, P. Troch	<i>Probability distribution of individual wave overtopping volumes for smooth impermeable steep slopes with low crest freeboards.</i>	<i>Coastal Engineering, 87-101 (2012).</i>	Menganalisa distribusi probabilitas volume <i>overtopping</i> untuk gelombang per gelombang (individu) pada struktur sisi miring halus berpuncak rendah.	Menyuguhkan formula baru dalam memprediksi distribusi probabilitas volume <i>overtopping</i> untuk gelombang per gelombang (individu) pada bangunan pantai/struktur pantai sisi miring yang dan halus berpuncak rendah.	Menganalisa gelombang <i>overtopping</i> .	Kajian breakwater berkonsep WEC dan bentuk model fisik.

Tabel 1. Lanjutan

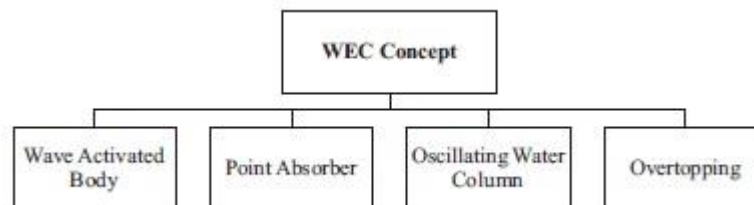
No.	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
18.	L. Margheritini, D. Vicinanza, P. Frigaard	<i>SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device.</i>	<i>Renewable Energy, 1371-1380, (2009).</i>	Menganalisa desain dan proses dibalik kinerja seawave slotcone generator (SSG) sebagai wave energy converter inovatif tipe <i>overtopping</i> untuk aplikasi pilot project.	Menghasilkan analisa desain dan kinerja SSG untuk aplikasi pilot project pantai utara amerika.	Model fisik yang diuji adalah breakwater berbasis converter energi gelombang.	Eksperiment al study dalam rangka pengembangan ilmu pengetahuan.
19.	Tim Pullen, William Allsop, Tom Bruce, Jonathan Pearson	<i>Field and laboratory measurements of mean overtopping discharges and spatial distributions at vertical seawalls</i>	<i>Coastal Engineering, 121-140, (2009).</i>	Mengukur pada uji fisik laboratorium dan lapangan, debit <i>overtopping</i> rata-rata yang terjadi pada seawall dinding vertical.	Analisis debit <i>overtopping</i> rata-rata pada seawall dinding tegak.	Menganalisa debit <i>overtopping</i> .	Kajian breakwater berkonsep WEC dan bentuk model fisik.
20.	Allsop, Bruce, Pearson, & Besley.	<i>Wave overtopping at vertical and steep seawalls.</i>	<i>Maritime Engineering, volume 158, 103-114. (2005).</i>	Mengkaji gelombang <i>overtopping</i> pada seawall tipe tegak dan miring.	Menyatukan hasil penelitian gel. <i>overtopping</i> pada seawall & menjelaskan penggunaan metode prediksinya.	Menganalisa gelombang <i>overtopping</i> .	Kajian breakwater berkonsep WEC dan bentuk model fisik.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

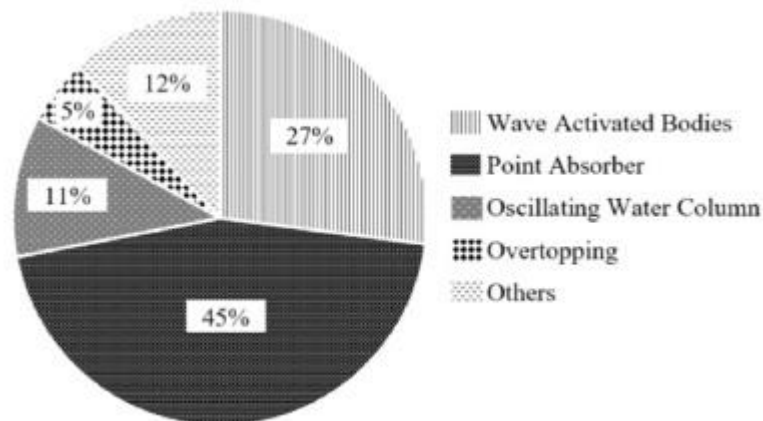
#### A. Konsep *Wave Energy Converter (WEC)*

Teknologi WEC atau dalam istilah Indonesia disebut teknologi konverter energi gelombang, dapat dikategorikan berdasarkan beberapa aspek, antara lain lokasi dioperasikannya, kondisi gelombang, dan prinsip kerjanya. Berdasarkan aspek tersebut, teknologi WEC terbagi dalam 4 konsep yaitu seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Empat konsep *Wave Energy Converter (WEC)*

Lopez dalam Mustapa, M.A. et al. (2017) memperlihatkan rincian kategori teknologi WEC yang telah dikembangkan di seluruh dunia, seperti terlihat pada Gambar 2. Teknologi WEC yang paling populer dan yang telah paling banyak dikembangkan adalah yang didasarkan pada konsep point absorber, sedangkan teknologi WEC yang belum populer dan belum banyak dikembangkan adalah yang didasarkan pada konsep *overtopping*.



Gambar 2. Presentasi pengembangan Wave Energy Converter (WEC)  
(Mustapa, M.A. et al., 2017)

### 1. Wave Activated Body (WAB)

Wave activated bodies (WAB) mengkonversi energi ketika body yang mengambang digerakkan langsung oleh interaksi gelombang. Pengaturan WAB terletak pada kondisi mengambang parsial dan perangkat ditempatkan sejajar dengan arah gelombang dominan. WAB ditunjukkan pada Gambar 3.

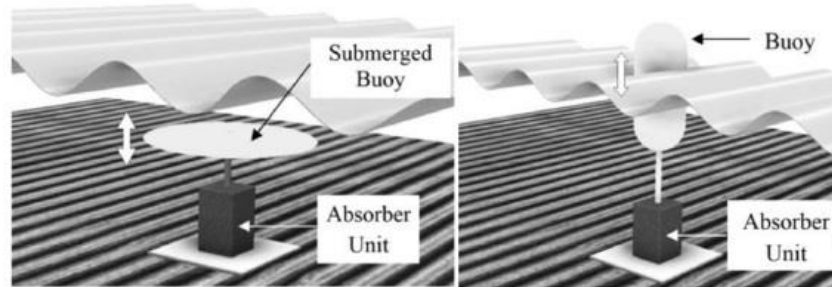


Gambar 3. Konsep wave activated body (Mustapa, M.A. et al., 2017)

### 2. Point Absorber

Point absorber didefinisikan sebagai body yang mengapung ataupun tenggelam yang berisolasi terhadap gerakan rotari gelombang. Point absorber mampu menangkap gelombang yang datang dari

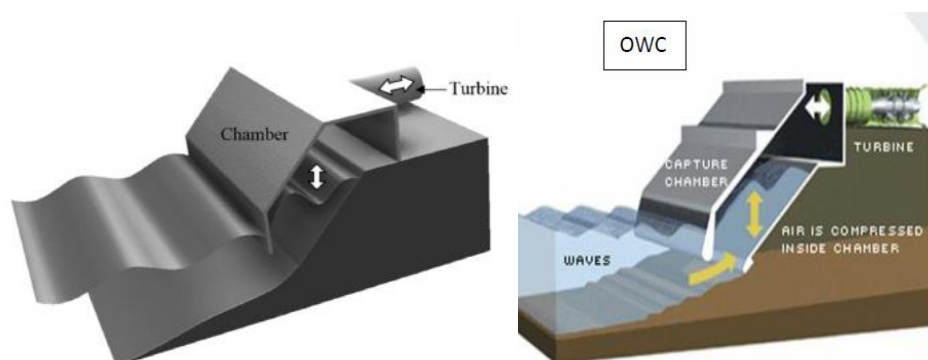
berbagai arah. Point absorber mengkonversi energi ketika pelampung bergerak naik dan turun. Secara umum teknologi point absorber terdiri dari dua alat utama, pertama adalah pelampung dan kedua adalah penyerap, seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Konsep Point Absorber (Mustapa, M.A. et al., 2017)

### 3. Oscilating Water Coloumn (OWC)

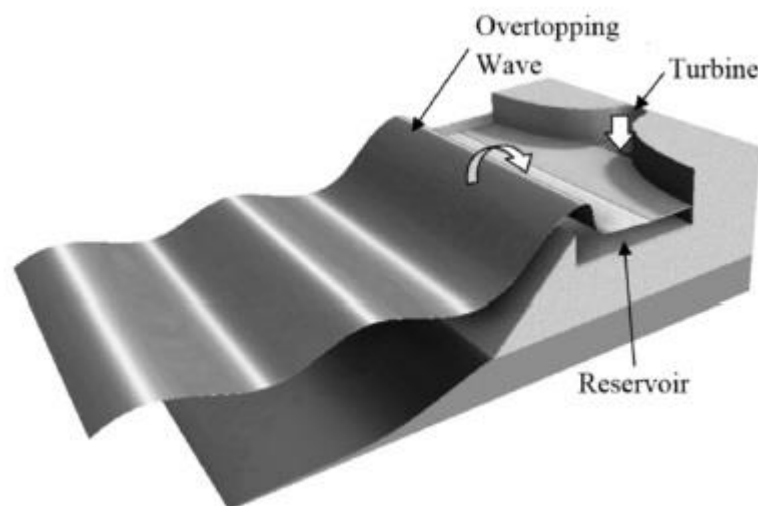
Teknologi OWC adalah salah satu konsep konverter energi gelombang yang paling terkenal. Konsep ini telah banyak dikembangkan diberbagai penjuru dunia, salah satunya di Indonesia. Konsep ini mengkonversi energi dengan memanfaatkan osilasi yang terjadi melalui tekanan naik turun udara oleh gelombang di dalam ruang penangkap. Tekanan udara inilah yang memutar turbin yang terletak di puncak bangunan. Konsep OWC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Konsep *Oscilating Water Coloumn*

#### 4. *Overtopping* Wave Energy Converter (OWEC)

Konsep yang digunakan pada konverter energi gelombang *overtopping* adalah dengan membawa gelombang naik ke dalam *reservoir* melalui mekanisme *overtopping* gelombang, dimana dari *reservoir* yang terletak pada puncak converter yang letaknya lebih tinggi dari muka air laut, energi potensial dikonversikan menjadi energi mekanik melalui turbin. Konsep *overtopping* wave energy converter disajikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Konsep teknologi *Overtopping* WEC (Mustapa, M.A. et al., 2017)

Efek dari gelombang pecah digunakan untuk menaikkan muka air gelombang kedalam *reservoir* yang berada lebih tinggi dari muka air laut. Gelombang pecah terjadi ketika gelombang bergerak pada kedalaman yang berangsur-angsur berkurang atau gelombang yang datang menghempas bidang miring. Secara umum, teknologi *overtopping* terdiri dari dua tipe, tipe tenggelam dan tipe terapung. Beberapa tipe temuan

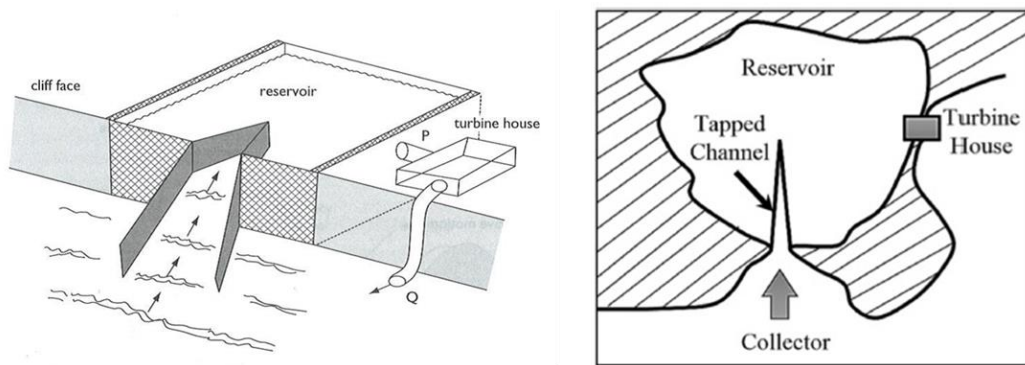


teknologi WEC yang didasarkan pada konsep *overtopping* disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik teknologi WEC berkonsep *overtopping* (Mustapadkk, 2017)

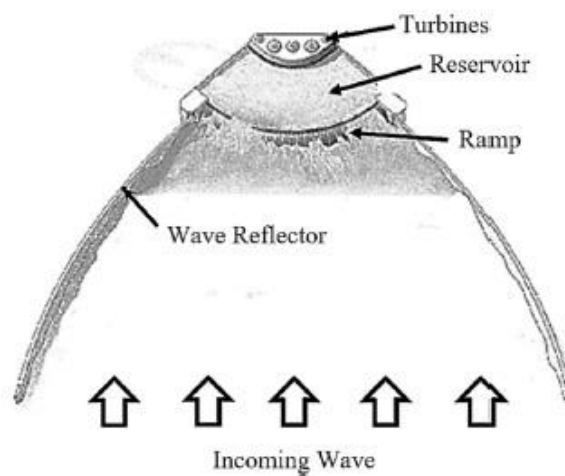
Wave energy device	Type	Water depth (m)	Mean wave power (kW/m)	Output power (kW)
Wave Dragon	Floating	20–40	60	625–940
TAPCHAN	Fixed	20	20–30	350
Sea Slot-Cone Generator (SSG)	Fixed	6–18	14–16	49–62

Temuan pertama yang berkonsep *overtopping* adalah teknologi gelombang Tapered Chanel atau yang biasa dikenal dengan TAPCHAN. Tipe tenggelam *overtopping* WEC ini pertama kali dikembangkan di Norwegia pada tahun 1980. Konsep yang digunakan pada TAPCHAN mirip dengan hydroelectric power tradisional, dimana gelombang laut dipusatkan naik kedalam *reservoir* melalui mekanisme *overtopping* dan dari *reservoir* yang letaknya lebih tinggi dari muka air laut dirilis kembali kelaut melalui rumah turbin, seperti yang terlihat pada ilustrasi Gambar 7.



Gambar 7. Tapered Chanel (TAPCHAN) (Twidell, 2006)

Temuan yang berkonsep *overtopping* WEC dengan tipe terapung adalah Wave Dragon. Bentuk fisik dari model ini memberikan kemampuan tambahan bukan hanya untuk konverter energi, tetapi juga sebagai peredam gelombang, dengan koefisien transmisi sebesar 0.68. Teknologi ini dibangun menggunakan 3 komponen utama, terdiri dari sepasang *reflector*, lereng miring, dan *reservoir*. Konsep yang digunakan untuk menaikkan gelombang mirip dengan TAPCHAN, tapi pada wave dragon, sepasang *reflector* digunakan untuk memusatkan gelombang. Ilustrasi Gambar *wave dragon* disajikan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Wave Dragon

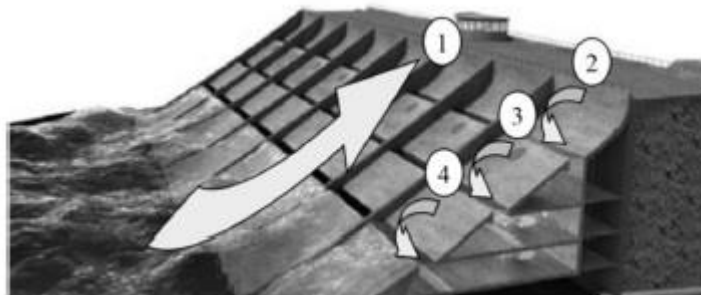
## B. Integrasi *Overtopping WEC–Breakwater*

Penggunaan konsep *overtopping WEC* pada pemecah gelombang atau *breakwater* telah mulai diinisiasi oleh penemuan *Sea Slot-Cone Generator (SSG)* pada 2002 dan *OBREC* pada 2013. Pada 2015 satu-satunya *prototype* yang telah dikembangkan dari jenis ini adalah *OBREC*. Unit *prototype OBREC* telah diaplikasikan pada *breakwater* tipe *rubble mount* di pelabuhan Naples, Italia. Alasan menggunakan konsep ini (integrasi *WEC-breakwater*) dipicu oleh kesesuaian aspek yang cocok dengan desain *breakwater* caisson beton horizontal yang ada di pelabuhan tersebut. Sebenarnya, kemiringan lereng yang ada pada bidang depan *breakwater*, didesain untuk menghancurkan gelombang melalui pengurangan kedalaman laut. Ketika kedalaman laut berkurang, gelombang akan mulai pecah dalam beberapa bentuk gelombang pecah. Dapat berupa *spilling*, *collapsing*, *plunging* atau *surgings*, tergantung dari sudut area garis pantai.

Pada konsep penggabungan *overtopping WEC-breakwater*, gelombang pecah tipe *surgings* akan dimanfaatkan. Gelombang tersebut akan naik dan melimpas (*overtopping*) kemudian dikumpulkan pada *reservoir* dan digunakan kembali untuk membangkitkan listrik menggunakan *hidro-turbin low head*. Dengan kata lain, konsep penggabungan ini, dapat meningkatkan secara optimal kemampuan *breakwater* konvensional satu fungsi menjadi dual fungsi yaitu, sebagai pelindung pantai dan sekaligus teknologi konverter energi gelombang.

### 1. *Seawave Slot-Cone Generator (SSG)*

*Seawave Slot-Cone Generator* masuk dalam klasifikasi konsep teknologi *overtopping wave energy converter*. Penggabungan yang dilakukan berupa *breakwater* tipe tenggelam dan *wave energy converter* memungkinkan SSG untuk menyuguhkan struktur dual fungsi. Fokus yang diberikan pada penemuan ini lebih kepada pemecah gelombang dari pada konverter energi. Metode yang digunakan untuk mengumpulkan gelombang datang dan mengisi *reservoir* didasarkan pada konsep air yang menyusut, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. *Seawave Slot-Cone Generator (SSG)* (Mustapa dkk, 2017)

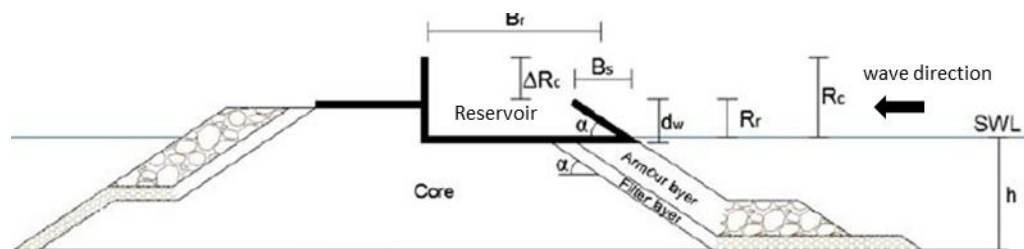
Ketika gelombang kehilangan energinya yang disebabkan oleh fenomena *shoaling*, gelombang akan cenderung pecah. Kemudian, gelombang akan kembali ke laut dan secara otomatis mengisi *reservoir* bertingkat. Penggunaan *reservoir* bertingkat membantu SSG untuk menyimpan energi potensial berbeda tanpa merubah originalitas dari energi yang terbawa. Air yang telah terkumpulkan kemudian digunakan untuk menjalankan turbin bertingkat untuk produksi listrik. Efisiensi total

yang didapatkan *reservoir* bertingkat lebih tinggi dari pada *reservoir* satu tingkat saja.

SSG beroperasi pada kondisi gelombang tinggi dan sedang. Penelitian model SSG 2D telah mengungkapkan bahwa desain SSG mampu mendapatkan efisiensi hidraulis sebesar 37 %, yang diukur dari volume air yang masuk pada *reservoir*.

## 2. *Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC)*

*OBREC* diklasifikasikan sebagai struktur multi-fungsi yang mengimplementasikan konsep *overtopping* pada struktur *breakwater* tradisional tipe *rubble mound*. Konsep ini menggunakan konfigurasi yang sederhana, dimana *reservoir* satu tingkat ditempatkan di bagian depan dari *breakwater* tenggelam tipe *rubble mound*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.



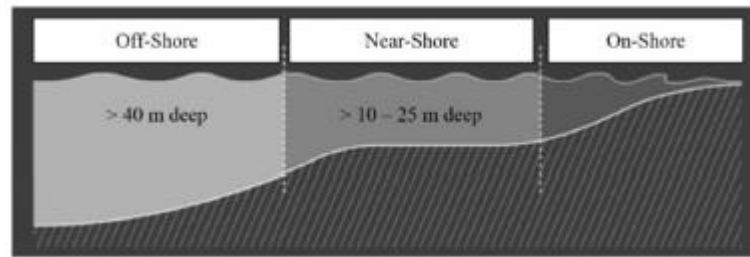
Gambar 10. *Innovative rubble mound breakwater with frontal reservoir for energy production (OBREC)*. (Vicinanza dkk, 2014)

Fenomena *overtopping* mulai terjadi ketika gelombang datang, mencapai limit maximum dari *freeboard*, atau puncak *breakwater*. Pada saat itu, gelombang mulai pecah dan mengisi *reservoir*. Walaupun konsepnya sangat sederhana, tetapi struktur ini punya potensi untuk

merubah gelombang *overtopping* yang terbuang pada struktur *breakwater* konvensional satu fungsi, menjadi bermanfaat untuk tenaga listrik. Gelombang *overtopping* yang terbuang ini dapat dideskripsikan sebagai gelombang yang telah berhasil melewati *freeboard* atau puncak dari struktur *breakwater*.

Oleh karena *OBREC* beroperasi pada kondisi pasang surut yang sangat beragam, maka potensi dari struktur untuk menangkap gelombang datang maksimum menjadi terbatas. Pada kondisi dimana tinggi muka air laut berada diatas puncak *breakwater*, tidak ada *overtopping* yang akan terjadi. Hal tersebut menciptakan beberapa keterbatasan pada teknologi gabungan ini untuk membangkitkan listrik.

Pada dasarnya prinsip kerja semua teknologi tersebut yaitu menangkap energi gelombang kemudian mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik, adalah mengakumulasi energi gelombang laut untuk memutar turbin generator. Karena itu sangat penting memilih lokasi yang secara topografi memungkinkan akumulasi energi. Beberapa konsep tersebut dapat ditempatkan di garis pantai (*on-shore*), dekat pantai (*nearshore*), lepas pantai (*offshore*), seperti dalam ilustrasi Gambar 11, adapula yang mengaplikasikan pada penahan gelombang atau *breakwater*.



Gambar 11. Sebaran lokasi pengoprasian konsep WEC (Mustapa dkk, 2017)

### C. Teori Dasar Gelombang

Bentuk gelombang di alam sangat kompleks dan sulit digambarkan secara matematis karena ketidak-linieran, tiga dimensi dan mempunyai bentuk yang random. Beberapa teori yang ada hanya menggambarkan bentuk gelombang yang sederhana dan merupakan pendekatan gelombang alam.

#### 1. Parameter Gelombang

Berdasarkan teori *Airy* maka gerak gelombang dianggap sebagai kurva sinus harmonis (*sinusoidal progressive wave*), gelombang dapat dijelaskan secara geometris (Triatmodjo, 1999) berdasarkan :

- a. Tinggi gelombang ( $H$ ), yaitu jarak antara puncak dan lembah gelombang dalam satu periode gelombang.
- b. Panjang gelombang ( $L$ ), jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (1)$$

Untuk mendapatkan panjang gelombang ( $L$ ) maka persamaan (1) dapat diselesaikan dengan menggunakan metode iterasi dimana nilai  $\pi$ ,  $g$ ,  $T$  dan  $d$  diketahui.

- c. Jarak antara muka air rerata dan dasar laut ( $d$ ) atau kedalaman laut.

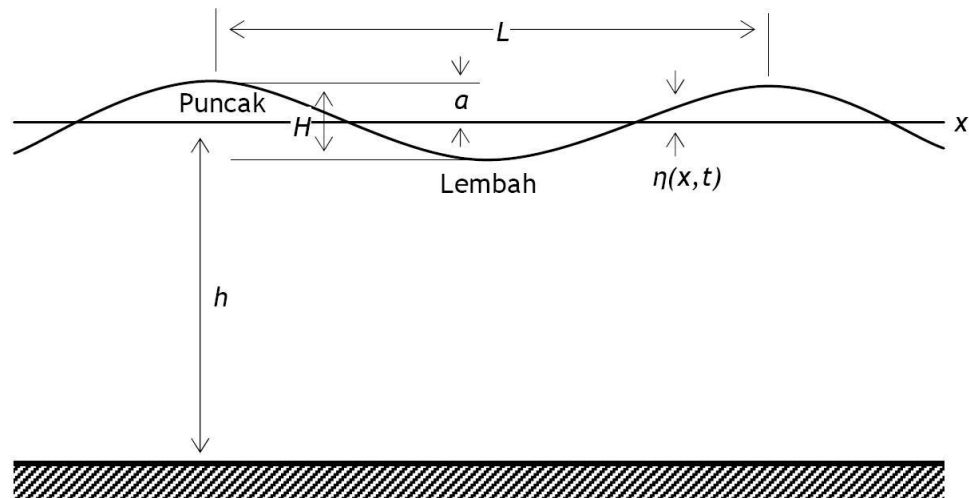
Ketiga parameter tersebut diatas digunakan untuk menentukan parameter gelombang lainnya, seperti :

- a. Kecuraman gelombang (*wave steepness*) =  $H/L$
- b. Ketinggian relatif (*relative height*) =  $H/d$
- c. Kedalaman relatif (*relative depth*) =  $d/L$

Parameter penting lainnya seperti :

- a. Amplitudo gelombang ( $A$ ), biasanya diambil setengah tinggi gelombang ( $\frac{H}{2}$ ). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 12.
- b. Periode gelombang ( $T$ ), yaitu interval waktu yang dibutuhkan antara 2 puncak gelombang (*wave crest*).
- c. Frekuensi ( $f$ ), yaitu jumlah puncak gelombang yang melewati titik tetap per-detik. Frekuensi berbanding terbalik dengan periode,  $f = \frac{1}{T}$ . Satu periode gelombang dapat juga dinyatakan dalam ukuran sudut ( $\theta$ ) =  $2\pi$ .





Gambar 12. Sketsa definisi gelombang linier (*Shore Protection Manual* Volume I, 1984)

Frekuensi sudut gelombang ( $\sigma$ ) didefinisikan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \text{ atau } \sigma = 2\pi.f \quad (3)$$

d. Cepat rambat gelombang ( $c$ ), dimana :

$$c = \frac{L}{T} \quad (4)$$

## 2. Deformasi Gelombang

Dalam perambatannya gelombang menjalar dari laut dalam ke perairan dangkal/pantai dimana pelindung pantai tersebut akan dibangun, gelombang tersebut mengalami perubahan kecepatan, tinggi dan mungkin arahnya. Parameter gelombang yang dianggap tidak mengalami perubahan sepanjang perambatannya adalah periode gelombang. Penyebab utama perubahan karakteristik gelombang tersebut adalah kedalaman dan adanya rintangan seperti struktur pantai.

Deformasi gelombang dapat berupa *refraksi*, *shoaling*, *difraksi*, *refleksi* dan gelombang pecah (*breaking*).

### 2.1. Gelombang refleksi

Gelombang refleksi merupakan salah satu bentuk deformasi gelombang akibat gelombang datang yang menghantam suatu struktur pantai dan menyebabkan terjadinya gelombang pantul atau gelombang refleksi. Besarnya gelombang refleksi disebut dengan tinggi gelombang refleksi ( $H_r$ ).

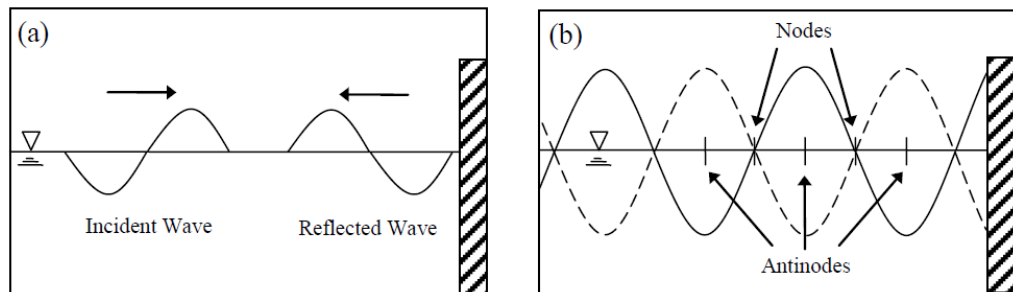
Parameter dasar untuk mengukur karakteristik reflektif dari suatu struktur pantai disebut koefisien refleksi ( $K_r$ ), didefinisikan sebagai rasio dari ketinggian gelombang yang dipantulkan,  $H_r$ , dengan ketinggian gelombang datang,  $H_i$ . Rumus untuk menghitung koefisien refleksi diperlihatkan pada persamaan (5) (Triatmodjo, 1999).

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} \quad (5)$$

### 2.2. Gelombang berdiri

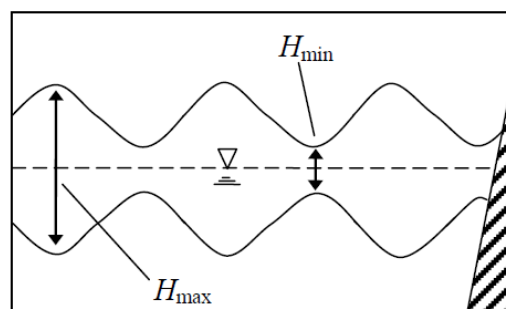
Bidang gelombang berdiri terbentuk oleh superposisi gelombang insiden dan gelombang yang dipantulkan dari penghalang vertikal reflektif sepenuhnya. Gelombang berjalan berlawanan arah dan memiliki frekuensi yang sama, memberikan persepsi gelombang *stasioner*, berosilasi pada ketinggian air rata-rata di semua posisi *non-nodal*. Pada *node*, ketinggian gelombang tetap konstan dan tidak berubah akibat gelombang yang lewat. *Antinode* adalah tempat pertemuan puncak dan

palung dari setiap gelombang, menghadirkan perubahan ketinggian gelombang yang terbesar.



Gambar 13. Deskripsi bidang gelombang berdiri.

Amplop gelombang seperti terlihat pada Gambar 13b dan 14, menggambarkan ketinggian gelombang maksimum dan minimum pada posisi yang berbeda. Ketika permukaan/struktur reflektif tidak memungkinkan untuk refleksi penuh, medan gelombang berdiri parsial (sebagian) terbentuk seperti terlihat pada Gambar 14. Di bidang gelombang berdiri parsial, *node* dan *antinode* masih terbentuk. *Node* menjadi lokasi dari perbedaan elevasi minimum,  $H_{min}$ , dan *Antinode* menjadi lokasi dari perbedaan ketinggian maksimum,  $H_{max}$ , dalam gelombang amplop, seperti yang ditunjukkan dalam skema pada Gambar 14.



Gambar 14. Skema bidang gelombang berdiri sebagian (parsial).

Apabila 2 buah gelombang dengan periode yang sama tetapi berlawanan arah dengan amplitudo  $a_1$  dan  $a_2$ , dengan  $a_1 > a_2$ , maka gabungan dari profil gelombang tersebut adalah (Horikawa, 1978 dalam Defiana, 2006) :

$$\eta = (a_1 + a_2) \cos kx \cos \sigma t + (a_1 - a_2) \sin kx \sin \sigma \quad (6)$$

Persamaan diatas adalah persamaan elevasi muka air untuk gelombang dengan refleksi tidak sempurna dimana  $a_1$  adalah amplitudo gelombang datang dengan  $a_2$  adalah gelombang refleksi. Amplitudo gelombang maksimum  $a_{max}$  dan amplitudo gelombang minimum  $a_{min}$  diberikan oleh persamaan :

$$a_{max} = a_1 + a_2 \text{ dan } a_{min} = a_1 - a_2 \quad (7)$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$H_i = a_{max} + a_{min} = 2a_1$$

$$H_r = a_{max} - a_{min} = 2a_2$$

$$H_i + H_r = 2a_{max} \text{ dan } H_i - H_r = 2a_{min} \quad (8)$$

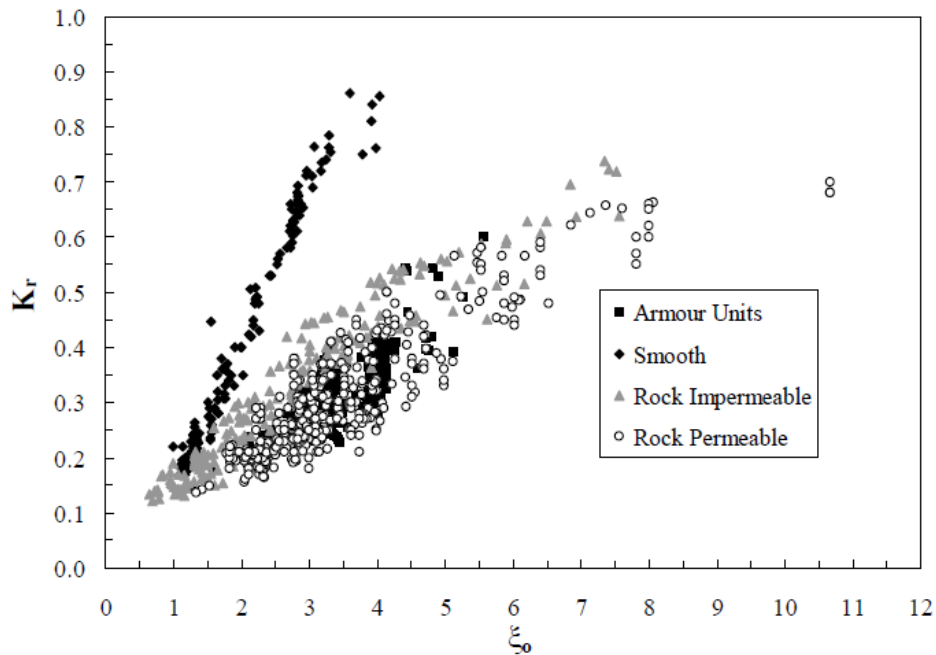
Tinggi gelombang datang adalah :

$$H_i = \frac{2a_{max} + 2a_{min}}{2} = \frac{H_{max} + H_{min}}{2} \quad (9)$$

Tinggi gelombang datang  $H_i$  pada model ditentukan berdasarkan tinggi gelombang maksimum  $H_{max}$  dan minimum  $H_{min}$  dari hasil pengukuran tinggi gelombang pada beberapa titik.

Ada sejumlah parameter yang memengaruhi nilai  $K_r$  struktur pantai di bawah kondisi gelombang yang berbeda. Karena itu, dengan mempertimbangkan berbagai parameter, banyak persamaan yang berbeda diusulkan untuk membantu dalam desain pemecah gelombang individu di bawah kondisi lingkungan tertentu. Refleksi gelombang sangat dipengaruhi oleh kemiringan permukaan dibandingkan dengan panjang gelombang. Misalnya, ketika gelombang mendekati dinding vertikal, sebagian besar energi akan dipantulkan. Namun, ketika gelombang mendekat pantai yang agak landai, sebagian besar energinya hilang karena rusak dan hanya sedikit jumlah energi terpantul. Kajima dalam (Hornack, 2011).

(Zanuttigh, W, & Meer, 2008) melakukan penelitian tentang refleksi gelombang dari struktur pantai pada kondisi desain. Dari hasil penelitian tersebut, diperoleh grafik hubungan antara *breaker parameter*  $\xi$  (parameter tak berdimensi yang menyatakan interaksi antara gelombang dengan struktur) terhadap koefisien refleksi gelombang ( $K_r$ ). Gambar 15 memperlihatkan grafik tersebut.



Gambar 15. Grafik hubungan antara *breaker parameter* terhadap koefisien refleksi gelombang (Zanuttigh et all, 2008)

### 2.3. Kecuraman gelombang (*wave steepness*) dan gelombang pecah (*breaking*)

Kecuraman gelombang (*wave steepness*) didefinisikan sebagai perbandingan antara tinggi gelombang terhadap panjang gelombang  $S_0 = H/L$ . Ini akan memberi tahu kita sesuatu tentang sejarah dan karakteristik gelombang. Umumnya kecuraman  $s_0 = 0,01$  menunjukkan gelombang khas *swell sea* dan kecuraman  $s_0 = 0,04$  hingga  $0,06$  khas *wind sea*. *Swell sea* akan sering dikaitkan dengan gelombang periode panjang, di mana itu adalah periode yang menjadi parameter utama yang mempengaruhi limpasan (*overtopping*).

Tetapi juga *wind sea* dapat menjadi *swell sea* dengan kecuraman gelombang rendah jika gelombang pecah di tepi pantai yang lembut.

Dengan gelombang pecah, periode gelombang pada awalnya tidak banyak berubah, tetapi tinggi gelombang menurun. Hal ini menyebabkan kecuraman gelombang yang lebih rendah. Kecuraman gelombang rendah pada air yang relatif dalam berarti gelombang besar, tetapi untuk lokasi dengan kedalaman terbatas sering berarti gelombang pecah di tepi pantai.

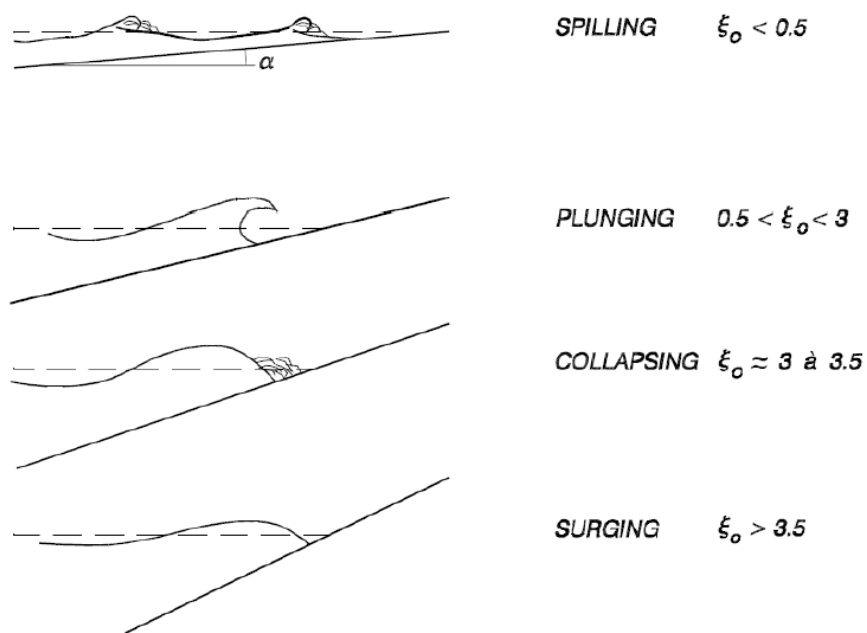
*Breaker parameter, surf similarity* atau angka Iribarren didefinisikan seperti pada persamaan 10 (EuroTop Team, 2018).

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (10)$$

dimana  $\alpha$  adalah kemiringan permukaan depan struktur dan  $L_0$  adalah panjang gelombang air dalam  $gT^2/(2\pi)$ . Perhatikan bahwa panjang gelombang aktual di dekat kaki struktur tidak digunakan, tetapi panjang gelombang air dalam, menggunakan periode gelombang di ujung struktur. Oleh karena itu, kecuraman gelombang yang dihitung adalah kecuraman gelombang nosional dan digunakan untuk menghitung “periode gelombang tanpa dimensi”, daripada kecuraman gelombang yang sebenarnya.

Kombinasi kemiringan struktur dan kecuraman gelombang memberikan jenis gelombang pecah tertentu, lihat Gambar 16. Untuk  $\xi > 3.5$  gelombang dianggap tidak pecah (*surgings*) atau gelombang melonjak, meskipun mungkin masih ada beberapa yang pecah, dan

untuk  $\xi < 3$  gelombang pecah (*plunging*). Transisi antara gelombang pecah tipe *plunging* dan gelombang pecah tipe *surging* dikenal sebagai *collapsing*.



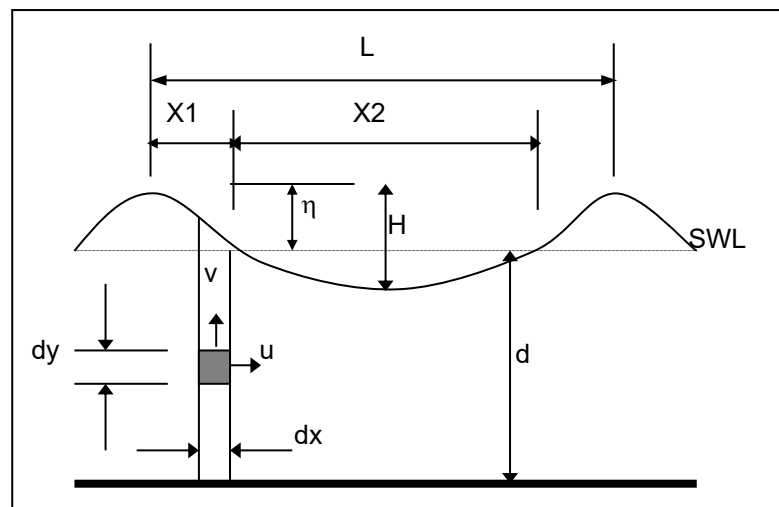
Gambar 16. Sketsa macam-macam *breaker type* (Hedges, n.d)

#### D. Energi Gelombang

Gelombang yang bergerak selain menimbulkan pergerakan partikel, juga dapat memberikan energi gelombang. Energi gelombang terdiri dari dua jenis, yaitu energi kinetik dan energi potensial gelombang. Energi kinetik terjadi karena adanya kecepatan partikel akibat gerak gelombang. Sedangkan energi potensial terjadi karena adanya perpindahan muka air karena gerakan gelombang. Untuk teori



gelombang amplitudo kecil, jika energi gelombang ditetapkan relatif terhadap muka air diam, dan semua gelombang menjalar dalam arah yang sama, maka akan didapat komponen energi potensial dan energi kinetik adalah sama. Untuk mendapatkan persamaan energi gelombang, diasumsikan suatu elemen berukuran  $dx$ ,  $dy$  dan  $l$  seperti terlihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Konsep dasar penurunan rumus energi gelombang (Thaha, 2002)

Dari Gambar diatas untuk satu elemen kecil, maka besar energi kinetik diberikan oleh persamaan 11- 17 (Thaha, 2002).

$$dEk = \frac{1}{2} dmV^2$$

$$= \frac{1}{2} \rho dx dy (u^2 + v^2)$$

$$Ek = \int_0^L \int_{-d}^0 \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dy dx \quad (11)$$

Energi potensial diberikan oleh:

$$E_p = \int \rho g(d + \eta) \frac{(d + \eta)}{2} dx - \rho g L d \left( \frac{d}{2} \right) \quad (12)$$

$$E = E_k + E_p \quad (13)$$

Untuk teori gelombang *Airy*, penyelesaian persamaan (11), (12) dan (13) menghasilkan energi gelombang masing-masing:

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (14)$$

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (15)$$

Dengan demikian energi total dalam satu panjang gelombang persatuan lebar gelombang adalah:

$$E_t = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (16)$$

Sedangkan energi rata-rata persatuan luas sebesar :

$$E = \frac{E_t}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (17)$$

dengan :

$E_k$  : energi kinetik persatuan lebar panjang gelombang  
(joule/m)

$E_p$  : energi potensial persatuan lebar panjang gelombang  
(joule/m)

$E_t$  : energi total persatuan lebar panjang gelombang  
(joule/m)

$E$  : energi rata-rata gelombang persatuan luas (joule/m<sup>2</sup>)

$H$  : tinggi gelombang (m)

$\rho$  : rapat massa air ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi ( $\text{m/dt}^2$ )

Daya gelombang ( $P$ ) adalah energi gelombang persatuan waktu pada arah penjarangan gelombang, seperti diperlihatkan pada persamaan 18 dan 19 (Triatmodjo, 1999).

$$P = \frac{nE}{T} \quad (18)$$

Dimana,  $n$  adalah faktor energi gelombang yang bernilai:

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (19)$$

Daya yang tersedia pada *reservoir* adalah:

$$D = Qh\gamma \quad (20)$$

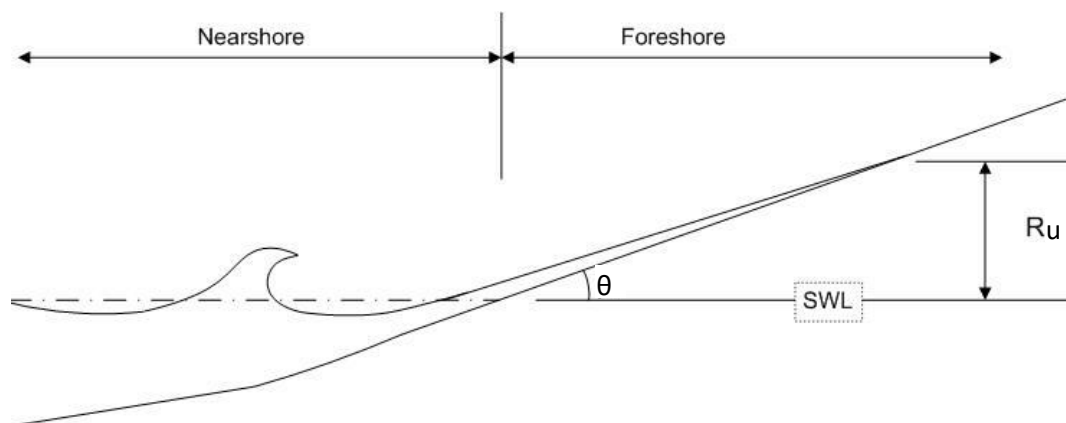
### E. *Run-up* Gelombang

Pada waktu gelombang menghantam suatu bangunan, gelombang tersebut akan naik (*run-up*) pada permukaan bangunan. Tinggi gelombang *run-up* didefinisikan sebagai perbedaan vertikal antara titik tertinggi *run-up* gelombang dan level air diam (SWL) seperti terlihat pada Gambar 18. Karena adanya sifat stochastic pada gelombang datang, setiap gelombang akan memberikan level *run-up* yang berbeda.

Ketika gelombang pada struktur telah mencapai titik tertinggi, gelombang tersebut akan mengalir ke bawah lereng (*run-down*) sampai gelombang berikutnya bertemu gelombang ini dan *run-up* terjadi lagi.

Titik terendah ke tempat air terhempas turun, diukur secara vertikal ke SWL, disebut tinggi *run-down*. *Run-down* terkadang dianggap tidak sepenting gelombang *run-up*, tetapi keduanya bersama-sama membentuk total rayapan gelombang di lereng.

*Run-up* gelombang tergantung pada bentuk dan kekasaran bangunan, kedalaman air pada kaki bangunan, kemiringan dasar laut depan bangunan, dan karakteristik gelombang. Gambar 18 memperlihatkan *run-up* gelombang ( $R_u$ ) dengan parameter yang berpengaruh dan Gambar 19 memperlihatkan grafik Iribaren.



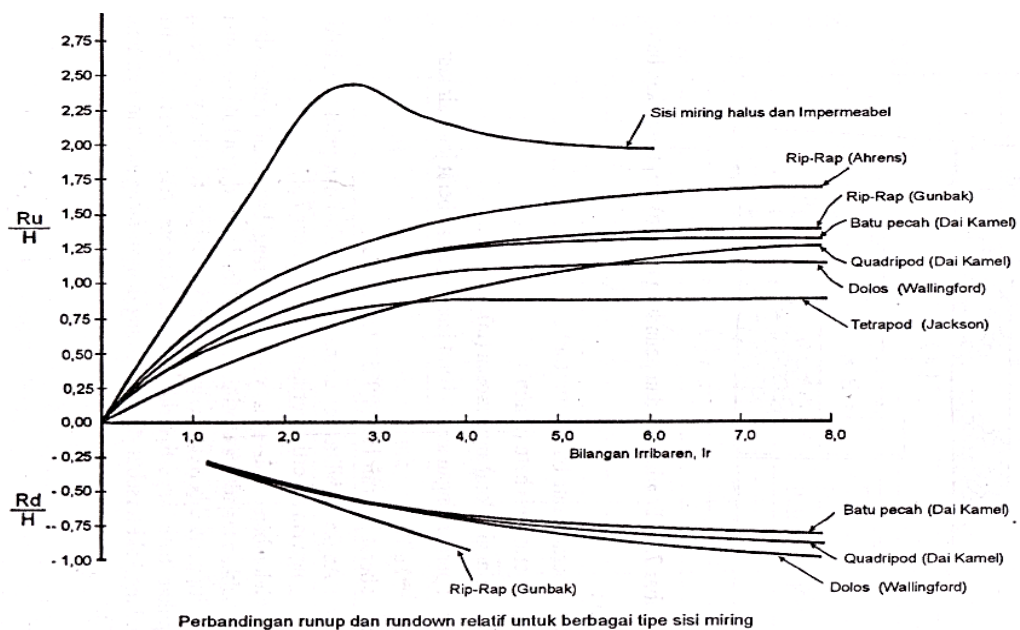
Gambar 18. Sketsa definisi *Run-up* gelombang

Berbagai penelitian tentang *run-up* gelombang telah dilakukan di laboratorium. Hasil penelitian tersebut berupa grafik-grafik yang dapat digunakan untuk menentukan tinggi *run-up*. Hasil percobaan yang paling sering digunakan dalam penentuan tinggi *run-up* gelombang pada bangunan miring adalah hasil percobaan *Iribaren*, yang dinyatakan

dalam angka irribaren, seperti yang terlihat pada persamaan 21 (Triatmodjo, 1999)

$$Ir = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (21)$$

dimana  $\tan \theta$  adalah kemiringan profil yang representatif dan didefinisikan, tergantung pada aplikasi, sebagai kemiringan pantai atau kemiringan penghalang yang dapat berupa gundukan atau elemen bangunan seperti pemecah gelombang atau revetment.  $H$  dan  $L$  masing-masing adalah tinggi dan panjang gelombang.



Gambar 19. Grafik run-up gelombang Irribaren (Triatmodjo, 1999)

Pada waktu gelombang menghantam suatu bangunan, gelombang tersebut akan naik (*run-up*) pada permukaan bangunan. *Run-up* gelombang tergantung pada bentuk dan kekasaran bangunan, kedalaman air pada kaki bangunan, kemiringan dasar laut depan

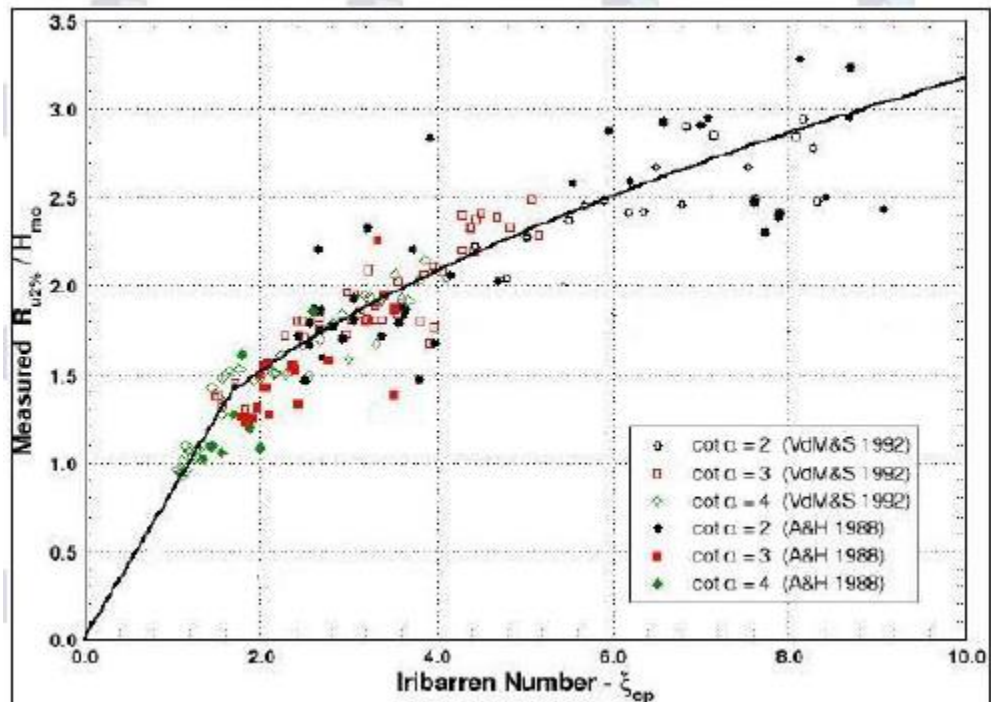
bangunan, dan karakteristik gelombang. Gambar 18 memperlihatkan *run-up* gelombang ( $Ru$ ) dengan parameter yang berpengaruh.

Besarnya tinggi suatu rayapan gelombang (*run-up*) pada bangunan atau besarnya nilai suatu *run-up* gelombang dari berbagai jenis material bidang rayapan gelombang diperoleh secara empiris melalui hasil-hasil penelitian di laboratorium atau hasil-hasil uji model fisik.

Selain Iribaren, beberapa hasil penelitian juga telah mengkaji bagaimana pengaruh deformasi gelombang di depan bangunan seperti *breaker parameter*, terhadap besarnya *run-up* gelombang relatif yang dihasilkan pada bangunan, dengan material dan bentuk geometri tertentu.

### **1. Ahrens dan Heimbaugh, (1988)**

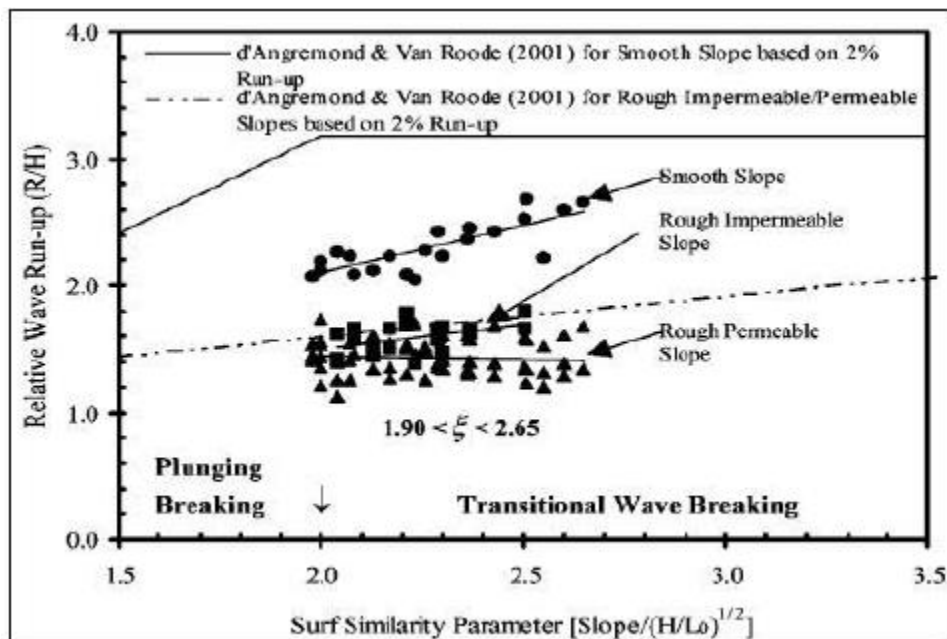
Pada tahun 1988, Ahrens & Heimbaugh dalam (Alfansuri & dkk, 2011) telah melakukan penelitian terhadap gelombang *run-up*. Mereka menjelaskan bahwa nilai *run-up* gelombang merupakan fungsi dari *breaker parameter* atau *irribaren number* ( $\xi$ ). Percobaan dilakukannya di laboratorium wave flume A&M University, Texas. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Grafik Iribarren number terhadap *Run-up* gelombang relative oleh Ahrens dan Heimbaugh (Alfansuri dkk, 2011)

## 2. N.J. Shankar, (2002)

Dalam jurnal *ocean engineering* vol 30 (2003) halaman 221-238, Shankar melakukan *experiment run-up* gelombang yang dilakukan di laboratorium *wave flume Hydraulic Engineering Laboratory of the National, University of Singapore*, dengan menggunakan model *breakwater (armor)* sebagai strukturnya. Hasil eksperimen Shankar yang memperlihatkan pengaruh *breaker parameter/irribaren number/surf similarity* terhadap *run-up relative*, terlihat dalam grafik pada Gambar 21.

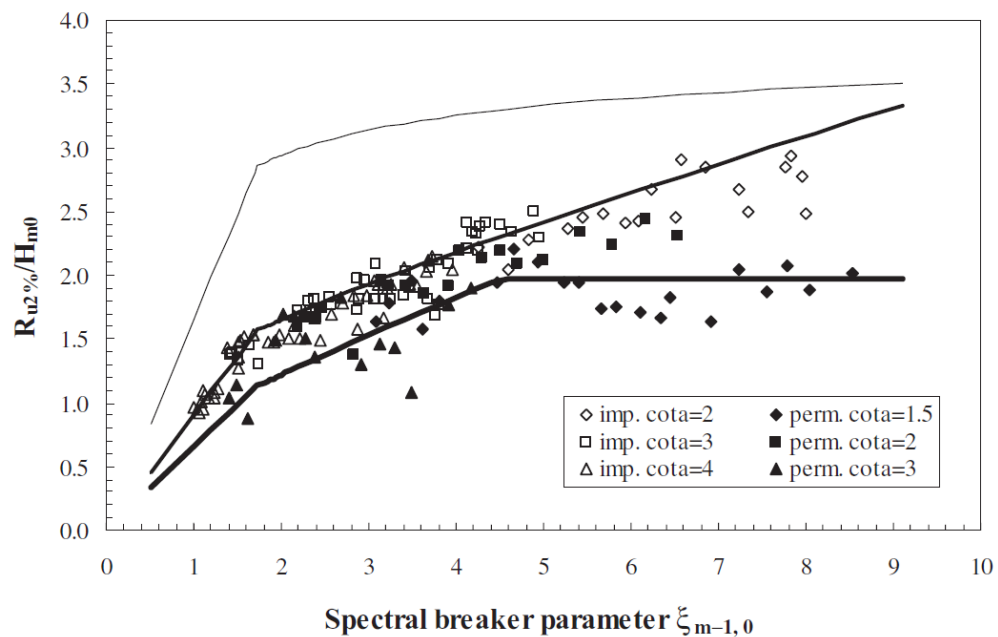


Gambar 21. Grafik pengaruh surf similarity terhadap *run-up* relative oleh Shankar (Shankar & Jayaratne, 2003)

### 3. Van der Meer, dkk, (2007)

Van der Meer, dkk, mengkaji *run-up* gelombang pada bangunan pantai *rubble mound* tipe armor, dimana dari penelitian ini salah satunya menghasilkan grafik hubungan antara *breaker parameter* dengan *run-up* gelombang relatif pada *breakwater rubble mound* tipe armor seperti terlihat pada grafik Gambar 22.



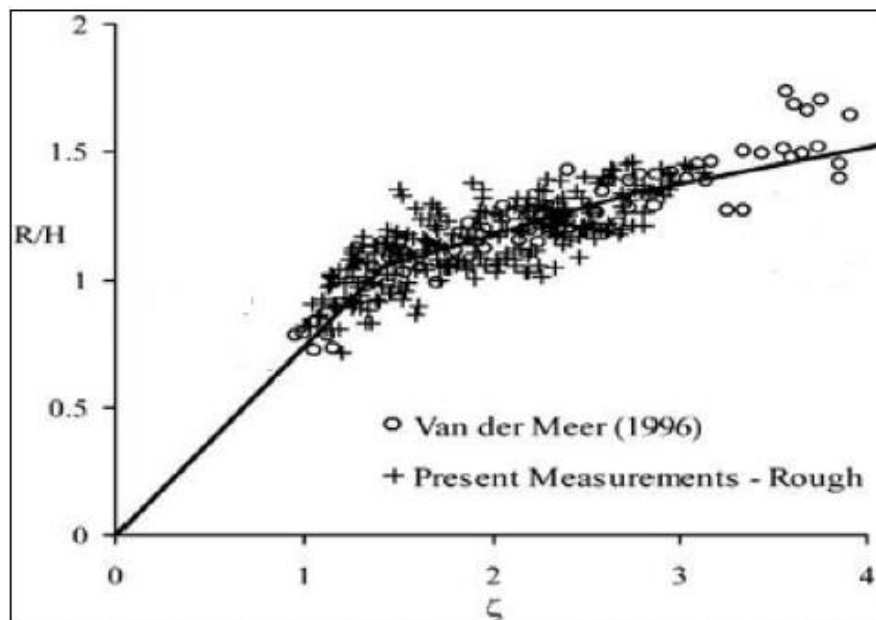


Gambar 22. Hubungan *breaker parameter* dengan *run-up* relatif pada rubble mound breakwater dengan kondisi permeable dan impermeable (Schüttrumpf, van der Meer, Kortenhaus, Bruce, & Franco, 2007)

Penjelasan fisik untuk grafik ini adalah jika lereng struktur menjadi sangat curam (nilai *surf similarity* besar) dan *impermeable*, gelombang dengan kondisi *surging* perlahan naik dan menuruni lereng, dan semua air tetap pada permukaan lereng struktur, mengarah ke *run-up* gelombang yang cukup tinggi. Gelombang *surging* sebenarnya tidak “merasakan” kekasaran lagi dan bertindak seperti gelombang pada kemiringan yang sangat curam. Namun, untuk lereng *permeable* air dapat menembus ke dalam struktur yang mengurangi gelombang *run-up* aktual ke maksimum.

#### 4. Janaka J. Wijetunge, (2008)

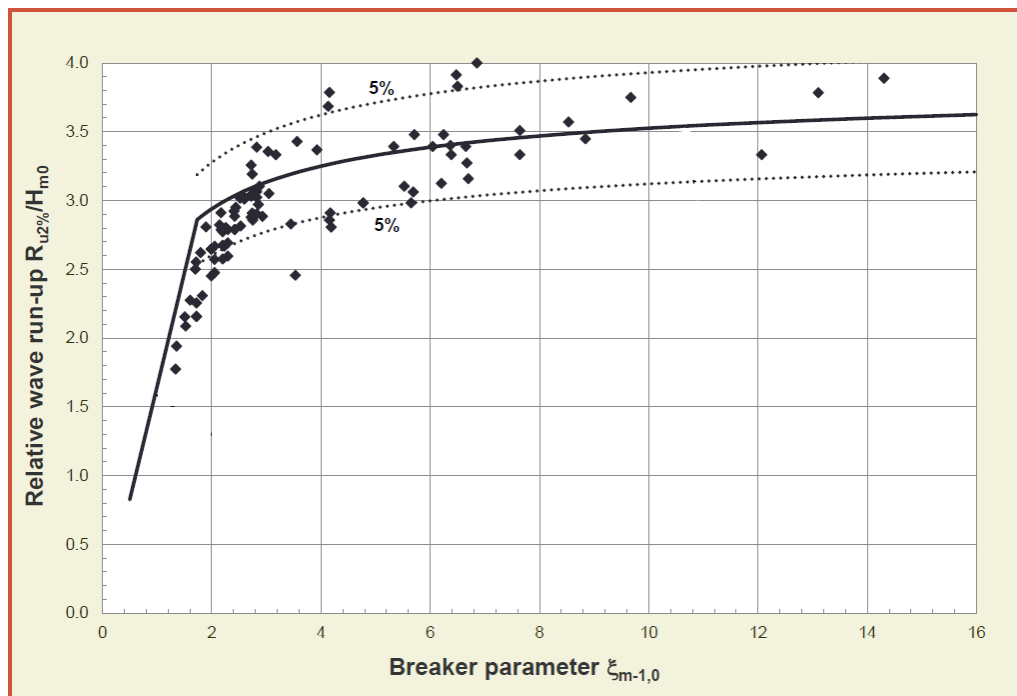
Pada Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka 36 (2), Janaka melakukan experiment *run-up* gelombang untuk mengetahui pengaruh parameter tak berdimensi yaitu *breaker parameter* ( $\xi$ ) terhadap *run-up* relative ( $R_u/H_i$ ), pada skala laboratorium untuk kondisi rock slope. Janaka melakukan experiment tersebut di wave flume Fluids Laboratory of the University of Paredeniya. Grafik hasil pengujian Janaka yang juga menyandingkan data Van der Meer dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Grafik pengaruh *breaker parameter* terhadap *run-up* relative oleh Janaka (Wijetunge, 2008)

### 5. EurOtop, (2018)

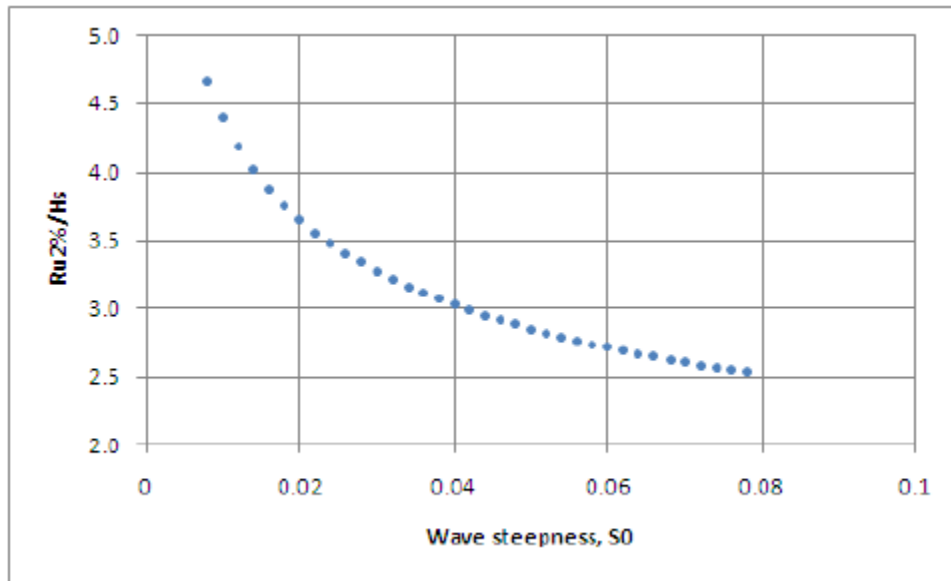
EurOtop juga mengeluarkan grafik pengaruh *breaker parameter* terhadap *run-up* relative dalam buku manual gelombang *overtopping*. Grafik EurOtop diperlihatkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Grafik hubungan *breaker parameter* terhadap *run-up* relative oleh EurOtop (EuroTop Team, 2018)

## 6. Alfansuri dkk, (2011)

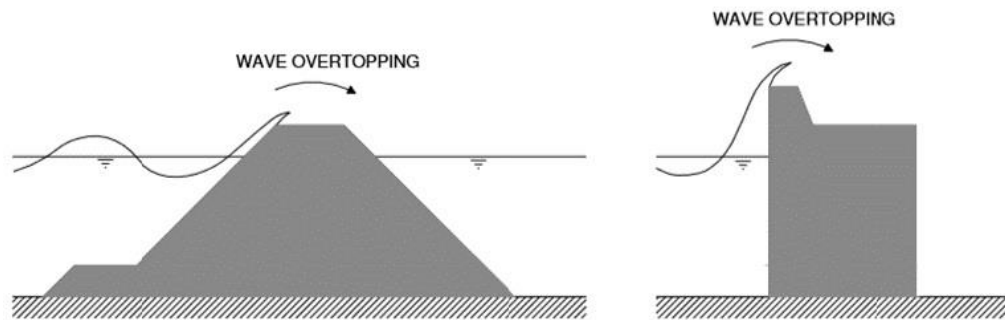
Selain pengaruh *breaker parameter* terhadap *run-up relative*, parameter gelombang tak berdimensi lainnya seperti pengaruh kecuraman gelombang/*wave steepness* juga diteliti oleh beberapa peneliti, dimana salah satunya adalah Alfansuri, dkk, yang melakukan penelitian secara analitis. Hasil penelitiannya berupa grafik pengaruh *wave steepness* terhadap *run-up relative* diperlihatkan pada Gambar 25.



Gambar 25. Grafik hubungan *wave steepness* terhadap *run-up* relative secara analitis oleh Alfansuri (Alfansuri, Suntoyo, & Armono, 2011)

## F. *Overtopping* Gelombang

Limpasan gelombang (*overtopping*) terjadi ketika ketinggian puncak struktur pantai lebih rendah daripada level gelombang *run-up* potensial; gelombang yang merayap di permukaan lereng struktur mencapai dan melewati puncak struktur. Jika total ketinggian *run-up* melebihi ketinggian puncak, maka limpasan gelombang melalui struktur berpotensi terjadi signifikan. *Overtopping* gelombang adalah fungsi dari parameter hidrolis seperti tinggi gelombang, periode gelombang, panjang gelombang, dan permukaan air serta fungsi dari parameter struktur seperti geometris, tata letak dan bahan sifat struktur. Adapun sketsa dan Gambar mengenai *overtopping* gelombang dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Definisi gelombang *overtopping* pada struktur

*Overtopping* gelombang adalah proses yang sangat dinamis dan tidak teratur. Proses ini dapat dicirikan oleh debit *overtopping* gelombang. Dalam realita, tidak ada debit konstan yang melimpas pada puncak struktur selama *overtopping*. Proses *overtopping* gelombang sangat acak dalam waktu, ruang, dan volume. Gelombang tertinggi akan mendorong volume air yang besar ke atas puncak dalam periode waktu yang singkat, sedangkan gelombang yang lebih rendah mungkin tidak menghasilkan limpasan apa pun.

Pemodelan fisik umumnya digunakan untuk mengkaji *overtopping* gelombang dan mengembangkan rumus empiris untuk memprediksinya. Banyaknya parameter relevan yang mempengaruhi fenomena ini membuatnya sulit untuk mengembangkan pendekatan teoritis atau numerik yang mewakili sifat *overtopping* dengan baik. Sebaliknya, tes eksperimental adalah metode yang mapan dan andal untuk menentukan gelombang *overtopping* rata-rata untuk struktur pantai (EurOtop 2018). Namun, rumus empiris yang sebenarnya tidak memprediksi *overtopping*

gelombang dan volume individual dengan sangat akurat karena skala dan efek model yang selalu ada pada tingkat tertentu dalam model fisik.

Perhitungan *overtopping* gelombang memiliki lebih banyak ketidakpastian dari pada perhitungan *run-up* gelombang. Ketika gelombang *run-up* pada model dapat mereplikasi nilai *run-up* yang diamati dengan kesalahan sekitar 20%, diperkirakan angka *overtopping* gelombang lebih sering keliru oleh pengaruh beberapa faktor (Kobayashi, 1999 in FEMA, 2005). Beberapa prediksi *overtopping* sangat sulit diprediksi secara tepat, mengingat fakta bahwa perubahan halus dalam kondisi gelombang, ketinggian air, karakteristik dan geometri struktur dapat memiliki efek yang sangat besar pada tingkat *overtopping*,

Pada lereng yang sangat curam atau dinding vertikal, *reflecting overtopping* terjadi ketika gelombang relatif kecil dalam kaitannya dengan kedalaman air lokal dan kecuraman gelombang yang lebih rendah. Pada *reflecting overtopping* gelombang *run-up* dan *run-down* pada lereng, menimbulkan berbagai beban yang relatif lancar, sehingga dikatakan gelombang dalam kondisi tidak pecah. Sebaliknya, *impacting overtopping* pada lereng curam terjadi ketika gelombang lebih besar dalam kaitannya dengan kedalaman air local, dan dikatakan gelombang dalam kondisi pecah.

Untuk dinding vertikal sederhana, pembagian antara kondisi *reflecting* dan *impacting overtopping* dibuat menggunakan parameter  $h^*$  (Besley & Allsop dalam FEMA, 2005).

$$h^* = \frac{d}{H} \left( \frac{2\pi d}{gT^2} \right) \quad (22)$$

Kondisi *reflecting* umumnya terjadi ketika nilai  $h^* \geq 0.3$ , dan kondisi *impacting* ketika nilai  $h^* < 0.3$  (Besley & Allsop dalam FEMA, 2005).

Debit *overtopping* gelombang,  $q$ , adalah debit rata-rata per meter linier lebar dan memiliki satuan  $m^3/s$  per m atau  $l/s$  per m. Alasan untuk menggunakan debit *overtopping* rata-rata adalah bahwa parameter ini dapat dianggap stabil pada sekitar 1000 gelombang (Verhaeghe et al. 2008 in Jiménez, 2017). Sebaliknya, volume gelombang *overtopping* dapat dihitung untuk kondisi gelombang tertentu dan debit rata-rata  $q$ . Volume dinyatakan dalam  $m^3$  per gelombang per meter lebar.

Debit *overtopping* rata-rata sering digunakan untuk menilai gelombang *overtopping* yang diijinkan. Debit *overtopping* rata-rata ini tentu saja tidak menggambarkan perilaku gelombang *overtopping* yang sebenarnya, di mana hanya gelombang besar yang akan mencapai puncak struktur dan memberi limpasan. *Overtopping* gelombang individual sangat random dengan kondisi waktu yang juga random dan setiap gelombang memberikan volume limpasan yang berbeda. Tapi deskripsi *overtopping* individu didasarkan pada *overtopping* rata-rata, sebagai durasi *overtopping* dikalikan dengan debit *overtopping* rata-rata ini memberikan volume total air yang melimpah oleh sejumlah gelombang *overtopping* tertentu.

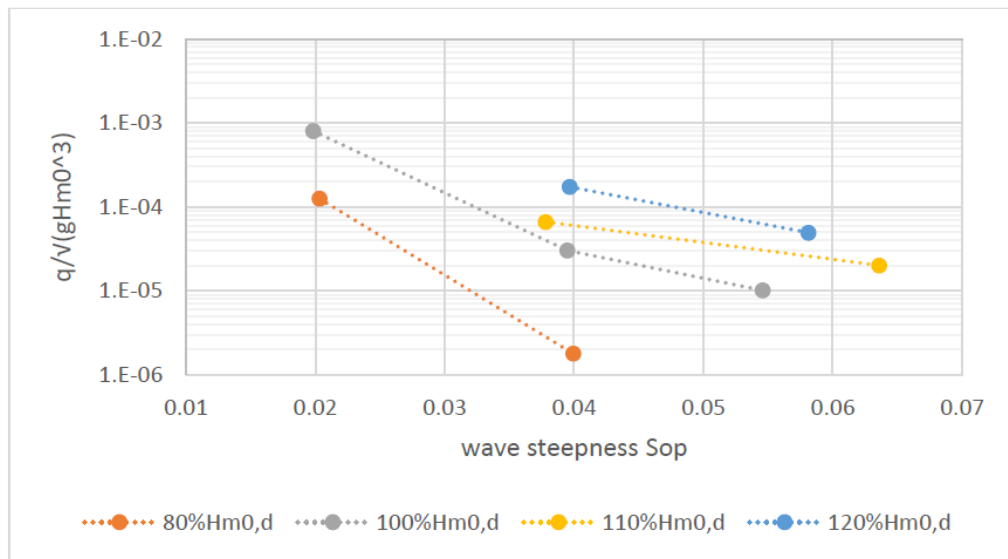
Sebagian besar metode dan prediksi untuk rumus jumlah *overtopping* rata-rata yang berasal dari pemodelan fisik pada fasilitas

laboratorium, mengarah pada pengembangan hubungan empiris antara jumlah debit *overtopping* dengan parameter gelombang, dan parameter struktur. Banyak peneliti telah berusaha untuk mengembangkan metode dan formula untuk memprediksi debit *overtopping* struktur pantai pada kondisi tertentu. Rumus prediksi ini sangat beragam dan dalam variasi hasil yang luas.

#### **1. Jiménez, (2017)**

Jimenez pada tahun 2017 meneliti secara experimental tentang gelombang *overtopping* pada breakwater susunan xbloc. Penelitian dilakukan pada wave flume laboratorium Delft University. Salah satu hasil penelitian memberikan grafik hubungan karakteristik gelombang yang digambarkan dalam parameter tak berdimensi yakni kecuraman gelombang atau *wave steepness* ( $H/L$ ) terhadap debit *overtopping* tak berdimensi dengan variasi tinggi gelombang datang ( $H_{m0}$ ). Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 27.



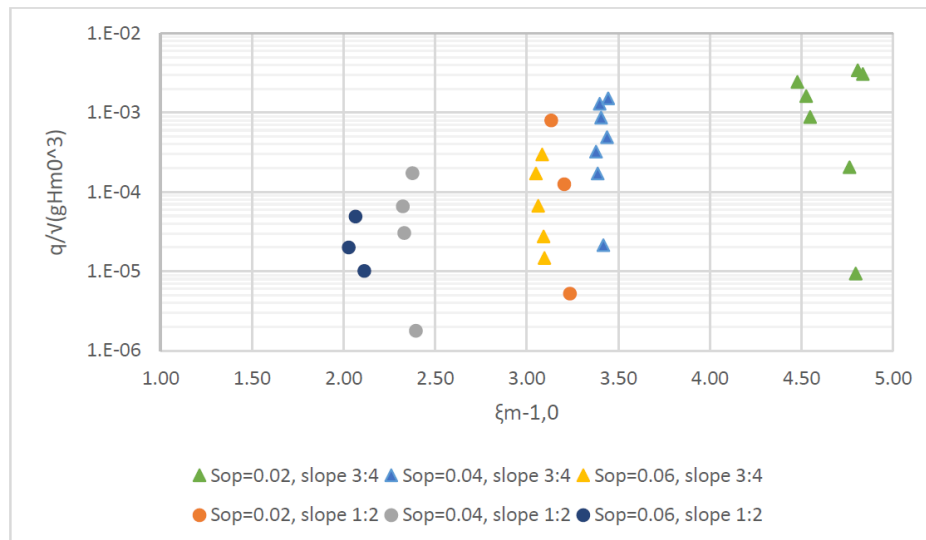


Gambar 27. Grafik hubungan kecuraman gelombang terhadap debit *overtopping* dengan variasi tinggi gelombang datang ( $H_{m0}$ ). oleh Jiménez (Jiménez, 2017)

Debit *overtopping* yang melimpas pada struktur, selain dipengaruhi oleh parameter gelombang dan parameter struktur, juga sangat dipengaruhi oleh kondisi bentukan gelombang pecah atau *breaker type*, yang merupakan parameter yang menggambarkan interaksi gelombang dengan struktur. *Breaker type* yang telah dijelaskan sebelumnya dapat berupa *spilling*, *Plunging*, *Collapsing* dan *Surging*. Diantara keempat tipe gelombang pecah tersebut, yang diprediksi dapat memberikan limpasan *overtopping* terbesar dibanding tiga tipe lainnya adalah tipe *surging*. Hal ini karena tipe *surging* gelombangnya dianggap terlambat pecah atau tidak pecah sama sekali.

Lebih lanjut, Jiménez meneliti pengaruh interaksi gelombang terhadap struktur yang dinyatakan dalam parameter tak berdimensi yaitu

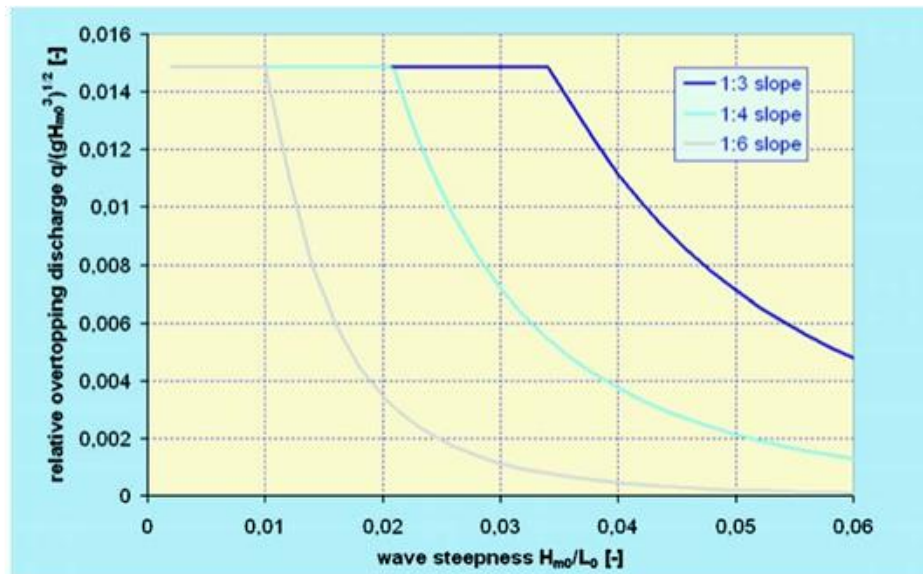
breaker parameter terhadap debit *overtopping*. Hasil penelitian tersebut diperlihatkan dalam grafik pada Gambar 28.



Gambar 28. Grafik pengaruh *breaker parameter* ( $\xi$ ) terhadap debit *overtopping* ( $q/(gHm0^3)^{0.5}$ ) oleh Jiménez (Jiménez, 2017)

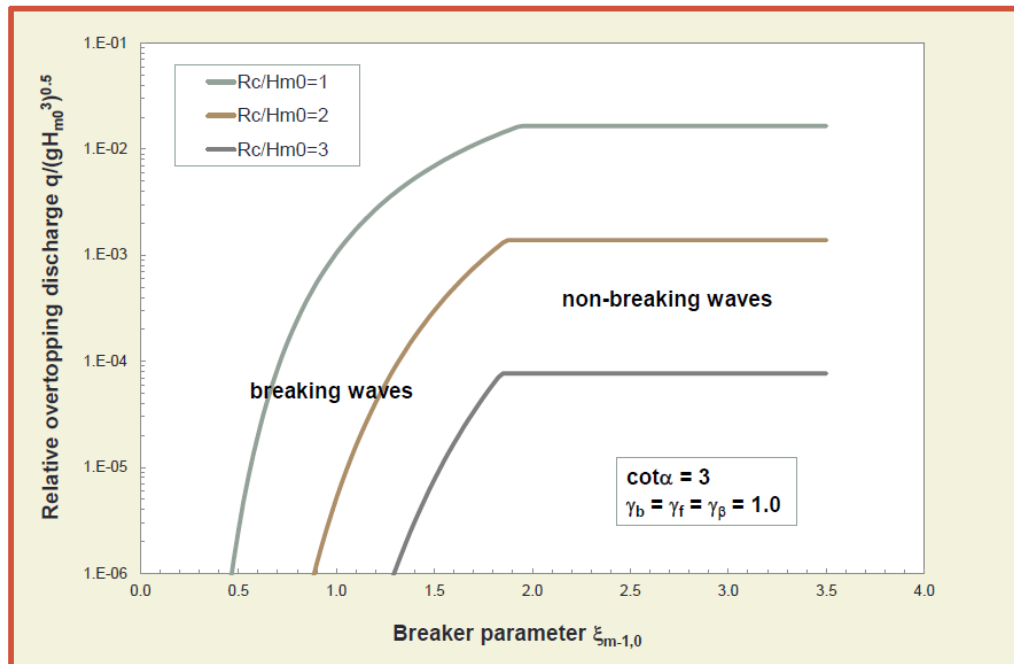
## 2. EurOtop, (2018)

Hubungan tak berdimensi antara parameter gelombang dan debit *overtopping* salah satunya juga dikeluarkan oleh EuroTop 2018. Pada Gambar 29, ditunjukkan grafik pengaruh karakteristik gelombang tak berdimensi (kecuraman gelombang/*wave steepness*) ( $Hm0/L0$ ) yaitu hubungan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang, terhadap debit *overtopping* gelombang tak berdimensi ( $q/(g.H^3)^{0.5}$ ), dimana hasil kajiannya menunjukkan bahwa debit *overtopping* menurun secara eksponensial seiring dengan semakin besarnya kecuraman gelombang (*wave steepness*).



Gambar 29. Grafik hubungan kecuraman gelombang dengan debit *overtopping* oleh EurOtop, 2018 (EuroTop Team, 2018)

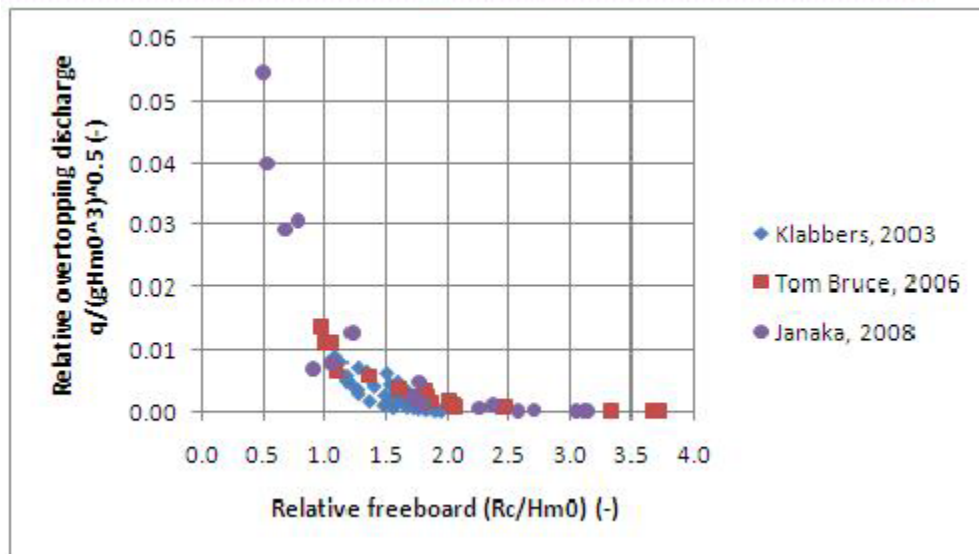
EurOtop juga mengkaji *breaker parameter* yaitu pengaruh parameter gelombang dan parameter struktur dan hubungannya terhadap debit *overtopping* dengan melakukan variasi pada *freeboard relative* ( $R_c/H_{m0}$ ). Grafik pengaruh *breaker parameter* tak berdimensi terhadap debit *overtopping* tak berdimensi oleh EurOtop, diperlihatkan pada Gambar 30.



Gambar 30. Grafik pengaruh *breaker parameter* ( $\xi$ ) terhadap debit *overtopping* ( $q/(gHm0^3)^{0.5}$ ) dengan variasi *freeboard relative* ( $Rc/Hm0$ ) oleh EurOtop (EuroTop Team, 2018)

### 3. Klabbers (2003), Tom Bruce (2006), Janaka (2008)

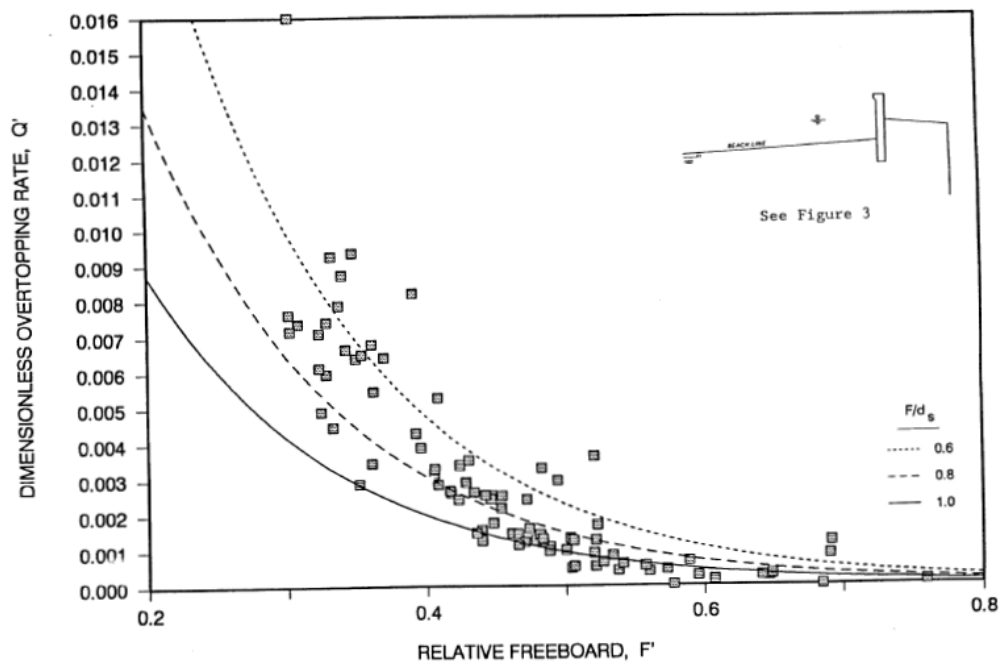
Klabbers, Tom Bruce dan Janaka dalam Alfansuri, dkk 2011, meneliti gelombang *overtopping* pada *breakwater* dengan kondisi penelitian masing-masing, untuk mendapatkan hubungan tak berdimensi antara tinggi *freeboard relative* struktur ( $Rc/Hm0$ ) terhadap debit *overtopping* ( $q/(gHm0^3)^{0.5}$ ). Hasil pengujian ketiga peneliti tersebut berupa grafik hubungan parameter tak berdimensi antara tinggi *freeboard* relatif terhadap debit *overtopping*, yang dirangkum oleh Alfansuri dkk, yang diperlihatkan pada Gambar 31. Dari hasil tersebut terlihat bahwa debit *overtopping* menurun secara eksponensial seiring dengan bertambahnya nilai tinggi *freeboard relative*.



Gambar 31. Grafik hubungan tinggi *freeboard* relative ( $R_c/H_{m0}$ ) terhadap debit *overtopping* ( $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ ) oleh Klabber, Tom Bruce dan Janaka. (Alfansuri, Suntoyo, & Armono, 2011)

#### 4. Ward dan Ahrens, (1992)

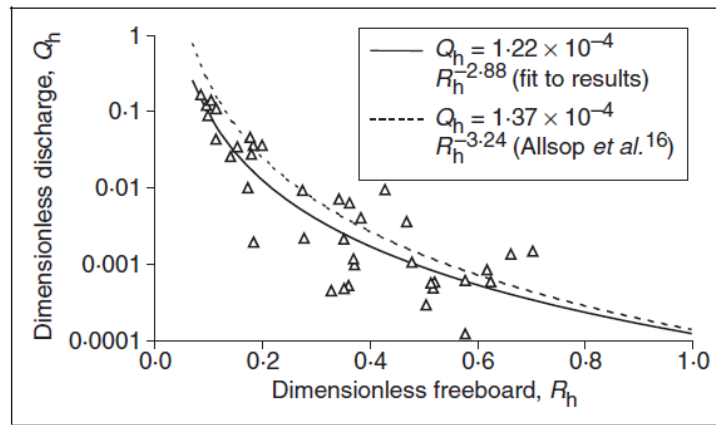
Ward dan Ahrens melakukan penelitian dengan model fisik untuk mendapatkan nilai debit *overtopping* pada beberapa tipe seawall yang sering digunakan. Salah satu hasil penelitian tersebut adalah hubungan antara tinggi *freeboard* relatif ( $F'$ ) terhadap debit *overtopping* ( $Q'$ ) yang dihasilkan. Dimana *freeboard* merupakan salah satu parameter struktur yang sangat penting dan berpengaruh dalam debit *overtopping*. Grafik hubungan *freeboard* relatif dengan debit *overtopping* tak berdimensi oleh Ward dan Ahrens diperlihatkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Grafik hubungan *freeboard* relative ( $F'$ ) terhadap debit *overtopping* ( $Q'$ ) oleh Ward dan Ahrens (Ward & P, 1992)

### 5. W. Allsop, (2005)

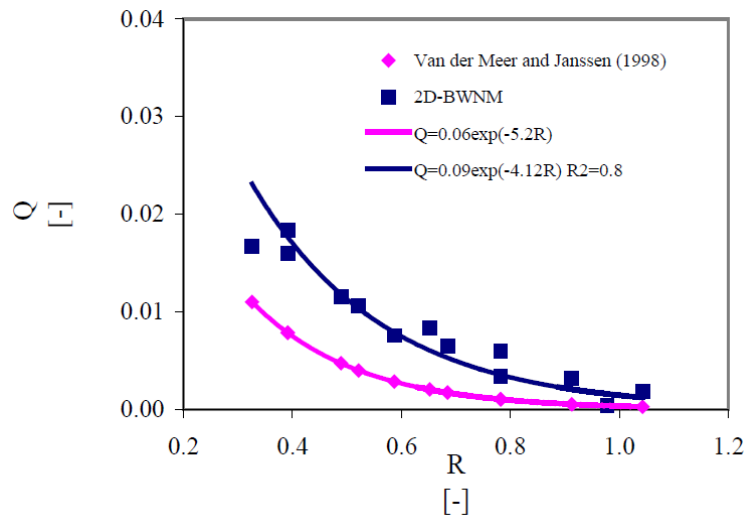
William Allsop, dkk meneliti tentang gelombang *overtopping* pada seawall dinding vertikal dan miring secara eksperimental. Hasil penelitian salah satunya adalah grafik hubungan tinggi *freeboard* relatif ( $Rh$ ) terhadap debit *overtopping* tak berdimensi ( $Qh$ ), yang menunjukkan penurunan secara eksponensial pada debit dengan bertambahnya *freeboard* relatif. Gambar 33 menunjukkan grafik tersebut.



Gambar 33. Grafik hubungan tinggi *freeboard relative* ( $R_h$ ) terhadap debit *overtopping* ( $Q_h$ ) oleh Allsop (Allsop, Bruce, Pearson, & Besley, 2005)

#### 6. Soliman, (2003)

Soliman pada thesis-nya untuk program Doctor degree di University of Nottingham, melakukan penelitian tentang aliran dan gelombang *overtopping* secara numeric pada struktur miring. Salah satu hasil penelitiannya adalah hubungan tak berdimensi antara *freeboard relative* ( $R$ ) terhadap debit *overtopping* ( $Q$ ), sebagaimana ditunjukkan pada grafik di Gambar 34.



Gambar 34. Grafik pengaruh *freeboard relative* ( $R$ ) terhadap debit *overtopping* ( $Q$ ) oleh Soliman (Soliman, 2003)

Secara umum, debit *overtopping* diekspresikan oleh dua tipe formula dibawah, dimana  $a$  dan  $b$  adalah koefisien yang berubah berdasarkan geometry struktur.  $Q$  dan  $R$  adalah parameter tak berdimensi dari debit *overtopping* dan tinggi *freeboard*.

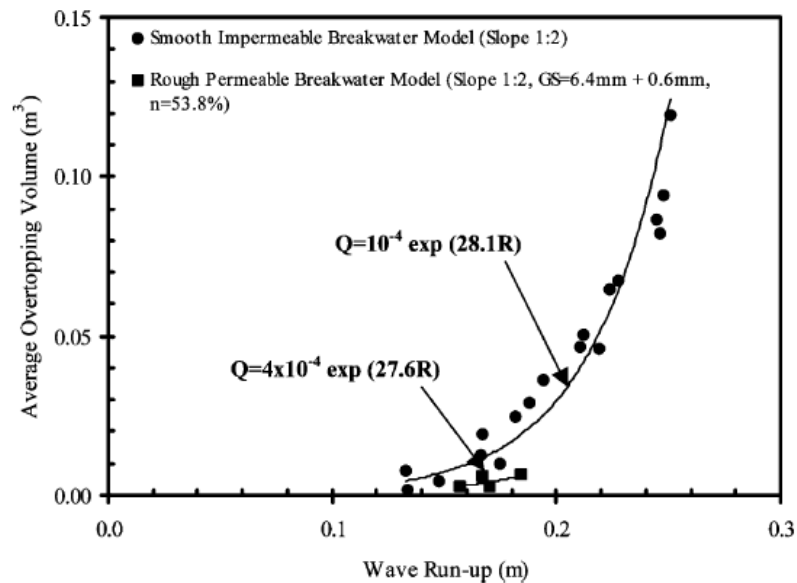
$$Q = a \exp(-bR) \quad (23)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (24)$$

### 7. N.J. Shankar, (2003)

Pada tahun 2003, dalam journal ocean engineering, N.J. Shankar dalam kajian eksperimentalnya tentang *run-up* gelombang pada armor breakwater, juga menghasilkan grafik hubungan antara *run-up* gelombang terhadap volume *overtopping* rata2, dimana hasilnya terlihat pada Gambar 35.





Gambar 35. Grafik hubungan berdimensi antara *run-up* gelombang terhadap volume *overtopping* rata-rata oleh N.J. Shankar (Shankar & Jayaratne, 2003)

## G. Hukum Dasar Model

### 1. Sifat Sebangun

Konsep dasar pemodelan dengan bantuan skala model adalah membentuk kembali masalah atau fenomena yang ada di prototip dalam skala yang lebih kecil, sehingga fenomena yang terjadi di model akan sebangun (mirip) dengan yang ada di prototip. Kesebangunan yang dimaksud adalah berupa sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik (Yuwono, 1996).

a. Sebangun Geometrik. Sebangun geometrik adalah suatu kesebangunan dimana bentuk yang ada di model sama dengan bentuk prototip tetapi berbeda ukuran. Perbandingan antara semua ukuran

panjang antara model dan prototip adalah sama. Sebangun geometrik dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (25)$$

dengan :

$n_L$  : skala panjang

$L_p$  : ukuran panjang prototip

$L_m$  : ukuran panjang model

b. Sebangun Kinematik. Sebangun kinematik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan aliran di 2 titik pada model dan prototip pada arah yang sama adalah sama besar. Skala kecepatan diberi notasi  $n_v$ , skala percepatan  $n_a$  dan skala waktu  $n_t$  didefinisikan sebagai berikut :

$$n_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{\left(\frac{L_p}{t_p}\right)}{\left(\frac{L_m}{t_m}\right)} = \frac{L_p t_m}{L_m t_p} = \frac{n_L}{n_t} \quad (26)$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{\left(\frac{v_p}{t_p}\right)}{\left(\frac{v_m}{t_m}\right)} = \frac{v_p t_m}{v_m t_p} = \frac{n_L}{n_t n_t} = \frac{n_L}{n_t^2} \quad (27)$$

$$n_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (28)$$

c. Sebangun Dinamik. Sebangun dinamik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan kinematik, serta perbandingan gaya-gaya yang bekerja pada model dan prototip untuk seluruh pengaliran pada arah yang sama adalah sama besar. Gaya-gaya yang dimaksud adalah gaya inersia, gaya tekanan, gaya berat, gaya gesek, gaya kenyal dan tegangan permukaan.

Beberapa sebangun dinamik yaitu sebangun dinamik *Reynold* (*reynold number*) yang diekspresikan sebagai perbandingan gaya inersia terhadap gaya gesek, sebangun dinamik *Froude* (*froude number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya gravitasi, bilangan *Cauchy* (*cauchy number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya elastik serta bilangan *Weiber* (*weiber number*) yaitu perbandingan antara gaya inersia dan gaya tegangan permukaan.

## 2. Angka *Froude*

Penelitian *run-up* dan *overtopping* gelombang terhadap gelombang yang merambat melalui pemecah gelombang, lebih banyak dipengaruhi gaya berat, sehingga dalam penelitian ini akan digunakan kesebangunan *Froude*.

Apabila suatu model dipelajari berdasarkan angka *Froude*, maka pengaruh gaya lain seperti gaya kental dan tegangan permukaan harus dihilangkan dengan membuat model yang besar dan permukaannya halus (Triatmodjo, 1996).

Angka *Froude* adalah akar perbandingan antara gaya inersia dan gaya berat.

$$Fr = \frac{F_I}{F_G} = \frac{\rho v^2 L^2}{\rho L^3 g} = \frac{v^2}{gL}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (29)$$

Angka *Froude* di model harus sama dengan angka *Froude* pada prototip. Sehingga skala *Froude*  $n_{Fr} = 1$ .

$$[Fr]_m = [Fr]_p$$

$$\left[ \frac{v}{\sqrt{gL}} \right]_m = \left[ \frac{v}{\sqrt{gL}} \right]_p \quad (30)$$

$$n_{Fr} = \frac{(Fr)_m}{(Fr)_p} = 1 \quad (31)$$

$$n_{Fr} = \frac{\left( \frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} \right)}{\left( \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}} \right)} = \frac{v_p \sqrt{g_m L_m}}{v_m \sqrt{g_p L_p}}$$

Sehingga :

$$n_{Fr} = \frac{n_v}{\sqrt{n_g n_L}} \quad (32)$$

Substitusi nilai  $n_v$  pada persamaan (26) ke persamaan (32) sehingga diperoleh :

$$n_{Fr} = \frac{\left(\frac{n_L}{n_t}\right)}{\sqrt{n_g n_L}} = \frac{n_L}{n_t (n_g n_L)^{1/2}} \quad (33)$$

Percepatan gravitasi pada prototip sama dengan pada model,  $n_g=1$ , sehingga :

$$n_{Fr} = \frac{n_L (n_L)^{-1/2}}{n_t} = \frac{n_L^{1/2}}{n_t} = \frac{\sqrt{n_L}}{n_t} \quad (34)$$

Substitusi nilai  $n_{Fr}$  pada persamaan (33) ke persamaan (34) sehingga diperoleh :

$$1 = \frac{\sqrt{n_L}}{n_t} \quad (35)$$

diperoleh skala waktu yang memenuhi prinsip kesebangunan *Froude* :

$$n_t = \sqrt{n_L} \quad (36)$$

## H. Metode Analisis Dimensi

Bilangan tak berdimensi digunakan untuk menyatakan hubungan antar parameter serta dipakai untuk mengGambarkan hasil-hasil penelitian. Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Beberapa cara/metode yang umum digunakan untuk analisis dimensi yaitu Metode *Basic Echelon*, Metode *Buckingham*, Metode *Rayleigh*, Metode *Stepwise* dan Metode *Langhaar* (Yuwono, 1996). Untuk penelitian ini digunakan metode *Langhaar* karena

variabel yang berpengaruh relatif sedikit serta metode ini tersusun sistemik.

Metode *Langhaar* menjelaskan fenomena model hidraulik dengan  $n$  parameter  $P_i$  dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Jika parameter tersusun oleh  $m$  elemen pokok maka produk bilangan tak berdimensi dapat diturunkan sejumlah  $(n-m)$ . Untuk keperluan teknik hidraulik biasanya ada 3 elemen pokok yaitu Massa ( $M$ ), Panjang ( $L$ ) dan waktu ( $T$ ) (Yuwono, 1996).

Bilangan tak berdimensi ( $\pi_j$ ) dapat dinyatakan :

$$\pi_j = P_1^{k_1} P_2^{k_2} P_3^{k_3} \dots P_n^{k_n} \quad (37)$$

Dimana  $\pi_j =$  produk bilangan tak berdimensi dengan  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ . jika  $P_i$  mempunyai dimensi  $M^{\alpha_i}, L^{\beta_i}, T^{\gamma_i}$ , maka dapat ditulis :

$$\pi_j = (M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\gamma_1})^{k_1} * (M^{\alpha_2} L^{\beta_2} T^{\gamma_2})^{k_2} * \dots * (M^{\alpha_n} L^{\beta_n} T^{\gamma_n})^{k_n}$$

atau

$$\pi_j = (M^{\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n}) * (L^{\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n}) * (T^{\gamma_1 k_1 + \gamma_2 k_2 + \dots + \gamma_n k_n}) \quad (38)$$

$\pi_j$  merupakan bilangan tak berdimensi jika :

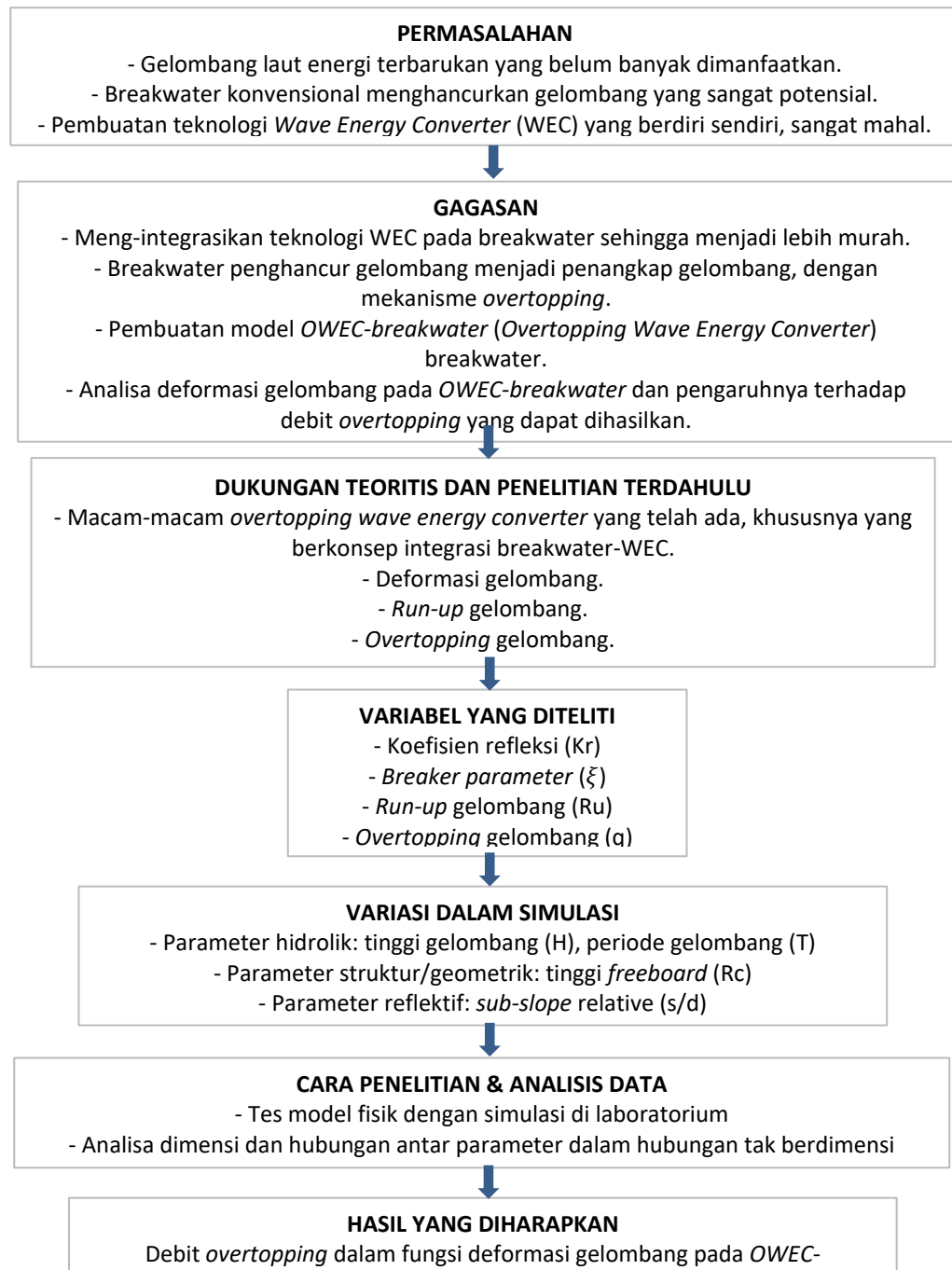
$$\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n = 0$$

$$\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n = 0$$

$$\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots + \tau_n k_n = 0 \quad (39)$$

## I. Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran penelitian yang dilakukan, disajikan dalam bentuk bagan alir pada Gambar 36.



Gambar 36. Kerangka pikir penelitian

## J. Hipotesis

Gelombang yang datang dan membentur struktur pantai maka gelombang tersebut akan mengalami *run-up* pada lereng struktur, dan apabila *run-up* yang terjadi melebihi puncak struktur, maka gelombang akan melimpas atau yang disebut dengan *overtopping* gelombang. Gelombang yang datang mengalami deformasi, oleh karena adanya interaksi antara parameter gelombang dan parameter struktur serta parameter kedalaman. Karena itu perlu dirumuskan hubungan parameter terikat tersebut dengan beberapa parameter yang signifikan berpengaruh.

Berdasarkan landasan teori dan tinjauan pustaka, parameter yang berpengaruh pada debit *overtopping* ( $q$ ) adalah, tinggi gelombang datang ( $H_i$ ), *breaker parameter* ( $\xi$ ), *run-up* gelombang ( $R_u$ ), tinggi *freeboard* ( $R_c$ ) dan tinggi *sub-slope* relatif ( $s/d$ ). Hipotesis diatas dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut :

$$q = f(H_i, \xi, R_u, R_c, s/d) \quad (40)$$

dengan :

$q$  : debit *overtopping* gelombang.

$\xi$  : *breaker parameter/irribaren number/surf similarity* ( $f(H_i, L, \tan\theta)$ ).

$R_u$  : tinggi *run-up* gelombang.

$R_c$  : tinggi *freeboard*.

$s/d$  : *sub-slope* relatif.