



DISERTASI - MO236505

STUDI HIDRODINAMIKA PEMECAH GELOMBANG TERAPUNG BERPORI

SUJANTOKO
04111760010023

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D
Prof. Suntoyo, ST, MEng, Ph.D

PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT SEPULUH NOPEMBER SURABAYA
SURABAYA
2024

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Sujantoko

NRP. 04111760010023

dengan Judul Disertasi

Studi Hidrodinamika Pemecah Gelombang Terapung Berpori

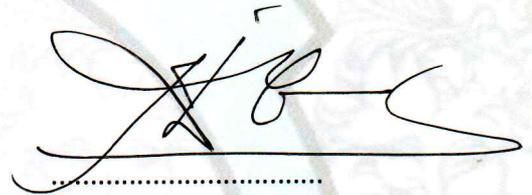
Tanggal Ujian: 30 Juli 2024

Periode Wisuda: September 2024

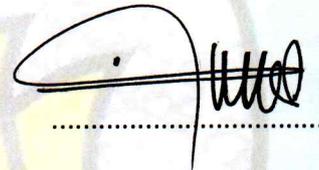
Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
NIP. 195812261984031002

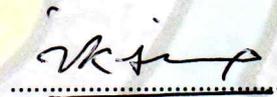


2. Prof. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 197107231995121001

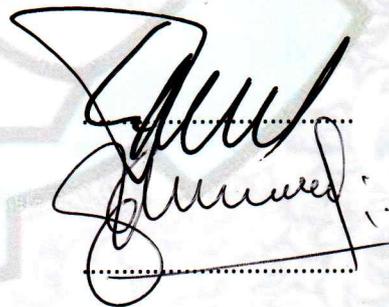


Penguji:

1. Prof. Dr. I Ketut Suastika, M.Sc.
NIP. 196912312006041178



2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D
NIP. 196412281990031002



3. Dr. Ir. Erwandi, M.Eng.
NIP. 196604161991031003

Kepala Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan




Prof. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 197304152000031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Disertasi dengan judul “Studi Hidrodinamika Pemecah Gelombang Terapung Berpori”. Selama melaksanakan penelitian dan penulisan laporan Disertasi ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko M.Sc., Ph.D, Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc., Ph.D (pensiun) dan Prof. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. sebagai promotor dan co-promotor yang senantiasa memberikan bimbingan akademik, ilmu, motivasi, dan saran dalam penyelesaian disertasi ini.
2. Tim Penguji Prof. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc. (Teknik Perkapalan ITS), Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D (Teknik Mesin ITS), dan Dr. Ir. Erwandi, M.Eng. (LHI BRIN) yang telah memberikan kritik dan saran demi perbaikan disertasi ini.
3. Orang tua penulis, istri tercinta (Nani Kurniati, S.T., M.T., Ph.D.), anak-anak penulis (Safira Azzahra, S.T., Ansyar Airy, S.T., Esa Lahan, S.T., M.T.) yang memberikan dukungan materiel, moril dan doa sehingga penulis punya kekuatan dalam menyelesaikan studi ini.
4. Kolega penulis DT. Kelautan ITS yang telah memberikan dukungan dan bimbingan akademik selama penulis studi.
5. Rekan-rekan seperjuangan penulis Alm. Sholihin, Hasanudin, dan Achmad Baidowi yang telah banyak memberikan bantuan selama studi.
6. Terima kasih dan penghargaan juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan semuanya atas bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki banyak kekurangan, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun agar penelitian ini dapat disempurnakan dan bermanfaat bagi pemerhati di bidang hidrodinamika pantai dan laut.

Surabaya, 1 Agustus 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI HIDRODINAMIKA PEMECAH GELOMBANG TERAPUNG BERPORI

Nama Mahasiswa : Sujantoko
NRP : 04111760010023
Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D
Co-Supervisor : Prof. Suntoyo, ST, MEng, Ph.D

ABSTRAK

Pemecah Gelombang Terapung Berpori atau dikenal sebagai *Porous Floating Breakwater* (PFB) didefinisikan sebagai *Floating Breakwater* (FB) untuk pelindung pantai yang memiliki tipikal kontur dasar laut yang curam, dalam dan berombak relatif besar. Struktur ini dirancang terapung, tertambat dan berpori agar mampu meredam gelombang sekaligus mengurangi efek sedimentasi. PFB dalam penelitian ini dirancang untuk melindungi berlangsungnya aktivitas penting atau obyek vital di pantai terhadap hempasan gelombang yang berlebihan sekaligus melindungi morfologi pantai terhadap kemungkinan perubahan ekosistem yang merugikan akibat erosi, gelombang, arus maupun sedimentasi. FB konvensional pada umumnya mengandalkan pada rangkaian pelampung tertambat dengan bentuk bola, kotak maupun silinder dengan berbagai variasinya, yang umumnya mempunyai intensitas olah-gerak utamanya *heave* yang berlebihan, khususnya saat tinggi gelombang lebih dari 3 meter, sehingga efektifitas fungsi pemecahan gelombang menjadi rendah. Konsekuensinya, desain konvensional yang responsif terhadap gaya gelombang ini akan mengakibatkan beban yang diterima tali tambat juga akan meningkat. Dengan demikian, desain konvensional ini akan menyebabkan konstruksi yang besar, berat dan rumit dengan biaya dan instalasi yang mahal.

PFB dalam penelitian ini dirancang untuk dapat mereduksi transmisi dan mengendalikan refleksi maupun disipasi gelombang, serta mempunyai bentuk dengan olah gerak yang minimum. Sebagai suatu konsep pelindung pantai yang baru, PFB akan memerlukan penelitian yang komprehensif dan menerus dalam jangka panjang untuk pengembangan serta penyempurnaan desainnya secara bertahap. Pada penelitian ini akan dikaji efek hidrodinamika bentuk desain PFB yang efisien dan efektif melalui kajian kinerjanya dengan pendekatan numerik dan eksperimen laboratorium. *Tahap kajian uji laboratorium* dengan aktivitas seperti koleksi data dan referensi serta hasil penelitian terdahulu, review terhadap berbagai alternatif PFB, pembuatan model fisik untuk eksperimen di lab. Flume Tank dengan skala tertentu, perancangan sistem terkait, persiapan dan pelaksanaan percobaan, dan analisis hasil percobaan. Tahap ini menguji karakteristik gelombang (refleksi & transmisi), beban tali tambat dan gerakan struktur. *Tahap Kajian Numerik*, yang memuat aktivitas seperti, pemodelan dan perhitungan simulasi numerik, serta langkah komparasi dan validasi hasil pemodelan numerik dengan hasil eksperimen. Pada tahap ini dikaji secara numerik respons gerakan, beban tali tambat dan karakteristik gelombang di sekitar struktur. Penetapan desain PFB yang optimal berdasarkan efek hidrodinamika yang ditentukan telah diketahui karakteristiknya untuk berbagai kondisi gelombang. Umpan balik dari berbagai kajian uji model fisik dan numerik keseluruhan kinerja akan dievaluasi sebagai kajian menetapkan definisi desain PFB yang efisien dan efektif.

Kata kunci: floating breakwater, pori, tali tambat, gerakan, transmisi, refleksi

Halaman ini sengaja dikosongkan

HYDRODYNAMICS STUDY OF POROUS FLOATING BREAKWATER

By : Sujantoko
Student Identify Number : 04111760010023
Supervisor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D
Co-Supervisor : Prof. Suntoyo, ST, MEng, Ph.D

ABSTRACT

Porous floating breakwater (PFB) is a floating breakwater (FB) for coastal protection. It has a steep and deep seabed contour and has relatively large waves. This structure is designed to be floating, moored, and porous so that it can dampen waves while reducing sedimentation. The PFB used in this research was designed to protect essential activities and vital objects on the beach from excessive waves while protecting the beach morphology against possible detrimental ecosystem changes due to erosion, waves, currents, or sedimentation. Conventional FBs generally rely on a series of moored buoys in the form of balls, squares, or cylinders with various variations. These buoys generally have excessive heave intensities, especially when the wave height exceeds 3 m; thus, the effectiveness of the wave-breaking function is low. As a result, conventional designs that are responsive to wave forces also increase the load received by the mooring ropes. Thus, conventional design leads to large, heavy, and complicated construction with expensive installation and costs.

The PFB used in this research is designed to reduce transmission and control wave reflection and dissipation, and it has a shape with minimum movement. As a new coastal protection concept, the PFB will require comprehensive and continuous long-term research to develop and refine its design gradually. In this research, the hydrodynamic effects of efficient and effective PFB design forms are studied through performance studies using numerical approaches and laboratory experiments. The laboratory test study stage involves collecting data references and previous research results, reviewing various PFB alternatives, and making physical models for laboratory experiments. Flume Tank with a specific scale, related system design, preparation and implementation of experiments, and analysis of experimental results. This stage tests wave characteristics (reflection and transmission), mooring line loads, and structural motion were tested in this stage. The numerical study stage includes activities such as numerical simulation modelling and calculations, as well as comparison and validation steps for comparing numerical modelling results with experimental results. The structure's motion response, mooring line load, and wave characteristics were numerically studied. The optimal PFB design based on hydrodynamic effects has known characteristics under various wave conditions. Feedback from various physical and numerical model test studies on the overall performance will be evaluated as this study defines an efficient and effective PFB design.

Keywords: floating breakwater, porous, mooring line, motion, transmission, reflection

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

B	=	Lebar floating breakwater (m)
d	=	Kedalaman air (m)
D	=	Sarat air floating breakwater (m)
E_I	=	Total energi gelombang datang (J)
E_T	=	Total energi gelombang transmisi (J)
E_R	=	Total energi gelombang refleksi (J)
E_L	=	Total energi disipasi gelombang (J)
FB	=	Floating Breakwater
F_i	=	Gaya inersia (N)
F_g	=	Gaya gravitasi (N)
F_n	=	Froude number
g	=	percepatan gravitasi (m/s^2)
H	=	Tinggi gelombang (m)
H_i	=	Tinggi gelombang datang (m)
H_r	=	Tinggi gelombang refleksi (m)
H_t	=	Tinggi gelombang transmisi (m)
H_l	=	Tinggi gelombang disipasi (m)
H/gT^2	=	Wave steepness
K_T	=	Koefisien transmisi gelombang
K_R	=	Koefisien refleksi gelombang
k	=	Angka gelombang
LC	=	Load Cell
L	=	Panjang gelombang (m)
L_p	=	Dimensi panjang prototipe
L_m	=	Dimensi panjang model
PFB	=	Porous Floating Breakwater
RAO	=	Response Amplitude Operator
SWL	=	Sea Water Line (m)

t	= Waktu (s)
T	= Periode gelombang (s)
WP	= Wave Probe
x	= Orientasi sumbu horizontal (m)
y	= Orientasi sumbu melintang (m)
z	= Orientasi sumbu vertikal (m)
α	= Sudut gelombang datang ($^{\circ}$)
$\eta(x,t)$	= Elevasi muka air (m)
ρ	= massa jenis air sekitar struktur (kg/m^3)
ζ_0	= amplitudo gelombang (m)
ω	= frekuensi gelombang (rad/s)
λ	= Rasio skala model dengan prototipe

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN DISERTASI	i
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISTILAH/SIMBUL	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	9
2.1 Tinjauan Pustaka	9
2.1.1 Perkembangan Floating Breakwater	9
2.1.2 Klasifikasi Floating Breakwater	12
2.1.2.1 Floating Breakwater Tipe Box	13
2.1.2.2 Floating Breakwater Tipe Ponton	17
2.1.2.3 Floating Breakwater Tipe Frame	21
2.1.2.4 Floating Breakwater Tipe Mat	25
2.1.2.5 Floating Breakwater Tipe Tethered Float	28
2.1.2.6 Floating Breakwater Tipe Pelat Horizontal	29
2.1.2.7 Floating Breakwater Tipe Porous	32
2.2 Dasar Teori	44
2.2.1 Transformasi Energi Gelombang	44

2.2.2 Hidrodinamika Gerakan Struktur Terapung	47
2.2.2.1 Mode Gerakan Struktur Terapung	47
2.2.2.2 Beban Hidrodinamika Struktur Terapung	47
2.2.2.3 Persamaan Gerak	50
2.2.2.4 Respons Amplitude Operator (RAO)	51
2.2.3 Sistem Mooring	52
2.2.4 Kesebangunan Model	53
2.2.4.1 Kesamaan Geometri	55
2.2.4.2 Kesamaan Kinematik	55
2.2.4.3 Kesamaan Dinamik	56
2.3 Keterbaruan dan Orisinalitas Penelitian	58
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	61
3.1 Metodologi Eksperimen	61
3.1.1 Skala Model Fisik	62
3.1.2 Model PFB	63
3.1.3 Gelombang Uji	65
3.1.4 Peralatan Uji Lab	66
3.1.5 Kalibrasi Wave Probe dan Load Cell	68
3.1.6 Analisa Transmisi dan Refleksi Gelombang	73
3.2 Metodologi Pemodelan Numerik	74
3.2.1 Transmisi dan Refleksi Gelombang pada PFB	74
3.2.1.1 Flow3D	74
3.2.1.2 Model Numerik Refleksi dan Transmisi Gelombang	77
3.2.2 Respons Amplitude Operator dan Tegangan Mooring	80
3.2.2.1 Pemodelan Numerik	80
3.2.2.2 Konvergensi Model	81
3.2.2.3 Validasi Hidrostatik	84

BAB IV ANALISA HASIL EKSPERIMEN	87
4.1 Koefisien Transmisi dan Refleksi FB	87
4.1.1 Perbandingan Kinerja pada Model FB	87
4.1.2 Pengaruh Slope pada FB	89
4.1.3 Pengaruh Porositas pada FB	91
4.2 Tegangan mooring pada FB	93
4.2.1 Tegangan Mooring pada Sisi <i>Seaward</i> dan <i>Leeward</i> FB	93
4.2.2 Pengaruh Slope pada Tegangan Mooring FB	97
4.2.3 Pengaruh Porositas pada Tegangan Mooring FB	97
BAB V ANALISA PEMODELAN NUMERIK	101
5.1 Performance Hidrodinamika Floating Breakwater	101
5.1.1 Validasi Koefisien Transmisi Gelombang (K_T)	101
5.1.2 Validasi Koefisien Refleksi Gelombang (K_R)	104
5.1.3 Validasi Gaya Mooring	106
5.1.4 Pengaruh Sudut Mooring pada K_T and K_R	108
5.1.5 Pengaruh Elevasi Muka Air pada K_T dan K_R	109
5.2 Performance Hidrodinamika pada Berbagai Layout FB	111
5.2.1 Respons Dinamis Gerakan FB	111
5.2.2 Pemodelan Floating Breakwater Array	118
5.3 Kontribusi Keilmuan	122
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	129
6.1 Kesimpulan	129
6.1.1 Kinerja Hidrodinamika FB	129
6.1.2 Tegangan Mooring FB	130
6.1.3 Kinerja Hidrodinamika pada Berbagai Layout FB	130
6.2 Saran	131
DAFTAR PUSTAKA	133

LAMPIRAN

L1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Breakwater konvensional	2
Gambar 1.2	Perbandingan biaya konstruksi berbagai jenis breakwater terhadap kedalaman air	3
Gambar 1.3	Floating breakwater	4
Gambar 1.4	Konstruksi floating breakwater di pelabuhan Monaco	4
Gambar 1.5	Konstruksi floating breakwater di pel. Messolonghi Greece	5
Gambar 2.1	FB tipe box	16
Gambar 2.2	FB tipe double-box	16
Gambar 2.3	FB tipe pile	16
Gambar 2.4	Geometri FB	17
Gambar 2.5	FB twin-pontoons	19
Gambar 2.6	FB dual-pontoons	20
Gambar 2.7	FB single dan double-Pontoons	20
Gambar 2.8	FB double-pontoons dengan pneumatic chamber	21
Gambar 2.9	FB double-pontoons dengan cage	21
Gambar 2.10	FB twin-log	23
Gambar 2.11	FB tipe a-frame	23
Gambar 2.12	Model tes dan instalasi FB di pelabuhan Brownsville Marina di teluk Orchard 1999	23
Gambar 2.13	FB Y-frame	24
Gambar 2.14	FB tipe cage berbentuk frame silinder	24
Gambar 2.15	FB dengan rangka struktur	24
Gambar 2.16	FB tipe mat: wave-maze	26
Gambar 2.17	FB tipe mat: Goodyear	27
Gambar 2.18	FB tipe mat: Wave-Guard	27
Gambar 2.19	FB dengan model pipa PVC	27
Gambar 2.20	FB tethered-float	29
Gambar 2.21	FB tipe board-net	31
Gambar 2.22	Pelat Terendam	31

Gambar 2.23	Semi Immersed breakwater dengan pelat berpori	35
Gambar 2.24	Skema eksperimen silinder berpori	35
Gambar 2.25	Konfigurasi PGT terapung berpori	36
Gambar 2.26	FB pipa tegak lurus berpori	36
Gambar 2.27	FB terapung dengan pelat sisi berpori	37
Gambar 2.28	FB pelat berpori 4-lapis horizontal	37
Gambar 2.29	FB Berpori	37
Gambar 2.30	Persen energi kinetik terhadap kedalaman relatif z/h	45
Gambar 2.31	Definisi sket gelombang refleksi dan datang	46
Gambar 2.32	Derajat kebebasan struktur apung	48
Gambar 2.33	Cara pemasangan siste mooring FB	53
Gambar 2.34	Sistem tambat tipe catenary dan taut	54
Gambar 3.1	Diagram alir eksperimen PFB di Wave Flume	62
Gambar 3.2	Bagian-bagian PFB	64
Gambar 3.3	Model PFB	65
Gambar 3.4	Peralatan di flume tank	67
Gambar 3.5	Layout posisi dan alat ukur ekperimen PFB	69
Gambar 3.6	Susunan perangkat pengukuran tegangan Mooring PFB	70
Gambar 3.7	Prosedur kalibrasi wave probe	70
Gambar 3.8	Kalibrasi wave probe sebelum dan sesudah ekperimen	71
Gambar 3.9	Hasil kalibrasi load cell	73
Gambar 3.10	Diagram alir koefisien refleksi gelombang dengan metode Goda dan Suzuki	74
Gambar 3.11	Diagram alir pemodelan numerik PFB	75
Gambar 3.12	Contoh geometri 3D model floating breakwater	78
Gambar 3.13	Pemodelan floating breakwater pada wave tank	78
Gambar 3.14	Domain komputasi kondisi batas	78
Gambar 3.15	Kontur elevasi muka air	79
Gambar 3.16	Profil elevasi muka air	79
Gambar 3.17	Vektor kecepatan aliran di sekitar PFB	80

Gambar 3.18	Profil kecepatan aliran di permukaan struktur dan setelah melewati pori pada FB	80
Gambar 3.19	Konvergensi <i>time step</i>	83
Gambar 3.20	Konvergensi ukuran <i>mesh</i>	83
Gambar 3.21	Model pontoon Ji et al. [114]	84
Gambar 3.22	<i>Trend</i> gerakan heave pada model ponton studi dan Ji et al, 2018	84
Gambar 4.1	Perilaku hidrodinamik transmisi gelombang pada model FB	88
Gambar 4.2	Perilaku hidrodinamik refleksi gelombang pada model FB	89
Gambar 4.3	Pengaruh perubahan slope terhadap KT pada model 2 dan 4	90
Gambar 4.4	Pengaruh perubahan slope terhadap KR pada model 2 dan 4	90
Gambar 4.5	Pengaruh perubahan slope terhadap KT pada model 3 dan 5	90
Gambar 4.6	Pengaruh perubahan slope terhadap KR pada model 3 dan 5	91
Gambar 4.7	Dampak perubahan porositas terhadap KT pada model 2 dan 3	92
Gambar 4.8	Dampak perubahan porositas terhadap KR pada model 2 dan 3	92
Gambar 4.9	Dampak perubahan porositas terhadap KT pada model 4 dan 5	93
Gambar 4.10	Dampak perubahan porositas terhadap KR pada model 4 dan 5	93
Gambar 4.11	Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 1	95
Gambar 4.12	Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 2	95
Gambar 4.13	Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 3	95
Gambar 4.14	Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 4	96
Gambar 4.15	Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 5	96
Gambar 4.16	Tegangan mooring pada sisi seaward pada lima model FB	96
Gambar 4.17	Tegangan mooring pada arah leeward dalam lima model FB	97
Gambar 4.18	Pengaruh slope terhadap tegangan mooring FB tanpa porositas	98
Gambar 4.19	Pengaruh slope terhadap tegangan mooring FB dengan porositas 5%.	98

Gambar 4.20	Pengaruh porositas terhadap tegangan mooring FB pada slope 45°	99
Gambar 4.21	Pengaruh porositas terhadap tegangan mooring FB pada slope 60°	99
Gambar 5.1	Validasi K_T model 1 hasil numerik dan eksperimen	102
Gambar 5.2	Validasi K_T model 2 hasil numerik dan eksperimen	102
Gambar 5.3	Validasi K_T model 3 hasil numerik dan eksperimen	102
Gambar 5.4	Validasi K_T model 4 hasil numerik dan eksperimen	103
Gambar 5.5	Validasi K_T model 5 hasil numerik dan eksperimen	103
Gambar 5.6	Validasi K_R model 1 hasil numerik dan eksperimen	104
Gambar 5.7	Validasi K_R model 2 hasil numerik dan eksperimen	104
Gambar 5.8	Validasi K_R model 3 hasil numerik dan eksperimen	105
Gambar 5.9	Validasi K_R model 4 hasil numerik dan eksperimen	105
Gambar 5.10	Validasi K_R model 5 hasil numerik dan eksperimen	105
Gambar 5.11	Validasi gaya mooring model 1 hasil numerik & eksperimen	107
Gambar 5.12	Validasi gaya mooring model 2 hasil numerik & eksperimen	107
Gambar 5.13	Validasi gaya mooring model 3 hasil numerik & eksperimen	107
Gambar 5.14	Validasi gaya mooring model 4 hasil numerik & eksperimen	108
Gambar 5.15	Validasi gaya mooring model 5 hasil numerik & eksperimen	108
Gambar 5.16	Pengaruh sudut mooring terhadap K_T	109
Gambar 5.17	Pengaruh sudut mooring terhadap K_R	109
Gambar 5.18	Pengaruh elevasi muka air terhadap K_T	110
Gambar 5.19	Pengaruh elevasi muka air terhadap K_R	111
Gambar 5.20	Orientasi sumbu x, y dan z pada FB	111
Gambar 5.21	RAO gerakan surge pada model 1 FB	113
Gambar 5.22	RAO gerakan sway pada model 1 FB	114

Gambar 5.23	RAO gerakan heave pada model 1 FB	114
Gambar 5.24	RAO gerakan roll pada model 1 FB	114
Gambar 5.25	RAO gerakan pitch pada model 1 FB	115
Gambar 5.26	RAO gerakan yaw pada model 1 FB	115
Gambar 5.27	RAO gerakan surge pada berbagai model FB	116
Gambar 5.28	RAO gerakan sway pada berbagai model FB	117
Gambar 5.29	RAO gerakan heave pada berbagai model FB	117
Gambar 5.30	RAO gerakan pitch pada berbagai model FB	117
Gambar 5.31	RAO gerakan yaw pada berbagai model FB	118
Gambar 5.32	Hinged joint dalam Ansys Aqwa	118
Gambar 5.33	Model connector jenis hinge joint pada I-shape dan V-shape FB	119
Gambar 5.34	K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 0°	120
Gambar 5.35	K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 30°	120
Gambar 5.36	K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 60°	120
Gambar 5.37	K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 0°	121
Gambar 5.38	K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 30°	121
Gambar 5.39	K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 60°	121
Gambar 5.40	Perbandingan gaya mooring pada layout I-shape dan V-shape	122

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Investigasi berbagai floating breakwater tipe box	38
Tabel 2.2	Investigasi berbagai floating breakwater tipe pontoon	39
Tabel 2.3	Investigasi berbagai floating breakwater tipe frame	40
Tabel 2.4	Investigasi berbagai floating breakwater tipe mat, tethered-float dan pelat horizontal	41
Tabel 2.5	Investigasi berbagai floating breakwater tipe porous	42
Tabel 2.6	Faktor pengali model terhadap prototype pada berbagai variable yang digunakan dalam skala Froude	57
Tabel 3.1	Material model PFB	64
Tabel 3.2	Data model PFB untuk eksperimen	64
Tabel 3.3	Variasi input model eksperimen di flume tank	66
Tabel 3.4	Hasil kalibrasi wave probe sebelum dan pasca eksperimen	71
Tabel 3.5	Hasil pengukuran beban pada load cell	72
Tabel 3.6	Variasi time step	82
Tabel 3.7	Variasi ukuran mesh	82
Tabel 3.8	Validasi model single FB	85
Tabel 3.9	Validasi displasemen FB array	85
Tabel 4.1	Tegangan mooring pada sisi seaward and leeward	94
Table 5.1	Validasi K_T pada berbagai model FB	103
Table 5.2	Validasi K_R pada berbagai model FB	106
Table 5.3	Validasi gaya mooring pada berbagai model FB	106
Tabel 5.4	Data dimensi geometri model FB	112

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

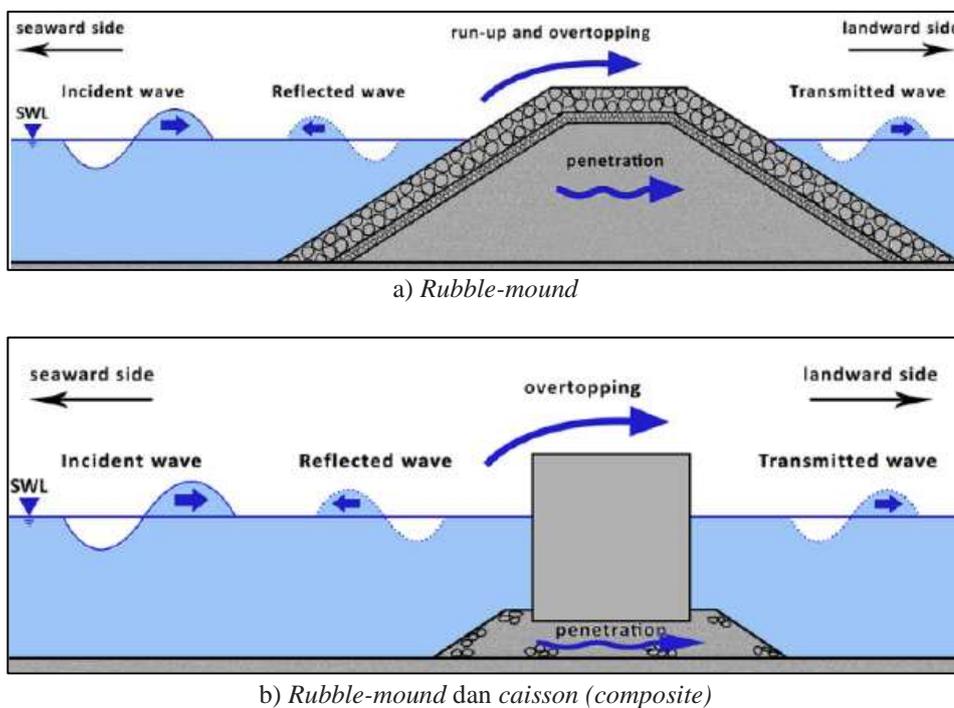
1. 1 Latar Belakang

Penjalaran gelombang menuju pantai dapat berupa proses difraksi, refraksi, shoaling, transmisi dan refleksi yang akan mempengaruhi perubahan energi gelombang di pantai. Energi gelombang mempunyai spektrum yang lebar, sehingga penanganannya secara komprehensif seringkali sulit dilaksanakan dan hal ini merupakan aspek yang paling menantang bagi para ahli teknik pantai. Banyak garis pantai di dunia menghadapi masalah *de-stabilisasi* pantai akibat erosi maupun sedimentasi. Kedua faktor ini merupakan ancaman bagi potensi daerah pantai berupa terganggunya sumberdaya dan kekayaan pesisir, serta aktivitas komersial di daerah pesisir seperti pariwisata, aquakultur, perumahan, bakau, pantai berpasir, infrastruktur, tambak dan lain-lain. Selain itu penjalaran gelombang yang tinggi juga dapat mempengaruhi tambat kapal dan aktivitas bongkar muat di pelabuhan. Kondisi gelombang laut yang tenang sangat dibutuhkan agar aktivitas di pelabuhan dapat berjalan dengan lancar.

Perencanaan wilayah untuk aktivitas pantai memerlukan pertimbangan faktor kondisi alam dan lingkungan sekitar, disamping faktor ekonomi lainnya, sehingga sering kali pemilihan daerah aktivitas pantai didasarkan pada kondisi topografi yang dapat memberikan perlindungan alami dalam perencanaan, seperti pantai yang terlindung pulau. Pada beberapa kasus, perlindungan gelombang dengan topografi alami seringkali tidak mencukupi tuntutan perlindungan yang diperlukan, sehingga dibutuhkan struktur pelindung pantai buatan yang dapat meredam gelombang tersebut. Kondisi alami gelombang dan tingkat perlindungan gelombang yang diinginkan, akan menentukan tipe dan desain breakwater, dimensi serta konfigurasi yang diperlukan.

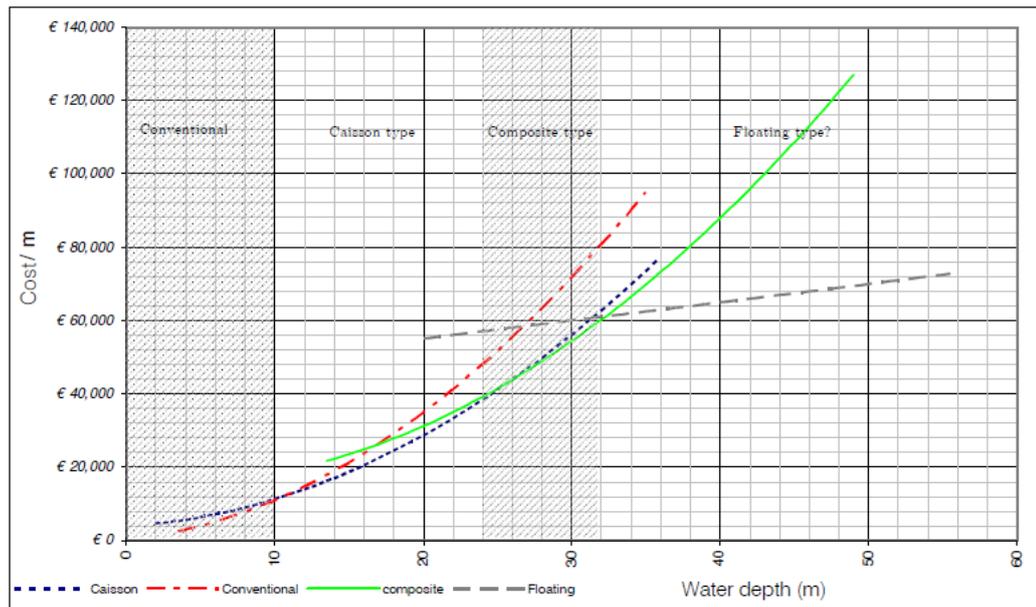
Breakwater tipe *rubble-mound* atau *caisson* (Gbr 1.1) menawarkan keunggulan dalam meredam energi gelombang yang sangat baik dan telah banyak digunakan [1]. Meskipun demikian, tipe perlindungan pantai ini menjadi tidak ekonomis untuk kondisi perairan pantai relatif curam dan dalam serta berombak

besar karena biaya konstruksi akan naik secara drastis [2] (Gbr 1.2). Disamping itu, pantai yang curam rata-rata mempunyai kondisi dasar laut tidak rata dan jelek sehingga mempengaruhi stabilitas struktur, serta sering terjadi perubahan sirkulasi aliran air yang dapat mengakibatkan erosi dan sedimentasi di daerah sekitarnya. Pada proyek rekayasa pantai, secara umum memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ekosistem alami dan kerusakan lingkungan yang mungkin akan memperburuk keadaan bagi generasi mendatang. Kenyataan ini memerlukan revolusi solusi rekayasa yang lebih ramah dengan mendorong penyediaan teknis, lingkungan dan ekonomi yang sehat dan berkelanjutan.



Gambar 1.1 Breakwater konvensional [1]

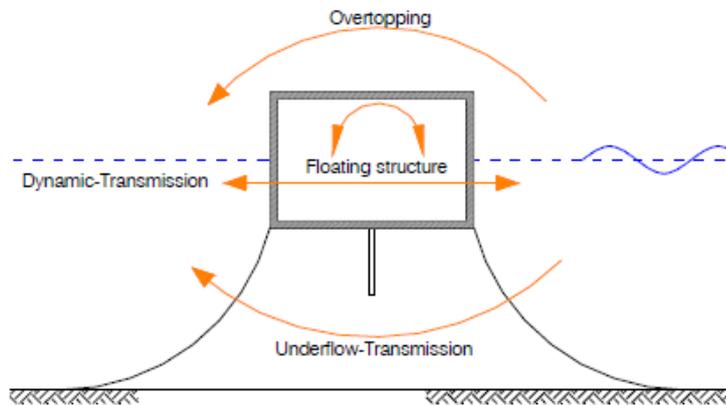
Floating Breakwater (FB) atau pemecah gelombang terapung menawarkan tingkat perlindungan yang dibutuhkan saat bekerja di perairan yang lebih dalam dengan terpaan daya alam yang lebih kuat daripada jenis breakwater konvensional. FB menggunakan konsep refleksi, disipasi dan transformasi untuk mengurangi energi gelombang, sehingga dapat melemahkan gelombang datang ke tingkat yang dapat diterima [3]. FB adalah struktur terapung pada sarat terbatas dan bergantung pada interaksi struktur bangunan di bagian atas kolom air.



Gambar 1.2 Perbandingan biaya konstruksi berbagai jenis breakwater terhadap kedalaman air [2]

Secara umum, FB terdiri dari ponton terapung yang terhubung ke dasar laut dengan sistem tali tambat (Gbr 1.3). Struktur ini berfungsi sebagai sumber utama perlindungan gelombang atau perlindungan tambahan di mana perlindungan gelombang sebagian diberikan oleh terumbu, pendangkalan dasar laut atau struktur tetap konvensional, dan umumnya dipasang di lokasi seperti marina, pelabuhan, daerah wisata dan fasilitas akuakultur (Gbr 1.4 - 1.5). FB mempunyai beberapa keuntungan [2] - [4], yakni: a) FB dapat dengan mudah dipindahkan dan layoutnya dapat diatur ulang karena kemampuan transportasi dan fleksibilitas dalam desain, b) FB dengan sistem tali tambat, dapat diaplikasikan untuk kondisi tanah di dasar laut yang jelek, c) FB tidak mengganggu sirkulasi air, transportasi sedimen dan migrasi ikan, d) Sirkulasi arus yang rendah di breakwater konvensional akan mengakibatkan akumulasi konsentrasi sedimen pada daerah tersebut, dan e) Waktu konstruksi relatif singkat.

FB juga menawarkan alternatif biaya konstruksi yang rendah dan ekonomis jika dibandingkan dengan breakwater konvensional, terutama di kedalaman perairan yang lebih dari sekitar 3.05 m [5]. Terlepas dari fungsi utama sebagai peredam gelombang, FB dapat juga berfungsi sebagai *walkway*, habitat laut, tembok laut dan dermaga kapal.



Gambar 1.3 Floating breakwater [2]



Gambar 1.4 Konstruksi FB di pelabuhan Monaco [6]



Gambar 1.5 Konstruksi FB di pelabuhan Messolonghi Greece [7]

Selain keuntungan FB juga mempunyai kelemahan yang membutuhkan pertimbangan dalam evaluasinya. Desain dan pengembangannya untuk wilayah pesisir merupakan tantangan besar bagi insiyur teknik. Disain struktur ini harus diaplikasikan sesuai dengan kondisi lokasi dengan analisis perubahan gelombang. Beberapa kelemahan termasuk keterbatasan untuk panjang fetch yang pendek, umur struktur (10-20 th) dan sebagian dari gelombang datang ditransmisikan [3]. Hales [5] menyatakan bahwa ketidakpastian dalam besarnya dan jenis yang diterapkan pada sistem, dan kurangnya informasi biaya perawatan. Hal ini secara konservatif dalam praktek desain akan meningkatkan biaya konstruksi. Kelemahan utama FB ini adalah struktur selalu bergerak sebagai respons terhadap aksi gelombang, sehingga akan lebih rentan terhadap kelelahan struktur.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan ini, peneliti mengusulkan Pemecah Gelombang Terapung Berpori atau Porous Floating Breakwater (PFB). Tipe struktur ini selain dapat meredam gelombang juga dapat mengurangi beban gelombang ekstrem yang dapat mempengaruhi kinerja struktur terapung. Pada bentuk kedap, struktur akan menerima gaya gelombang maksimal sehingga akan mentransfer energi gelombang tersebut ke tali tambat. Tentunya ini sangat tidak menguntungkan karena tali tambat akan menerima beban yang besar agar struktur tetap stabil menerima gaya gelombang. Kajian bentuk berpori sangat menguntungkan karena selain dapat meredam gelombang sebagian energi gelombang akan tereduksi ketika gelombang melewati struktur, tetapi energi gelombang yang diterima struktur dan juga tali tambat menjadi kecil. Berbagai tipe PFB didisain untuk melihat kinerja dan efek hidrodinamis. Penelitian dilakukan dengan simulasi model numerik dan uji model fisik di laboratorium flume tank, sehingga dapat diperoleh bentuk yang efisien dan efektif.

1.2 Perumusan Masalah

FB dalam konteks “*ilmu hidrodinamika*”, meredam gelombang melalui dua cara, yaitu merefleksikan gelombang dan mengganggu gerakan partikel gelombang. Kemampuan desain PFB nantinya, untuk merefleksikan gelombang sekaligus mengganggu gerakan partikel gelombang sesuai dengan tuntutan kebutuhannya, sangat tergantung pada bentuk, dimensi, kondisi permukaan dan konfigurasi desain. Variasi kondisi permukaan dapat dicapai dengan rancangan permukaan yang berpori. Parameter bentuk pori, ukuran pori, orientasi dan kerapatan pori yang mampu meredam dan merefleksikan gelombang sesuai dengan kebutuhan, serta desain dari bentuk utama apakah ponton, silinder atau kombinasinya, merupakan faktor yang akan diteliti dalam penelitian ini.

Dalam konteks keilmuan “*interaksi fluida-struktur*”, proses kerja FB akan melibatkan difraksi gelombang dimana gelombang yang datang dari semua kemungkinan arah akan pecah ketika menabrak struktur PFB, sehingga struktur akan menyerap energi gelombang difraksi tersebut. Semakin besar energi gelombang yang terserap, akan semakin tinggi pula intensitas olah-gerak struktur

tersebut nantinya, karena sebagian besar energi gelombang tersebut akan dikonversi menjadi energi gerak. Besarnya energi yang terserap sangat ditentukan oleh besarnya luasan penampang struktur relatif terhadap arah tegaklurus gelombang datang. Oleh karena itu, desain PFB yang mempunyai penampang dan efek interaksi minimum merupakan acuan penting untuk menghasilkan desain dengan respons olah-gerak minimum pula.

Selain itu, proses kerja PFB juga melibatkan gaya gelombang radiasi yang merupakan gelombang yang dihasilkan akibat respons olah-gerak struktur itu sendiri setelah menerima gaya difraksi. Semakin tinggi intensitas gerakan struktur maka semakin tinggi pula intensitas gelombang radiasi yang terbentuk. Gelombang radiasi yang memantul ke arah *upstream* dapat dipandang sebagai gelombang yang menginteraksi/meredam energi gelombang yang datang, apabila fase gerakan gelombang radiasi tersebut berbeda dengan fase gelombang datang. Efektivitas interaksi ini akan maksimum apabila fase keduanya berlawanan, sehingga mampu menihilkan gelombang yang datang. Oleh karena itu intensitas olah-gerak PFB merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan di dalam merencanakan desain yang efektif.

Secara umum, bentuk PFB juga harus memperhatikan posisi titik berat relatif terhadap titik apung agar stabilitas yang baik tercapai dan intensitas gerakan struktur dapat terkontrol. Sistem tali tambat tidak kalah pentingnya karena olah-gerak struktur ini juga sangat dipengaruhi oleh faktor tersebut. Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah agar PFB dapat dirancang mudah, terbuat dari bahan yang murah dan mudah didapat di pasaran, serta dirancang agar instalasinya di lapangan dapat dilaksanakan dengan proses yang sederhana, agar sistem tersebut efisien, mudah dipelajari serta diaplikasikannya di tempat dimana nantinya dibutuhkan.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah pengembangan dari desain baru PFB yang efisien dan efektif serta mampu menghasilkan efisiensi hidrodinamika, yakni: gaya tali tambat, gerakan struktur, transmisi dan refleksi gelombang yang baik. Secara rinci tujuan penelitian ini dijabarkan sbb:

1. Merancang bentuk dan geometri baru PFB yang dapat memberikan respons gerakan struktur kecil dan kinerja yang optimal.
2. Menentukan koefisien transmisi dan refleksi gelombang, serta tegangan mooring pada berbagai kondisi lingkungan laut .
3. Menentukan gerakan struktur PFB dalam mode gerakan translasi dan rotasi pada berbagai tinggi dan periode gelombang datang.
4. Menentukan koefisien transmisi dan refleksi gelombang serta tegangan mooring pada layout I-shape dan V-shape FB array

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi pemakaian batu/coral untuk pelindung pantai, sehingga dapat menurunkan penambangan batu/coral yang berdampak negatif bagi lingkungan.
2. Memberikan pedoman pada ahli yang bekerja dalam bidang teknik pantai tentang karakteristik hidrodinamika gelombang pada PFB, sehingga dapat diterapkan di lapangan secara efektif dan efisien.

1.4 Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut ini:

1. Penelitian ini merupakan pengujian model fisik di Laboraturum wave flume, sehingga hanya gelombang arah tegak lurus saja pada struktur yang ditinjau.
2. Pengukuran refleksi gelombang pada metode Goda dan Suzuki, jarak antar probe gelombang yang merekam data elevasi muka air akibat pantulan dari struktur diset pada posisi tetap.
3. Pengaruh arus dan angin tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.
4. Selain pengujian model fisik di wave flume, juga akan dilakukan model numerik efek hidrodinamika gelombang tersebut terhadap struktur.
5. Karakter hidrodinamika gelombang adalah sasaran utama dari studi ini, sedangkan koneksi antar struktur, kekuatan dan umur kelelahan struktur tidak ditinjau pada penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Perkembangan Floating Breakwater

Penelitian tentang *floating breakwater* (FB) atau pemecah gelombang terapung pada awalnya diteliti Nece dan Richey [8]. Objek FB berbentuk *twin-hull ponton* dan *box ponton*. Seiring dengan perkembangan industri dalam pabrikasi modul, banyak FB yang berbentuk *chain-moored rectangular caisson* dengan dua plat vertikal menonjol ke bawah dari sisi-sisinya, seperti bentuk tipe **II**. Selanjutnya berbagai bentuk dan konfigurasi diinvestigasi oleh beberapa peneliti, diantaranya Ruol [9] meneliti elastisitas tali tambat untuk ponton dengan kemiringan kabel 1:1 sampai dengan 1:5. Blumberg dan Cox [10] melakukan eksperimen di flume dengan berbagai konfigurasi (Kotak, bentuk **T** dan Katamaran). Berdasarkan penelitiannya diperoleh kurva koefisien transmisi dan beban gelombang horisontal maksimum. Neelamani dan Rajendran [11], fokus meneliti FB berbentuk tipe-**T** dan tipe-**L**. Karakteristik transmisi, refleksi dan disipasi energi diuji dengan eksperimen model fisik pada gelombang reguler dan gelombang acak. Koefisien transmisi secara umum menurun dengan meningkatnya kecuraman gelombang dan meningkatnya kedalaman air relatif d/L . Kedua jenis FB ditemukan perbedaan yang sangat efisien dalam disipasi dari energi gelombang datang. Perbandingan kinerja hidrodinamis tipe-**L** dan tipe-**T** menunjukkan bahwa tipe-**T** lebih baik daripada tipe-**L** sekitar 20-30%.

Dong et al. [12] melakukan studi eksperimen pada tiga tipe FB, yakni bentuk *box*, *double-box* dan *board-net*. Koefisien transmisi gelombang diuji pada gelombang reguler dengan dan tanpa kecepatan arus. Hasilnya menunjukkan bahwa pada tipe *board-net* adalah tipe struktur yang sederhana dan murah dan dapat diaplikasikan untuk akuakultur di perairan dalam. Koutandos et al. [13] menguji empat buah konfigurasi FB, yakni *single-fixed*, *single fixed* dengan hanya gerakan heave, *single fixed* dengan plat di depannya (kedap dan berpori) dan tipe *double*

fixed. Hasil penelitian menunjukkan bahwa plat yang terpasang di depan FB secara signifikan meningkatkan efisiensi struktur.

Selain penelitian secara eksperimen, perilaku FB juga diteliti secara numerik. Beberapa peneliti diantaranya: Fuguzza dan Natale [14] membangun model linier gabungan, yakni pergerakan struktur dan difraksi gelombang untuk menggambarkan FB berbentuk *box* pada gelombang reguler. Hasil model numerik menunjukkan kesesuaian dengan uji model fisik. Sannasiraj et al. [15] menguji model numerik 2-D untuk mengevaluasi koefisien dan gaya hidrodinamis pada gelombang membentuk sudut pada FB bentuk ponton. Didapatkan bahwa model 2-D dapat diaplikasikan untuk menguji masalah interaksi gelombang dan struktur. Rahman et al. [16] melakukan verifikasi model numerik dengan eksperimen untuk FB *rectangular*. Hasilnya merepresentasikan elevasi muka air di lokasi yang berbeda pada sisi *offshore* dan *onshore*, dan displasemen dinamis pada struktur terapung. Gaya yang terjadi pada mooring line, koefisien hidrodinamis struktur (transmisi, refleksi dan disipasi) dibandingkan dengan hasil eksperimen. Gesraha [17] membuktikan studi numerik dan eksperimen pada tipe *rectangular* dengan dua *sideboard* tipis vertikal ke bawah (FB tipe-II). Hasilnya menunjukkan untuk gelombang menyudut terhadap struktur, transmisi gelombang tertinggi terjadi jika dibandingkan dengan FB *rectangular*.

Kajian beban ekstrem yang terjadi di lautan pada FB juga telah diteliti oleh Cox et al. [18] yang menguji kinerja FB *box* pada gelombang reguler dan acak, yakni transmisi, refleksi dan disipasi gelombang, gerakan dan stabilitas struktur akibat gaya gelombang. Ruol dan Martinelli [19] menguji perbedaan tipe tali tambat pada FB tipe-II, yakni perbedaan tegangan dan pile pada rantai. Observasi difokuskan pada transmisi gelombang, beban tali tambat dan beban kejut pada rantai. Martinelli et al. [20] menguji kinerja FB tipe-II pada gelombang datang dengan berbagai arah. Semakin meningkat sudut datang gelombang akan menurunkan transmisi, gaya tali tambat akibat beban kejut/hentakan pada rantai menurun dan gaya ikatan akan sedikit meningkat.

Jung et al. [21] [22] meneliti interaksi gelombang dengan *fixed* dan *free-rolling* pada struktur persegi panjang di flume tank dengan menggunakan *particle image velocimetry* (PIV). Studi fokus pada detail hidrodinamis di sekitar struktur

dan kecepatan 2-D pada kedua sisi struktur. Hasilnya menunjukkan bahwa pada *free-rolling* struktur, vortisitas dibangkitkan dekat struktur di lokasi yang berlawanan dengan efek redaman *roll* untuk gelombang dengan periode lebih panjang dari periode natural *roll* struktur.

Penelitian terbaru beberapa peneliti menyelidiki sensitivitas dari koefisien transmisi FB sebagai parameter non-dimensi seperti d/h (sarat relatif) dan w/h (lebar relatif). Koftis dan Prinios [23], melakukan eksperimen untuk menganalisis kinerja FB. Peneliti ini menyatakan bahwa FB tetap dan tertambat memiliki perilaku yang sangat berbeda, dan mengusulkan dua formula sederhana yang diberikan sebagai fungsi dari h/L (L panjang gelombang datang), d/h dan w/h .

Ruol et al. [24] melakukan simulasi numerik 2D dengan mempertimbangkan FB pada gelombang reguler, gerak struktur sepenuhnya dibatasi untuk mensimulasikan kondisi tertambat, bebas bergerak secara vertikal (disimulasikan dengan penegar tiang pancang) dan ditambatkan dengan rantai (disimulasikan tali tambat). Dapat diketahui bahwa jenis sistem tambat memiliki pengaruh yang signifikan. Mengingat periode gelombang lebih kecil dari periode alami osilasi ($x_m < 1$) dan sarat relatif $d/h > 0.2$, FB untuk gerak *roll* dan *surge* tertambat melakukan gerakan lebih baik daripada yang tetap. Untuk periode yang dekat dengan periode alami osilasi dan draft $d/h > 0.1$, FB gerakan *roll* dan *surge* tertambat lebih baik daripada FB tertambat. Berdasarkan pertimbangan tersebut dapat disimpulkan bahwa penerapan rumus untuk FB yang ditambatkan dengan selain rantai, dalam banyak kasus diperoleh prediksi koefisien transmisi yang berlebihan.

Abdolali et al. [25] menyelidiki FB yang terkena gelombang reguler yang terbatas hanya untuk gerakan vertikal saja. Pada penelitiannya, mereka membandingkan simulasi numerik, observasi eksperimen dan formula yang diusulkan oleh Ruol et al. [26]. Kisaran diuji mencakup parameter x (1-7), sarat relatif ($d/h = 0,20 - 0,45$) dan lebar relatif ($w/h = 0,66 - 1,66$). Investigasi numerik ini juga memastikan bahwa pada kondisi ini rumus tersebut secara signifikan melampaui prediksi data numerik.

Secara umum FB mereduksi gelombang permukaan melalui mekanisme refleksi, menghancurkan gerakan partikel air dan redaman viskositas. Ketika gelombang mengenai struktur, energi akan dipantulkan, dihamburkan dan

menyebabkan gerakan struktur tersebut. Gerakan struktur yang diinduksi tersebut, kemudian akan menghasilkan gelombang dan gerakannya akan dibatasi oleh sistem tambat. Berdasarkan konsep disipasi energi maksimum karena refleksi dan lintasan energi minimum berada di bawah struktur, penelitian FB terus berkembang untuk menghasilkan kinerja yang baik. Sejumlah peneliti telah melakukan kajian FB dalam bentuk berpori pada berbagai jenis, yakni *porous pontoon* [27] – [30], *porous box* [31]- [33], *porous plate* [34] – [40], dan *porous pipe/cylinder* [41] – [43].

2.1.2 Klasifikasi Floating Breakwater

FB banyak digunakan sebagai solusi alternatif untuk perlindungan garis pantai dan pelabuhan. FB diusulkan, dirancang dan dibangun dalam berbagai bentuk. Pada 1970-an [44] - [46] mencatat lebih dari 60 konfigurasi FB telah berhasil dirancang. Hales [5] mengklasifikasikan FB ini berdasarkan kesamaan geometris dan fungsionalnya menjadi 11 kategori. Kemudian, McCartney [4] memisahkan FB menjadi 4 kategori umum berdasarkan bentuk dan kinerjanya terhadap redaman tinggi gelombang, yakni tipe *box*, *pontoon*, *mat*, dan *tethered float*. Selanjutnya PIANC [47] mengklasifikasikan FB berdasarkan karakteristik refleksi dan disipasi menjadi 4 konfigurasi, yakni *pontoon*, *mat*, *a-frame* dan *tethered*. Sistem refleksi akan berkontribusi paling dominan dalam meredam gelombang, sedangkan sistem disipasi akan menghancurkan energi gelombang melalui efek viscous dan turbulensi. Sawaragi [48] mengklasifikasikan FB berdasarkan mekanisme peredaman gelombang, menjadi 3 kelompok yakni: tipe refleksi, tipe refleksi dan gelombang pecah, dan tipe gesekan. Penelitian terbaru Dai et al. [49] mengelompokkan jenis FB berdasarkan bentuk, yakni tipe *box*, *pontoon*, *frame*, *tethered float*, *horizontal plate* dan tipe lainnya.

Sampai saat ini banyak FB dengan bentuk yang berbeda dan mekanisme peredaman gelombang telah diusulkan, diuji dan dibangun. Desain ini memungkinkan dikembangkan mekanisme peredaman gelombang ganda untuk mencapai koefisien transmisi optimal. Koefisien transmisi didefinisikan sebagai rasio tinggi gelombang yang ditransmisikan terhadap tinggi gelombang datang dan merupakan indikator kunci dari efektivitas FB. Maka perlu dilakukan studi literatur

pada penelitian dan pengembangan terkini serta kinerja berbagai FB, dan nantinya diharapkan dapat bermanfaat tidak hanya bagi peneliti tetapi juga para praktisi yang bekerja di bidang teknik kelautan atau pantai.

Studi literatur ini akan menyajikan tinjauan terdahulu pada penelitian dan pengembangan berbagai jenis FB. FB akan dikelompok berdasarkan bentuknya yang merupakan pengembangan dari penelitian McCartney [4], PIANC [47] dan Dai et al. [49]. Pengelompokan tipe FB adalah sebagai berikut: *box*, *pontoon*, *frame*, *mat*, *tethered float*, *horizontal plate*, dan *porous*.

2.1.2.1 Floating Breakwater Tipe Box

FB tipe *box* merupakan bentuk yang paling sederhana dan telah diteliti secara luas [50] - [52] (Gbr 2.1). Keuntungan dari tipe FB ini sangat banyak dan umur desain bisa lima puluh tahunan, konstruksi sederhana, kinerja terbukti, dan efektifitas dalam kondisi gelombang moderat [4]. Jenis struktur ini meredam gelombang laut terutama melalui pemantulan gelombang datang. Perhitungan teoritis sebagaimana diuraikan oleh Macagno dalam [5], bentuk geometri FB tipe *box* yang sederhana ini dapat diturunkan formula untuk memprediksi koefisien transmisi gelombang (K_T). Formula tersebut didasarkan pada teori gelombang linier dan diasumsikan gerakan FB sama dengan nol, tidak ada limpasan air di atas struktur dan kondisi kedalaman air konstan:

$$K_T = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\pi w \sinh(kd)}{L \cosh k(d-D)}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (2.1)$$

di mana K_T adalah koefisien transmisi yang didefinisikan sebagai rasio tinggi gelombang transmisi terhadap tinggi gelombang datang; k adalah angka gelombang tidak berdimensi; L panjang gelombang datang; w lebar struktur; d kedalaman air; dan D sarat struktur.

FB secara lateral dapat ditahan pada posisinya dengan tali tambat atau sistem pile, dan sistem tertambat ini melakukan beberapa gerakan akibat pengaruh aksi gelombang. Kinerja FB yang kompleks dan tali tambat yang sesuai dianalisis secara teoritis berdasarkan teori potensial 2-D [46] [53] [54]. Model analitik ini memberikan prediksi yang cukup baik bila dibandingkan dengan tes model fisik di

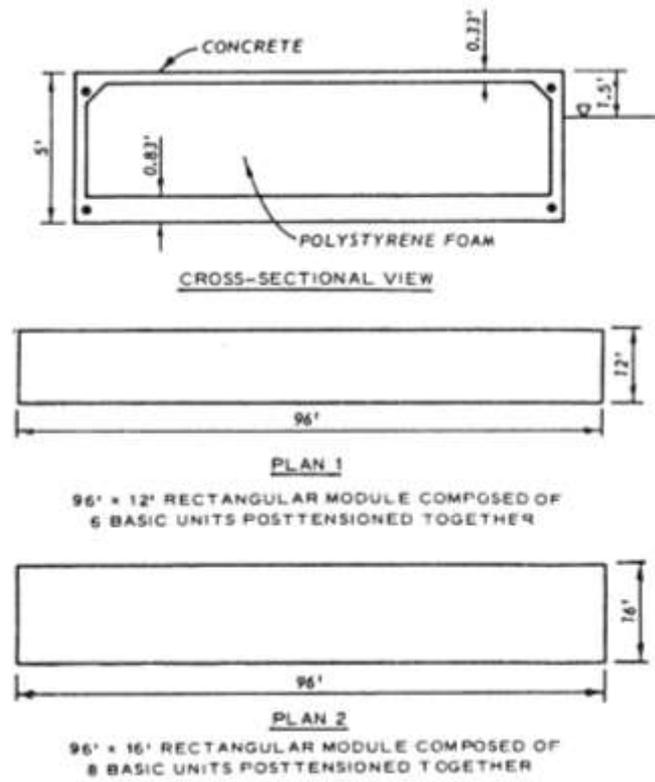
Pelabuhan Oak, Washington [55]. Untuk analisis sistem yang lebih kompleks, peneliti sering menggunakan pendekatan numerik. Sebagai contoh, Diamantoulaki and Angelides [56] menginvestigasi kinerja FB tipe *box* berengsel dengan menerapkan mode umum berdasarkan fungsinya yang mewakili gerakan bentuk engsel. Perilaku FB tipe *box* yang terendam dalam posisi vertikal dan tali tambat bersudut dipelajari oleh Rahman et al. [16]. Para peneliti ini menggunakan model numerik 2-D berdasarkan metode volume fluida. Dalam penelitiannya, persamaan Navier-Stokes digunakan untuk menyelidiki gelombang pecah dan vortisitas ketika gelombang melewati FB. Berat FB diasumsikan jauh lebih kecil dari gaya apung, untuk menghindari gaya tambat impulsif yang tidak diinginkan karena tali tambat kendur akibat beban gelombang. Pengaruh daerah terlindungi yang terbatas oleh struktur tersebut, efek pantul pada dermaga tersebut diteliti dengan simulasi numerik oleh Elchahal et al. [57]. Mereka menemukan bahwa dinding bagian samping secara signifikan mempengaruhi gerakan dan efektivitas FB, terutama untuk gelombang pendek. Resonansi di belakang struktur terjadi ketika jarak ruangan antara FB dan dinding samping adalah $nL/2$.

Selanjutnya kinerja FB fleksibel sistem pile dikaji oleh Diamantoulaki et al. [58] berdasarkan model hidrodinamik 3-D (Gbr 2.3). Dibandingkan dengan FB kaku, hidroelastisitas signifikan untuk rasio B/L kecil tetapi responnya menurun tajam ketika rasio ini melebihi 0.7 dan juga kekakuan lentur dari FB yang fleksibel akan mempengaruhi beban pada pile untuk gerakan surge dan pitch secara signifikan pada $B/L < 0.9$. Tay et al. [59] mempelajari efek FB pada mitigasi respons hidroelastik dari dua tangki persegi panjang terapung yang disusun berdampingan berdasarkan pendekatan elemen hingga. Berdasarkan metode elemen batas orde tinggi, Hong et al. [60] menganalisis perilaku hidroelastik dari struktur terapung besar (*Mega-Float*) dengan FB tipe *box*. Dua penelitian terakhir dibahas oleh Wang et al. [61] tentang metode untuk mengurangi respons hidroelastik dari struktur terapung yang sangat besar (*Very Large Floating Structure*, VLFS). Efektivitas FB tipe *box* sangat tergantung pada lebar, sistem tambat dan sudut gelombang datang. Sebagai contoh, rasio lebar terhadap panjang gelombang $B/L > 0.35$ untuk memastikan bahwa koefisien transmisi gelombang $K_T < 0.5$. K_T tinggi sering kali tak terhindarkan dengan rasio kecil, lebar terhadap

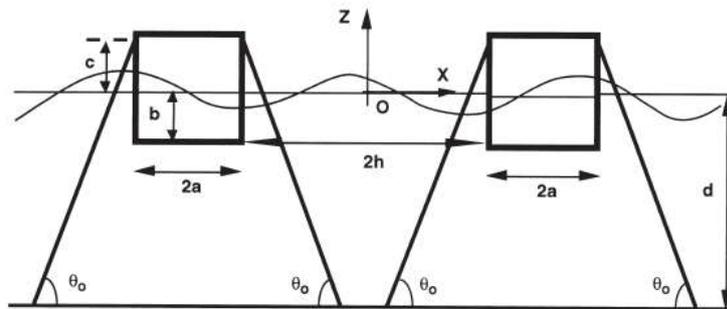
panjang gelombang (misal $B/L < 0.15$). Dengan kata lain, FB kecil hampir tidak kelihatan untuk gelombang panjang.

Untuk meningkatkan kinerja FB tipe *box*, Williams et al. [62] menganalisis kinerja dua *box* panjang terapung yang disusun berdampingan dengan teori potensial 2-D (Gbr 2.2). Studi numerik parametrik mengungkapkan bahwa geometri dan jarak antar dua *box* terapung serta kekakuan tali tambat adalah faktor utama yang mempengaruhi kinerja FB. Jarak dua *box* yang sempit akan efektif dalam memantulkan gelombang panjang, sedangkan jarak yang lebih besar bermanfaat untuk memantulkan gelombang pendek, sehingga kedua *box* pada dasarnya bertindak sebagai dua FB berdiri bebas secara berurutan. Selain itu, dengan mengurangi kekakuan tali tambat, FB akan lebih efektif dalam memantulkan gelombang panjang. Kinerja FB *dual-box* terhadap gelombang pendek tidak sensitif terhadap kekakuan tali tambat kecuali jika tali tambatannya terlalu lentur untuk menahan gerakan struktur. Secara umum tergantung pada konfigurasi keseluruhan, FB *dual-box* ini lebih unggul dari breakwater tipe *single-box* dengan dimensi keseluruhan yang sama.

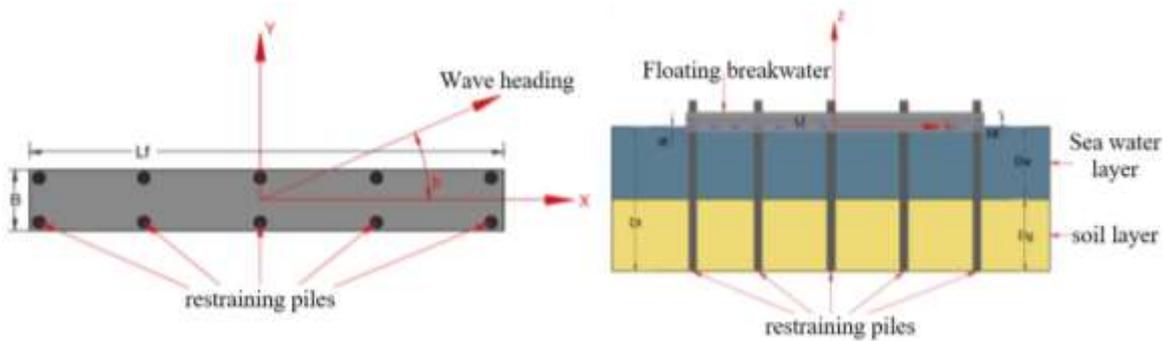
Kinerja FB terdiri dari tiga modul *box* terapung identik yang terhubung secara fleksibel sepanjang arah longitudinal telah diteliti oleh Loukogeorgaki et al. [63] dalam uji model skala 1:20 (Gbr 2.4). Peneliti ini menemukan bahwa sudut gelombang datang mempengaruhi gaya internal di seluruh konektor secara signifikan untuk rentang frekuensi gelombang rendah karena mode eksitasi lentur dari FB, pada nilai $B/L < 0.25$ dengan sudut datang gelombang 60° dan $B/L < 0.15$ untuk sudut gelombang datang 45° . Dalam kondisi seperti itu, tali tambat akan menimbulkan gaya tegangan yang besar dan beban kejut akan terjadi untuk $H/L > 0.04$. Selanjutnya, FB ini akan efektif jika $K_T < 0.5$, yakni ketika rasio B/L lebih besar dari nilai-nilai tersebut di atas dan dengan demikian orientasi FB ini dengan sudut gelombang datang 45° , perilaku FB akan paling efisien.



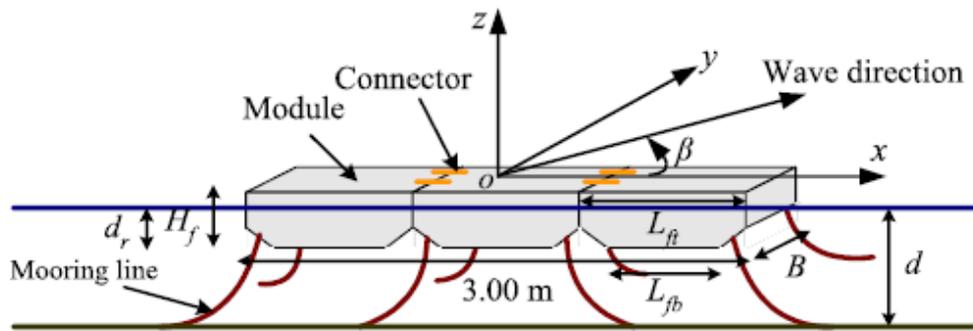
Gambar 2.1 FB tipe *box* [51]



Gambar 2.2 FB tipe *double-box* [62]



Gambar 2.3 FB tipe *pile* [58]



Gambar 2.4 Geometri FB [63]

2.1.2.2 Floating Breakwater Tipe Ponton

FB tipe ponton mengikuti prinsip disain kapal, secara khusus tipe ini terdiri dari dua atau lebih ponton memanjang, yang terhubung secara kaku pada interval tertentu atau dengan dek di atasnya. Desain ini juga sering disebut sebagai ponton ganda. Jika dibandingkan dengan FB tipe *box*, kelebihan desain ini dapat meningkatkan inersia dan stabilitas tanpa menambah banyak massa total. FB tipe ponton akan mereduksi gelombang dengan cara memantulkan gelombang seperti tipe *box*. Selain itu, jarak diantara dua pengapung memungkinkan terjadinya disipasi energi turbulen. Studi awal yang dilakukan oleh Ofuya [50] secara eksperimental menyatakan bahwa sarat air berperan penting dalam mengurangi koefisien transmisi gelombang (Gbr 2.7). Jika $K_T < 0.5$ dapat dicapai dengan mengatur rasio periode alami struktur terhadap periode gelombang (T_n/T) lebih besar dari 0.65. Pengembangan kapal di pelabuhan Oak Washington, memberi perhatian pada FB untuk melindungi pelabuhan dengan ketinggian elevasi pasang surut maksimum 4.4 m. Pada proyek tersebut, Davidson [55] mengusulkan desain ponton di mana ponton beton dihubungkan oleh modul kayu persegi panjang sepanjang 13 m dan lebar 3 m (Gbr 2.5). Uji model dua dimensi dengan skala 1:10 dilakukan untuk menguji keefektifan desain dan gaya tali tambat.

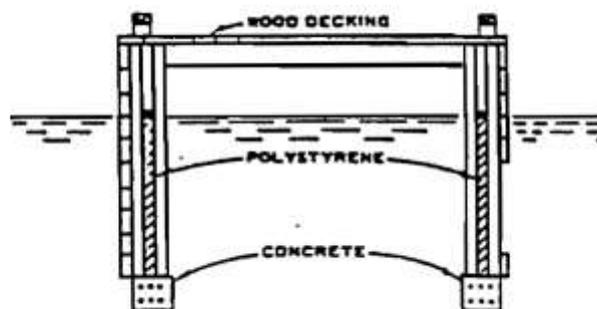
Sejak itu, banyak penelitian secara teoritis dan eksperimental melakukan pengujian FB tipe ponton. Williams dan Abul-Azm [64] menganalisis sifat hidrodinamik dari FB yang terdiri dari sepasang prisma persegi panjang terapung yang dihubungkan oleh dek yang kaku (Gbr 2.6), dan hasilnya menunjukkan perilaku yang mirip dengan FB tipe *box* ganda [62], sarat air, jarak antara dua

prisma dan gaya tali tambat memiliki efek kuat pada refleksi gelombang. Jika dibandingkan dengan FB tipe *box* tunggal dari dimensi keseluruhan yang sama dan kekakuan tali tambatan, desain ponton ini akan lebih efektif dalam memantulkan gelombang sedang dan panjang. Hal ini membuat tipe ponton memberikan solusi yang lebih hemat biaya. Ikeno et al. [65] mengusulkan penggunaan ruang antara dua ponton sebagai ruang udara bertekanan dan menyelidiki pengaruhnya terhadap redaman energi gelombang, baik secara teoritis dan eksperimental. Pada perbandingan FB berbentuk cekung dan *box* tunggal dengan dimensi keseluruhan yang sama, menunjukkan bahwa penggunaan ruang udara bertekanan efektif dalam meredam energi gelombang. Peneliti ini juga menemukan bahwa kinerja FB dapat lebih ditingkatkan dengan meningkatkan ukuran udara ruang dan tekanan.

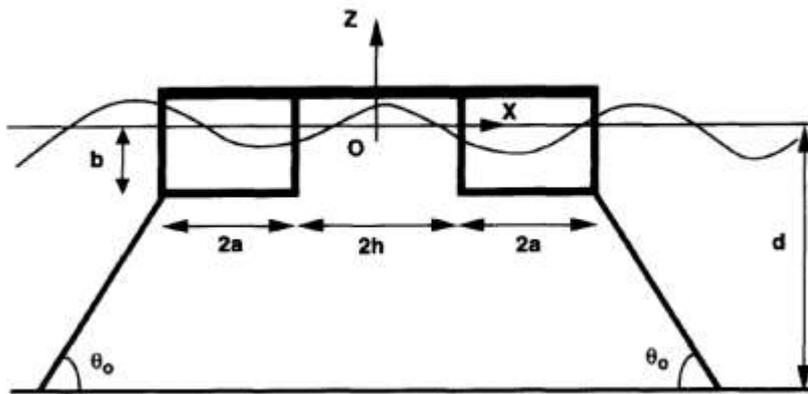
Weng dan Chou [66] mengembangkan model numerik berdasarkan metode elemen batas untuk menganalisis perilaku dua ponton yang dihubungkan oleh bingkai kaku dan tali tambat yang dimodelkan sebagai pegas linier. Studi ini mengungkapkan bahwa jarak antara dua ponton memiliki efek besar pada frekuensi alami dan gerakan *heave* di rentang frekuensi tinggi. Gerakan *surge* ditemukan tidak sensitif terhadap kekakuan tali tambat, tetapi kekakuan yang lebih tinggi cenderung menginduksi respons puncak dalam gerakan *heave* dan *pitch* pada frekuensi yang lebih tinggi. Dong et al. [12] melakukan studi eksperimental untuk membandingkan gelombang transmisi pada FB tunggal dan *box* ganda pada gelombang reguler dengan atau tanpa kecepatan arus. Hasil tes model skala 1:40 menunjukkan bahwa desain *box* ganda berperilaku lebih baik daripada *box* tunggal. Namun, pada gelombang panjang, kedua desain membutuhkan lebar yang besar untuk mencapai koefisien transmisi gelombang kecil ($K_T < 0.5$). Peningkatan lebar berarti lebih banyak material dan sistem tambat yang kuat harus digunakan dalam desain.

Untuk meningkatkan efektivitas FB tipe ponton dalam meredam gelombang panjang, Koo [67] mengusulkan desain dengan memanfaatkan jarak antara kedua ponton sebagai ruang pneumatik (Gbr 2.8). Model numerik non-linear berbasis domain waktu digunakan untuk mengevaluasi pemblokiran gelombang dan peredaman energi gelombang. Koo menemukan bahwa redaman pneumatik adalah paling efektif untuk mengurangi transmisi energi ketika $B/L < 0.4$, dan sistem

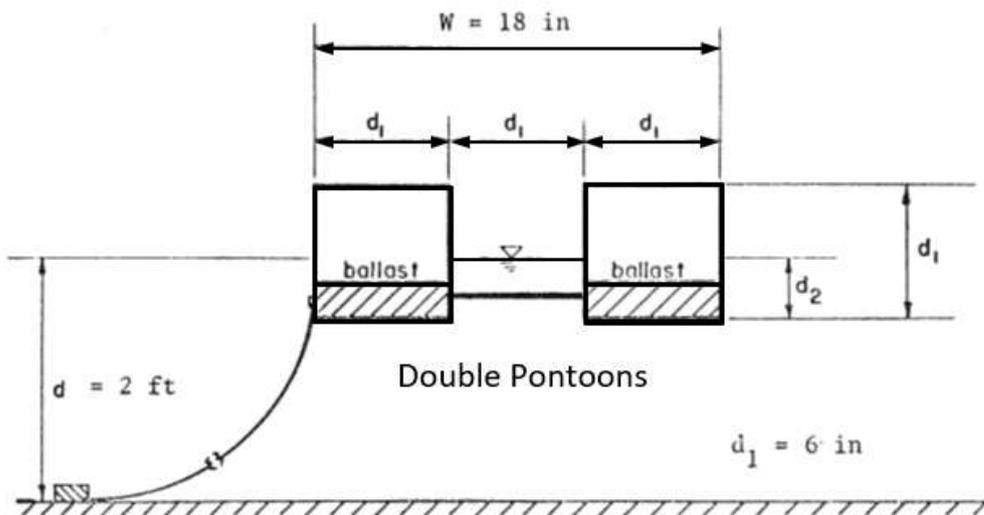
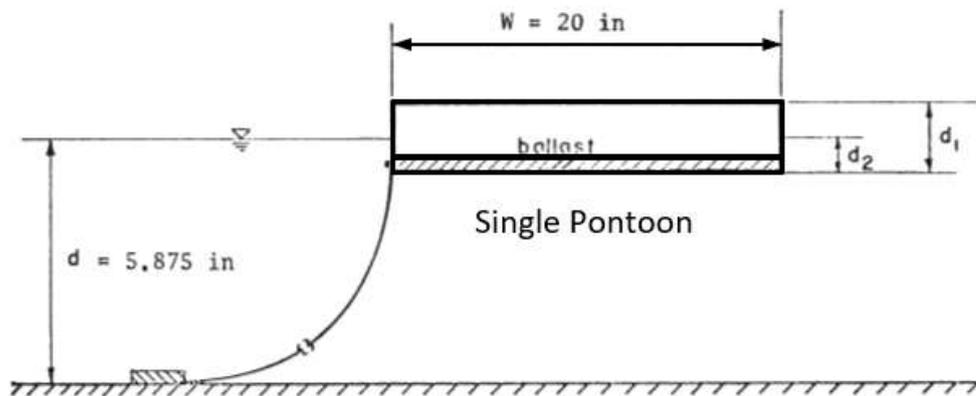
demikian berguna untuk memblokir gelombang panjang. Ji et al. (2015) mengusulkan penggunaan dua silinder horizontal yang saling berhubungan dengan *mesh cage* yang dibawahnya diisi dengan bola karet berlubang (Gbr 2.9). Fungsi disain ini akan mengganggu orbital partikel fluida dan melalui gerakan bola tersebut, energi gelombang akan terdisipasi. Sebagai perbandingan, tiga konfigurasi lainnya dipertimbangkan sebagai berikut: (1) ponton ganda saja, (2) ponton ganda dengan cage saja, dan (3) kotak tunggal dengan dimensi keseluruhan yang setara. Uji model fisik dengan skala 1:20 menunjukkan bahwa desain ponton ganda dengan cage dan bola lebih baik dari tiga konfigurasi lainnya terhadap redaman gelombang. Desain ini juga berkinerja cukup baik pada gelombang panjang ($K_T = 0.7 - 0.8$ pada $B/L < 0.2$) di mana desain ini hampir meniadakan gelombang datang. Namun, kekuatan tali tambat ditemukan setidaknya 50% lebih besar dari model 1 dan model box tunggal karena keberadaan mesh cage. Perbedaan kecil dalam kekuatan tali tambat antara model 2 dan model 3 mengungkapkan bahwa bola tidak membawa beban lebih lanjut ke sistem tambat. Selanjutnya, Ji et al. [68] melakukan uji model tiga dimensi tentang efektivitas desain. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa desain efektif untuk $B/L > 0.25$ pada kondisi *beam sea* dan gelombang datang bersudut. Penurunan koefisien transmisi gelombang akan dicapai setelah $K_T = 0.9$ untuk $B/L \approx 0,15$ dan kurang dari 0.8 untuk gelombang yang lebih panjang ketika $B/L \approx 0,125$. Hasil uji model tersebut mengindikasikan bahwa tingkat osilasi yang lebih tinggi dari FB pada gelombang panjang dapat menyebarkan lebih banyak energi gelombang. Para peneliti juga menyarankan bahwa periode gerakan *sway* dirancang untuk menghindari frekuensi gelombang yang paling mungkin pada kondisi laut tertentu untuk memastikan redaman gelombang efektif.



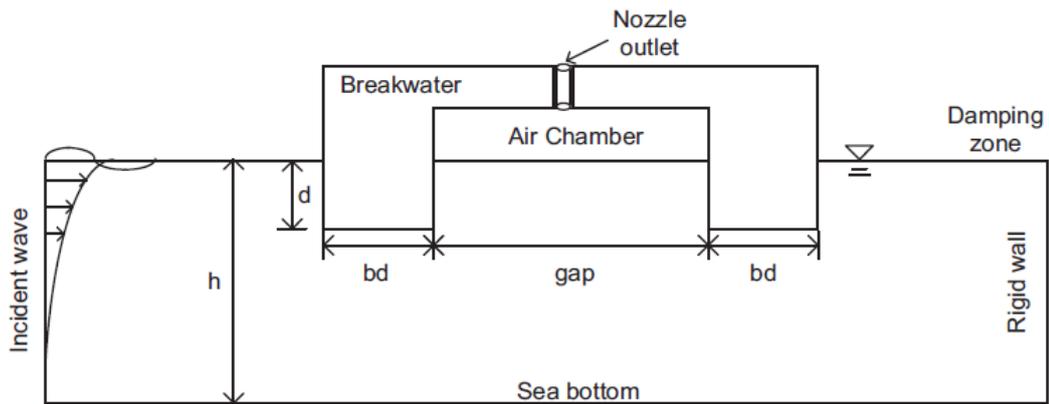
Gambar 2.5 FB *twin-pontoons* [55]



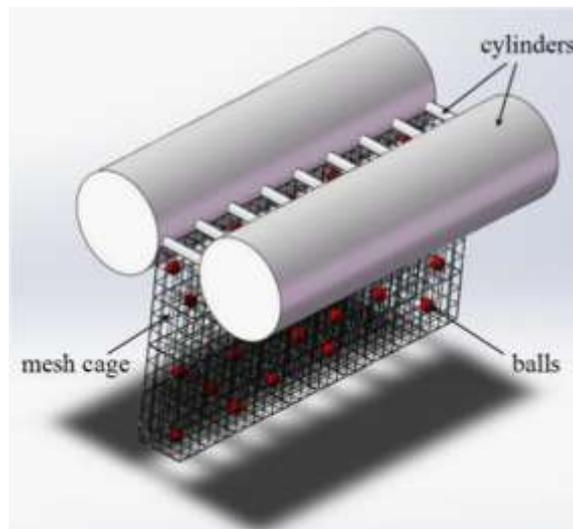
Gambar 2.6 FB *dual-pontoons* [64]



Gambar 2.7 FB *Single dan double-pontoons* [50]



Gambar 2.8 FB *double-pontoons* dengan *pneumatic chamber* [67]



Gambar 2.9 FB *double-pontoons* dengan *cage* [69]

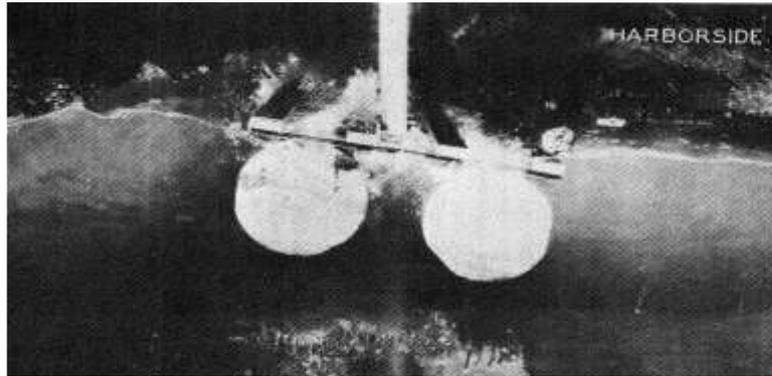
2.1.2.3 Floating Breakwater Tipe Frame

FB tipe *frame* seringkali merupakan kombinasi ponton dan struktur rangka. Disain tipe ini meredam gelombang melalui keduanya, yakni refleksi oleh ponton dan turbulensi serta gangguan oleh frame. Uji model frame ini telah dilakukan sebelumnya, yakni *twin-log* oleh Jackson dalam [5] dari bahan kayu di Amerika Utara (Gbr 2.10) dan *A-frame* [70] (Gbr 2.11). Desain modern biasanya menggunakan ponton beton atau baja untuk kekuatan dan daya tahan. Satu contoh adalah FB yang dibangun di pelabuhan Brownsville Marina di teluk Orchard, Washington pada 1999 [71] seperti terlihat pada Gbr 2.12. Delapan unit ponton beton dihubungkan satu sama lain oleh tabung geser dengan bantalan karet dan baut

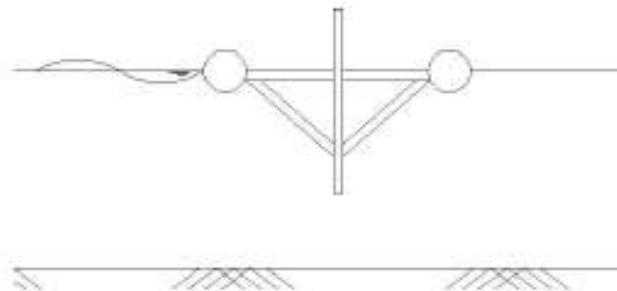
di setiap sisi ponton, dan ditopang oleh pile baja. Baik hasil uji numerik dan model fisik menunjukkan bahwa struktur tersebut cukup efektif dalam meredam gelombang pada gelombang datang bersudut. Penggunaan material kayu direkayasa dalam desain agar dapat memberikan alternatif biaya yang lebih murah untuk perlindungan marina. Namun, struktur kayu mempunyai kelemahan karena kekuatan rendah dan daya tahannya jelek. Jadi, struktur bahan kayu ini mungkin tidak cocok untuk digunakan di lingkungan laut yang gelombang lautnya cukup tinggi.

Mani [72] mengusulkan FB *Y-frame* dengan memasang pipa silindris yang berjarak sama ke bagian bawah ponton dengan penampang berbentuk trapesium (Gbr 2.13). Hasil uji model fisik dengan skala 1:20 menunjukkan bahwa $K_T = 0.35 - 0.65$ untuk rasio $B/L = 0.096 - 0.224$. Hal ini menyiratkan bahwa kegiatan instalasi dapat secara substansial berkurang dibandingkan dengan type *box* dan ponton, dimana umumnya itu membutuhkan rasio $B/L > 0.3$ untuk mencapai efektivitas yang diinginkan ($K_T \approx 0.5$). Sebaliknya di sisi lain, gaya tambat diharapkan meningkat secara eksponensial dengan kuantitas tak berdimensi H/gT^2 , di mana g adalah percepatan gravitasi dan T adalah periode gelombang, dan K_T jauh lebih besar ($> 13.5\%$) dibandingkan yang dilaporkan oleh Davidson [55] untuk tipe ponton dengan parameter gelombang dan struktur yang serupa.

Selanjutnya, FB tipe cage menggunakan *frame silinder* dan FB tipe ponton ganda diusulkan dan diteliti oleh Murali dan Mani [73] (Gbr 2.14). Jika dibandingkan dengan desain *Y-frame* sebelumnya, konfigurasi cage diperoleh nilai 10% - 20% lebih efisien dalam mengendalikan C_t . Peneliti ini juga merekomendasikan rasio B/L adalah 0.14 – 0.18 untuk mengendalikan gelombang transmisi dalam batas yang diinginkan. Frame dalam FB jenis cage tidak diragukan lagi berkontribusi terhadap disipasi energi gelombang tetapi mereka juga meningkatkan biaya konstruksi, peningkatan biaya mencapai 50% jika dibandingkan dengan desain *Y-frame*. Selain memasang frame struktur ke bagian bawah *box* atau ponton terapung, Uzaki et al. [75] meneliti efek pemasangan rangka struktur di depan dan belakang dari FB tipe *box* baja (Gbr 2.15). Peneliti ini menemukan bahwa rangka di depan ponton dapat memecah gelombang datang, menghasilkan redaman gelombang yang lebih baik dibandingkan dengan satu ponton.



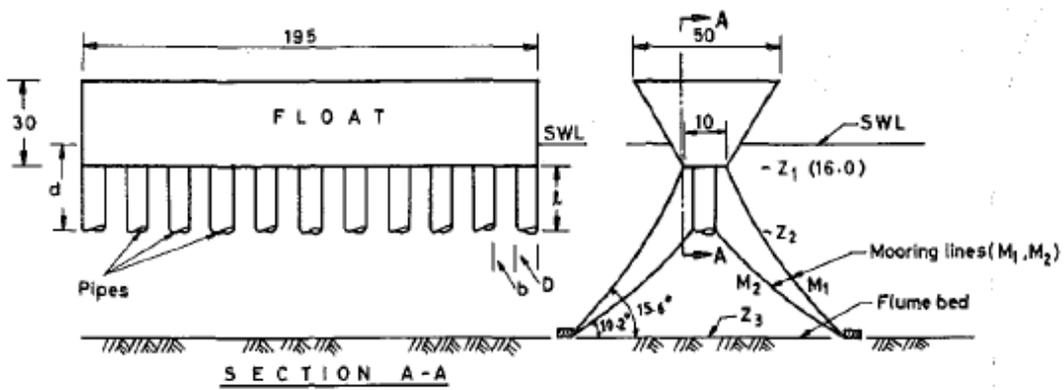
Gambar 2.10 FB *Twin-Log* [5]



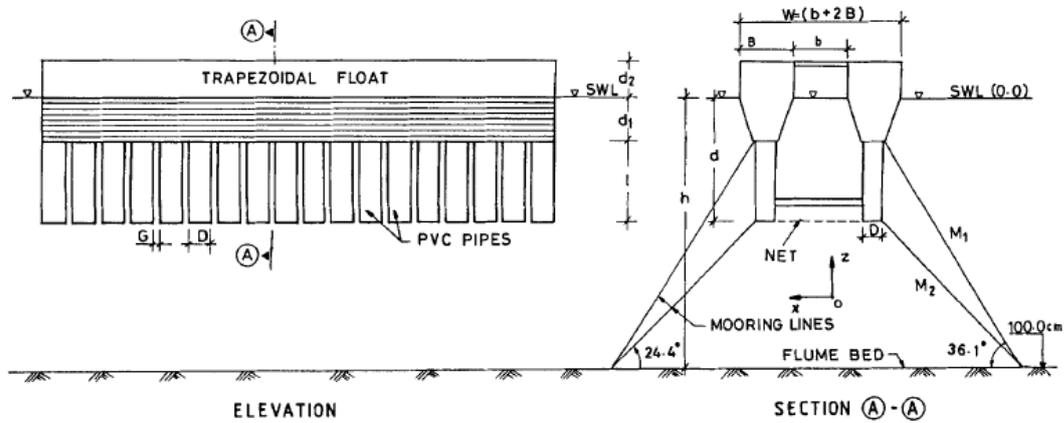
Gambar 2.11 FB tipe *A-frame* [70]



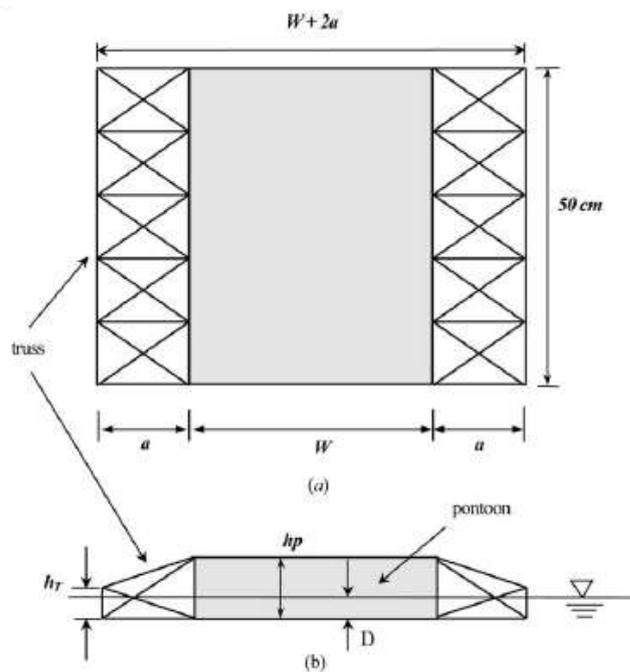
Gambar 2.12 Model tes dan instalasi FB di pelabuhan Brownsville Marina di teluk Orchard 1999 [71]



Gambar 2.13 FB Y-frame [72]



Gambar 2.14 FB tipe cage berbentuk frame silinder [73]



Gambar 2.15 FB dengan rangka struktur [74]

2.1.2.4 Floating Breakwater Tipe Mat

Industri ban dunia menggunakan hampir sekitar 70% dari konsumsi karet dunia. Namun, hanya sebagian kecil dari ban bekas yang didaur ulang. Hal ini menjadi tantangan besar bagi industri dalam mencari pembuangan bebas polusi atau penggunaan kembali ban bekas ini untuk aplikasi lain [5]. Peneliti Stitt dan Noble dalam [5] menemukan *Wave-Maze* yakni ban truk bekas diisi dengan bahan pengapung. Konfigurasi geometris dibentuk sedemikian rupa sehingga lapisan atas dan bawah ban dikunci di bagian tengah dari ban vertikal yang diatur dalam pola segitiga. Sistem ini mereduksi gelombang datang terutama oleh gesekan di sepanjang permukaan basah dan juga dengan mengganggu orbit partikel gelombang. Efisiensi *Wave-Maze* diuji oleh Kamel dan Davidson [75] seperti terlihat pada Gbr 2.16, dan hasilnya menyimpulkan bahwa lebar minimal adalah setengah panjang gelombang agar diperoleh redaman yang efektif. Selain itu juga, ketinggian FB ini harus melebihi tinggi gelombang $H > 1.2$ m.

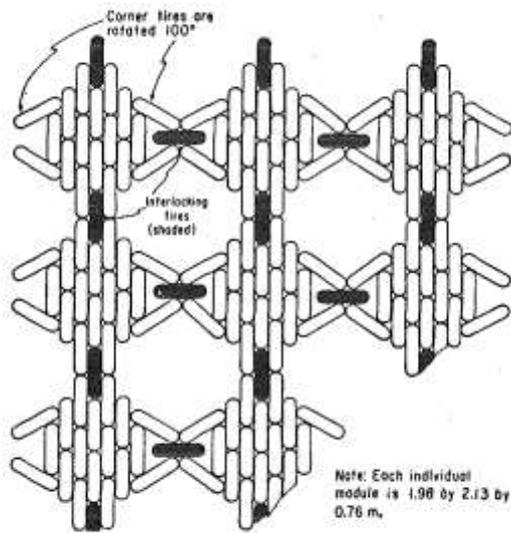
Keberhasilan studi ini menarik minat para peneliti dan industri karet. Perusahaan *Goodyear Tire and Rubber* melakukan studi penggunaan ban bekas sebagai peredam gelombang. Desain modular terdiri dari rangkaian ban bekas yang saling terkoneksi dengan tali atau kabel berkekuatan tinggi yang dikenal sebagai *Goodyear* (Gbr 2.17). Harms et al. dalam [4] mengusulkan desain *Wave-Guard* dengan memanfaatkan struktur log seperti tiang telepon dan balok beton yang dirangkai oleh ban bekas (Gbr 2.18). Tiang-tiang ini bersama-sama dengan ban bekas terhubung satu sama lain menggunakan ban berjalan. Bersama dengan *Wave-Maze* dan *Goodyear*, ketiga konfigurasi ini menerima banyak perhatian dalam studi eksperimental. Hasil pengujian model menunjukkan bahwa desain *Wave-Guard*, memiliki kelembaman dan kekakuan besar serta meredam gelombang lebih efektif dibandingkan dengan dua konfigurasi lainnya [4].

Hegde et al. [76] mengusulkan desain FB berbentuk pipa PVC berlapis secara horizontal (Gbr 2.19). Uji model dengan skala 1:30 menyatakan bahwa untuk $B/L=1.0$, K_T bernilai 0.6 - 0.8 tergantung pada kecuraman gelombang. Model komputasi seperti *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* [77] dan *Genetic Algorithm Tuned Support Vector Machine Regression* [78], digunakan untuk

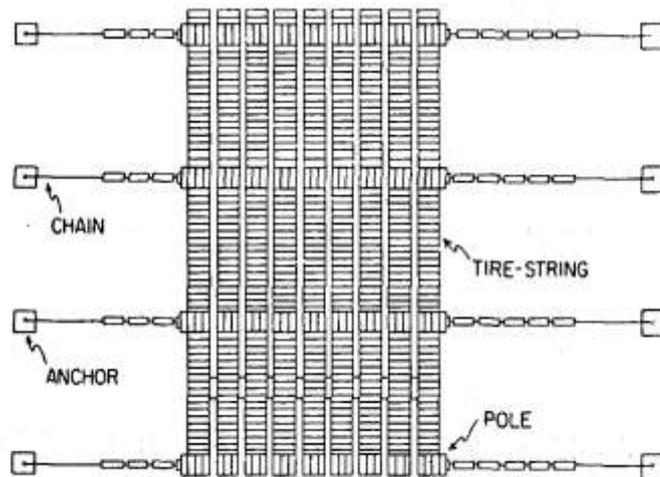
memprediksi transmisi gelombang untuk desain FB seperti itu. Respons hidroelastik FB tipe mat yang fleksibel dengan koneksi fleksibel internal juga dipelajari oleh Loukogeorgaki et al. [79]. Para peneliti mengadopsi teknik mode superposisi dan mode basah dari struktur FB dengan massa tambah dan kekakuan gravitasi hidrostatik. Hasil studi peneliti ini menunjukkan bahwa adanya internal koneksi mempengaruhi gerakan *heave* pada gelombang panjang, yaitu $0.07 \leq B/L \leq 0.3$. Efektivitas FB juga dipengaruhi secara signifikan oleh kekakuan rotasi koneksi untuk kisaran kira-kira sama dari rasio B/L tersebut, dimana peningkatan kekakuan rotasi cenderung mengurangi efektivitasnya. Penggunaan ban bekas dan bahan daur ulang adalah jelas merupakan keuntungan besar dari FB tipe mat. Tidak seperti tipe *box* dan ponton itu meredam gelombang terutama dengan refleksi, untuk tipe mat mereduksi energi gelombang melalui gesekan di sepanjang permukaan dengan mengganggu orbital partikel gelombang. Hal ini secara signifikan mengurangi beban pada sistem tambat. Namun, sebagian besar desain membutuhkan lebar yang sama dengan panjang gelombang datang, yang bisa menghasilkan tapak yang besar untuk mengurangi tinggi gelombang. Jadi, masih ada hal yang harus dilakukan untuk meningkatkan efektivitasnya pada gelombang panjang dimana redaman gelombang dapat direduksi.



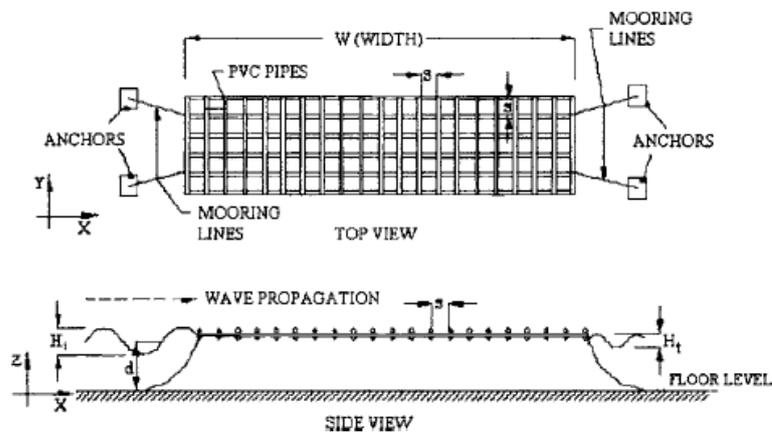
Gambar 2.16 FB tipe mat: *wave-maze* [75]



Gambar 2.17 FB tipe mat: *Goodyear* [4]



Gambar 2.18 FB tipe mat: *Wave-Guard* (Harms et al. dalam [4])



Gambar 2.19 FB dengan model pipa PVC [76]

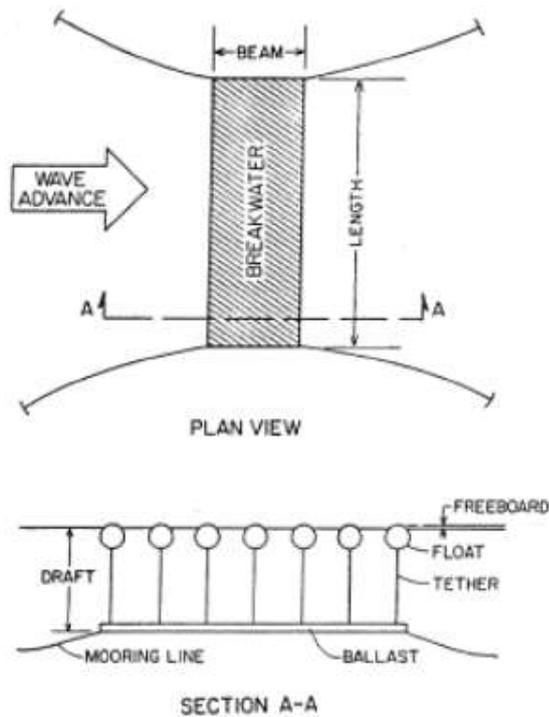
2.1.2.5 Floating Breakwater Tipe Tethered Float

FB tipe *tethered float* adalah terdiri dari sejumlah pengapung yang ditambatkan ke dasar laut atau di *ballast* di bawah permukaan air, dan pengapung ini bergerak seperti pendulum berayun akibat hampasan gelombang. Para pioner telah meneliti struktur ini, yakni Jones [80] dan Hales [5] yang mengusulkan sejumlah besar bola pengapung yang ditambatkan dengan beton bertulang untuk perlindungan sistem pemuatan dan pemindahan beban yang efisiensinya sangat dipengaruhi oleh periode gelombang 2 - 7 detik. Berdasarkan penelitian ini, FB tipe ini mampu mengurangi tinggi gelombang signifikan hingga 50% dengan spektrum gelombang Pierson-Moskowitz pada periode puncak 7 detik [80]. Berbeda dengan jenis FB lain yang dibahas di atas, utamanya dengan memanfaatkan inersia untuk meredam gelombang dengan refleksi dan gesekan, FB tipe ini mereduksi gelombang melalui tahanan yang timbul dari gerakan pelampung karena gradien tekanan gelombang. Desain ini kemudian tidak mendapat perhatian sehingga studi kelayakan dilakukan untuk mengevaluasi potensi komersialisasi [5].

Seymour dan Hanes [81] berdasarkan studi eksperimental (Gbr 2.20) menunjukkan bahwa disipasi energi adalah sedikit kaitannya dengan hamburan dan refleksi gelombang. Peneliti ini mengembangkan model analitik untuk FB tipe *tethered float* ini dengan hanya mempertimbangkan disipasi tahanan fluida dalam bentuk redaman kuadratik. Model teoritis yang dikembangkan menyatakan bahwa jumlah atau dimensi pengapung ditentukan oleh redaman gelombang yang diinginkan. Mereka juga menemukan bahwa kinerja type ini tidak sensitif terhadap panjang tali tambat, dan dimensi karakteristik dari pengapung harus dalam orde yang sama dari tinggi gelombang signifikan.

Selain bola pengapung, tangki silinder atau ban bekas dapat juga dimanfaatkan [4] [5]. Apalagi [5] [80] telah membahas kelebihan dan kekurangan desain modul *ballast* yang berbeda, yakni tipe tongkang beton, beton bingkai artikulasi dan rangka baja. Modul ballast rangka baja dibuat dari bekas rel kereta api bersama dengan pengapung yang terdiri dari ban mobil bekas yang diisi dengan *polyurethane foam* yang dipasang di samudera dekat San Diego, California pada tahun 1977. Selain tali tambat komponen penting dalam sistem apung tertambat,

kinerjanya juga dipelajari. Sebagai contoh, kabel atau rantai mungkin mengalami transien tapi beban kejut dari kondisi kendur ke kondisi tegang secara tiba-tiba. Beban kejut dapat membahayakan umur struktur ini dan efek seperti itu dipelajari oleh banyak peneliti [82] [83].



Gambar 2.20 FB *tethered float* [81]

2.1.2.6 Floating Breakwater Tipe Pelat Horizontal

Penelitian FB tipe pelat horisontal digunakan untuk meredam gelombang datang. Kekakuan dan ukuran pelat adalah dua faktor utama yang mempengaruhi kinerja redaman gelombang. Dong et al. [12] mengusulkan desain papan jaring yang terbuat dari papan tipis dengan jaring *polyethylene* berderet di bawahnya (Gbr 2.21). Pada konfigurasi ini, papan dirancang untuk menekan gerakan partikel gelombang dalam arah vertikal, sementara jaring mengganggu orbital partikel air. Hasil uji model diperoleh bahwa struktur ini memiliki efisiensi redaman gelombang yang tidak bagus ($K_T > 0.5$) kecuali lebar papan cukup besar. Jaring tidak hanya membantu mengurangi K_T tetapi juga menurunkan kecepatan arus sekitar 20%

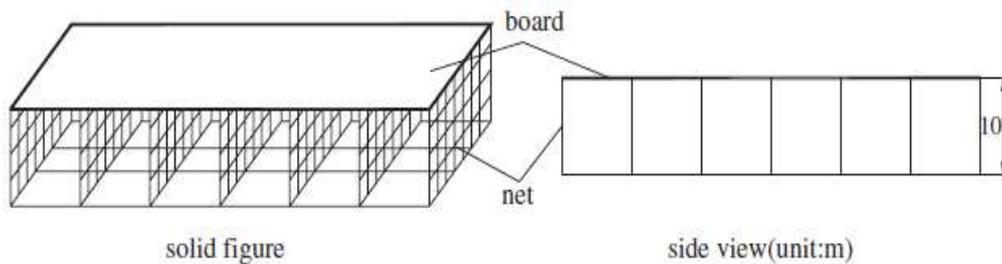
dalam tes model. Kinerja yang baik dapat dicapai dengan jaring pada interval 20 m. Kinerja pelat tipis elastik tunggal sebagai FB secara teoritis telah diteliti oleh Shugan et al. [84]. Jika panjang pelat fleksibel lebih pendek dari panjang gelombang datang ternyata tidak efektif meredam gelombang bila dibandingkan dengan pelat yang kaku. Namun, untuk panjang pelat sama besarnya dengan panjang gelombang, pelat elastis lebih efisien daripada pelat kaku dalam mengurangi K_T . Hal ini disebabkan oleh getaran pelat menyebabkan gelombang dapat secara efektif mengurangi transmisi gelombang melalui susunan pelat. Penelitian terbaru oleh Koley dan Sahoo [85] mengembangkan model analitik untuk analisis gelombang hambur tidak tegak lurus bidang struktur pada membran berpori fleksibel terapung. Studi ini menyimpulkan bahwa K_T dipengaruhi secara signifikan oleh porositas dan tegangan membran.

Selain desain dengan hanya satu pelat terapung di permukaan air, gagasan untuk menggunakan pelat horisontal berbagai lapis untuk memecah gelombang dapat dilakukan dengan cara menekan gerak partikel gelombang dalam arah vertikal. Cheong dan Patarapanich [86] mempelajari koefisien refleksi dan transmisi dari sistem pelat ganda horisontal. Berdasarkan simulasi numerik dan uji eksperimental, ditemukan bahwa redaman optimal untuk rasio kedalaman air dari pelat adalah 0.1 - 0.2 untuk transmisi gelombang minimum. Kinerja FB dua-pelat terendam dengan pelat berpori bagian atas dan pelat pejal dibagian bawah dianalisis oleh Liu et al. (2008).

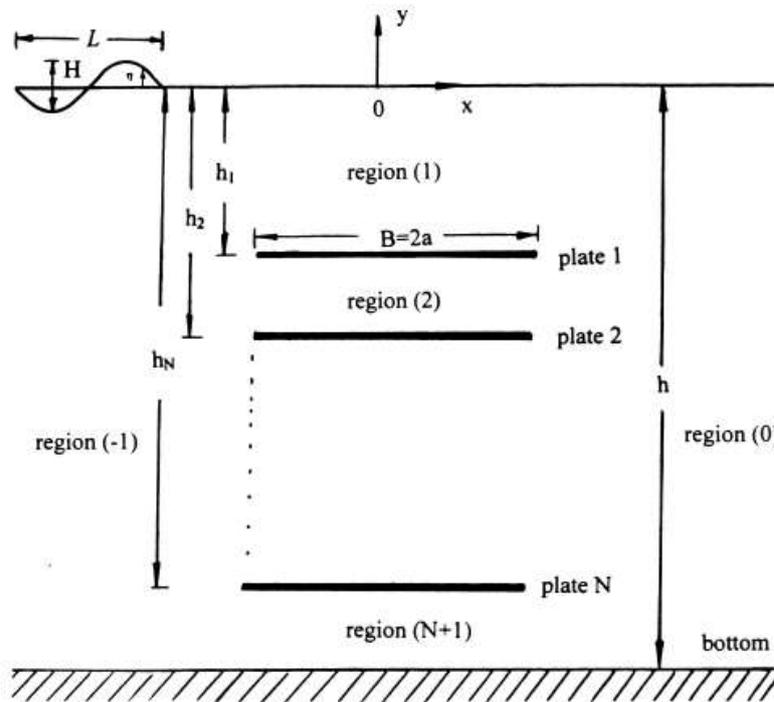
Wang dan Shen [87] mengembangkan solusi analitis untuk gelombang refleksi dan transmisi melalui group pelat horisontal terendam dengan menggunakan pendekatan ekspansi fungsi *Eigen* (Gbr 2.22). Peneliti ini menemukan refleksi dan transmisi gelombang itu dipengaruhi oleh panjang pelat, perendaman dari pelat atas dan kedalaman air relatif. Dengan menggunakan teknik yang sama, Usha dan Gayathri [88] menganalisis masalah pelat ganda dengan pelat atas terapung di permukaan bebas, dan menemukan bahwa lebar pelat optimal sekitar 0.37 - 0.39 kali dari panjang gelombang ketika jarak terendam relatif sekitar 0.22 - 0.23 untuk transmisi gelombang minimum.

Kinerja sistem pelat tebal ganda terendam dipelajari oleh Liu et al. [89], dan disimpulkan bahwa pelat atas harus dipasang di dekat permukaan bebas.

Pengurangan ketebalan plat juga efektif dalam meningkatkan kinerja hidrodinamik FB dalam praktek di lapangan. Pada saat gelombang datang merambat menuju pelat terendam, aliran mendapat percepatan di sekitar tepi sisi pelat, sementara aliran balik dihasilkan di sekitar tepi sisi yang lain. Dua aliran ini mengenai pelat dan menghasilkan gelombang pecah dan fisi gelombang meredam energi gelombang datang [90]. Kecepatan fluida yang cepat dihasilkan pada pelat terendam bagian atas, gaya angkat yang kuat bekerja pada pelat ini, sehingga mengakibatkan struktur naik ke atas. Efektivitas FB ini sangat tergantung pada kedalaman bagian yang terendam. Konfigurasi ini juga digunakan untuk menahan aliran yang lebih rendah, dengan demikian mengurangi beban pada sistem tambat.



Gambar 2.21 FB tipe *board net* [12]



Gambar 2.22 Pelat terendam horizontal [87]

2.1.2.7 Floating Breakwater Tipe Porous

Banyak upaya yang dilakukan untuk menganalisa interaksi gelombang dengan struktur laut berpori. Williams et al. [91] secara numerik telah meneliti kinerja fleksibilitas FB. Para peneliti ini menerapkan metode integral batas melalui *Teorema Green* untuk menentukan medan gelombang dan perilaku dinamis FB. Mereka menyimpulkan bahwa untuk kondisi gelombang tipikal dibutuhkan struktur yang kaku untuk mendapatkan koefisien refleksi gelombang tinggi. Namun, efek porositas FB, kekakuan tali tambat dan sudut pada gerakan gelombang tidak dibahas dalam studi mereka. Struktur berpori dapat digunakan secara efektif untuk mengurangi tinggi gelombang transmisi dan refleksi.

Sejumlah peneliti telah melakukan studi terkait interaksi gelombang pada struktur berpori. Chwang [34] dan Chwang dan Li [35] meneliti pelat berpori sebagai *wave maker*. Masalah refleksi dan transmisi gelombang oleh pelat berpori vertikal telah diselidiki oleh Chwang dan Dong [36], Twu dan Lin [37] dan Wang dan Ren [38]. Pengembangan penelitian ini selanjutnya dilakukan oleh Stiassnie dan Drimer [31], dengan pendekatan gelombang panjang. Mereka mempelajari *box* berpori terapung bebas hanya pada gerakan sway dengan sarat air sama dengan kedalaman air.

Efek *wave-trapping* karena porous FB (PFB) fleksibel yang terletak di depan dinding kedap vertikal dikaji oleh Wang dan Ren [92]. Selanjutnya Ren dan Wang [93] melakukan analisa secara analitik perilaku tali tambat pada FB terapung berpori. Pada penelitiannya faktor-faktor elevasi muka air, gaya hidrodinamis dan momen pengembali ditentukan. Gaya hidrodinamis pada PFB meningkat jika kekakuan struktur meningkat pula dan gaya tersebut akan menurun jika porositas meningkat. Sedangkan pengaruh interaksi gelombang permukaan pada pelat berpori horisontal dikaji oleh Yu dan Chwang [94]. Difraksi gelombang oleh FB berbentuk semi-berpori silinder secara teoritis diteliti oleh Darwiche et al. [95] dengan pendekatan ekspansi fungsi *eigen*. Interaksi gelombang dan struktur ponton berpori dengan lapisan atas yang kedap, sebagai idealisasi *Tension Leg Platform* telah dipelajari secara analitik oleh Lee dan Ker [27]. Williams dan Li [28] kemudian memperluas analisis ini untuk menangani kasus pada tangki

penyimpanan berbentuk silinder besar. Penelitian tentang silinder berpori diselidiki oleh Zhao et al. [42] dengan menambahkan pelat horizontal berpori (Gbr 2.24), yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi disipasi gelombang.

William et al. [41] mempelajari studi teoritis tentang hidrodinamika pada silinder terapung bebas dengan dinding samping berpori. Ditemukan bahwa permeabilitas, ukuran dan lokasi daerah berpori berpengaruh secara signifikan terhadap komponen horizontal dari eksitasi hidrodinamik dan beban reaksi, sedangkan pengaruhnya terhadap komponen vertikal dalam banyak kasus relatif kecil. Wang dan Sun [29] [30] menguji pengaruh empat bentuk konfigurasi FB terapung berpori (Gbr. 2.25) terhadap refleksi dan transmisi gelombang serta gaya tali tambat pada gelombang reguler. Lebar relatif berperan dalam redaman, dan nilai K_T akan menurun ketika B/L meningkat pada setiap kasus yang diuji. Jika kedalaman air dan tinggi gelombang datang meningkat, maka besar gaya tali tambat juga akan meningkat. FB berpori jika dibandingkan dengan bentuk konvensional, mempunyai gaya tali tambat yang lebih kecil. Namun beban impulsif pada arah gelombang datang harus dihindari. Konfigurasi geometri dapat mempengaruhi redaman dan gaya gelombang. Pada FB berpori, penetrasi moderat terjadi pada konfigurasi di bagian luar dan semi-tertutup di pusat arah horizontal (model 4) dan penetrasi terbesar (model 2 atau model 4) pada arah vertikal memberikan penurunan redaman dan gaya gelombang.

Koutandos dan Prinos [32] menginvestigasi FB berbentuk box dengan menambahkan pelat berpori yang terletak dibawah dibagian depan struktur ini (Gbr. 2.23). Analisa dilakukan dengan eksperimen dan hasilnya dibandingkan dengan model numerik gelombang COBRAS (*Cornell Breaking Wave and Structures*). Efek penambahan pelat diselidiki terhadap pengaruh karakteristik hidrodinamika (transmisi, refleksi, disipasi, kecepatan dan energi kinetik turbulensi). Pelat kedap air yang terpasang di bagian depan breakwater meningkatkan secara signifikan efisiensi struktur dalam meredam gelombang datang. Pelat permeabel mengurangi efisiensi struktur karena energi gelombang yang ditransmisikan melalui pelat berpori tersebut. Berdasarkan karakteristik hidrodinamik disimpulkan bahwa FB dengan pelat kedap air yang melekat pada bagian bawahnya lebih efisien. Perbandingan gaya horisontal dan vertikal yang bekerja pada struktur untuk semua

kasus yang diperiksa menunjukkan bahwa porositas pelat mempengaruhi gaya vertikal cukup kecil dan gaya horizontal yang sangat tajam yang bekerja pada struktur.

Shih [43] mengkaji FB pipa tegak lurus berpori (Gbr. 2.26), $\sigma^2 h/g$ adalah bentuk sederhana hubungan dispersi $\sigma^2 = gk \tanh kh$ yang mewakili keterkaitan sifat gelombang seperti panjang gelombang, frekuensi, dan bilangan gelombang untuk permukaan gelombang gravitasi pada air yang berubah-ubah, tetapi kedalamannya konstan. Hasil percobaan mengungkapkan bahwa untuk diameter pipa yang sama, perilaku dipengaruhi oleh tinggi gelombang datang untuk gelombang pendek, yakni $\sigma^2 h/g > 1.5$, tetapi untuk gelombang panjang efeknya kecil ketika $\sigma^2 h/g < 1.5$. Koefisien refleksi meningkat dengan kecuraman gelombang, sehingga pipa panjang lebih efektif mengurangi koefisien refleksi. Hasil ini juga menyimpulkan bahwa koefisien transmisi dipengaruhi oleh panjang pipa ketika $H_i/gT^2 > 0.004$. Karena struktur ini tetap, gaya hidrodinamika gelombang dan respons dinamis pada struktur tidak diteliti.

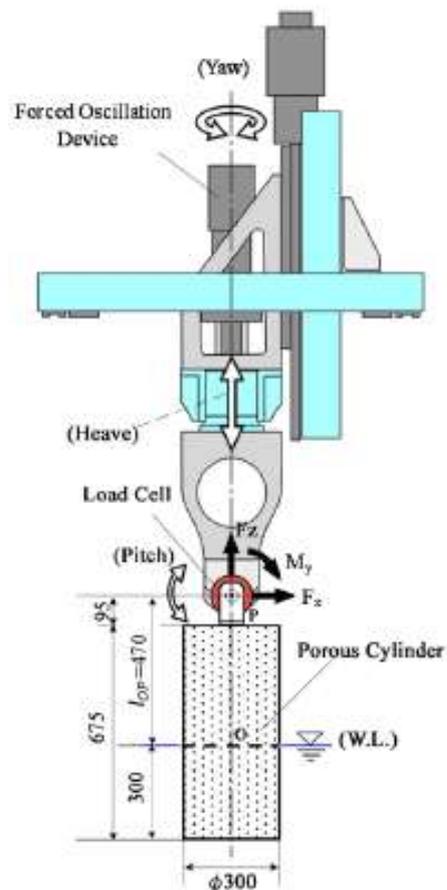
Berdasarkan konsep Koutandos dan Prinos [32] ini, Cho [39] mengembangkan FB *box* dengan pelat sisi berpori secara vertikal (Gbr. 2.27). Analisa dilakukan dengan teori potensial linier 2-D menggunakan *metode eigenfunction expansion*. Porositas, lebar dan panjang sisi pelat dapat membantu mengurangi koefisien transmisi dan juga meningkatkan kinerjanya. Parameter disain optimal dapat dicapai melalui studi parametrik secara komprehensif dengan menggunakan model numerik.

Penelitian terbaru FB berbentuk pelat 4-lapis (Gbr. 2.28) diteliti oleh Fang et al. [40]. Peningkatan jumlah lapisan dan lebar FB dapat meningkatkan kinerja dan disipasi gelombang datang. Kinerja struktur ini juga dapat ditingkatkan dengan mengurangi porositas pelat atas. Namun, jarak antara lapisan atas dan lapisan kedua atau porositas lempeng atas yang terlalu kecil dapat meningkatkan transmisi gelombang pada frekuensi tinggi. FB multi-layer dengan lebar tertentu, dapat meningkatkan kinerja keseluruhan diharapkan melalui desain porositas dan perendaman yang optimal dari setiap lapisan dengan mengkaji efek timbal balik dari pelat yang berdekatan. Zeng et al. [33] mempelajari kinerja FB berpori (Gbr.

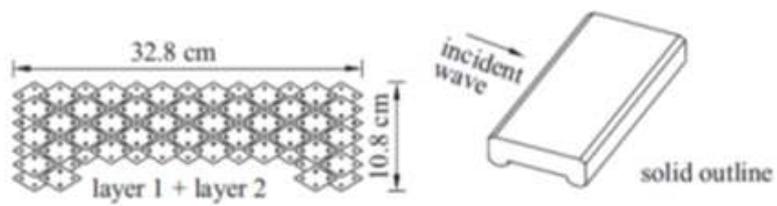
2.29) utamanya tentang disipasi gelombang dan gaya tali tambat. Berdasarkan penelitiannya, diperoleh informasi bahwa K_T lebih kecil 0.5%-4% terhadap bentuk konvensional dan tegangan tali tambat dapat direduksi 3%-5.5% dengan sistem tambat melebar.



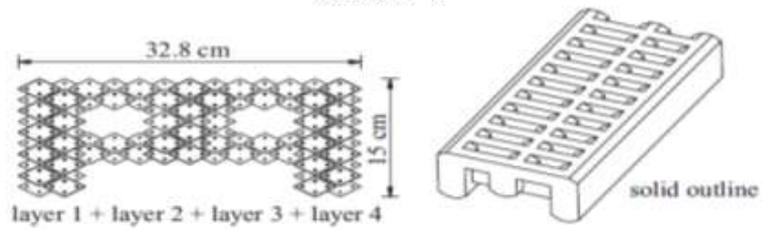
Gambar 2.23 *Semi-immersed breakwater* dengan pelat berpori [32]



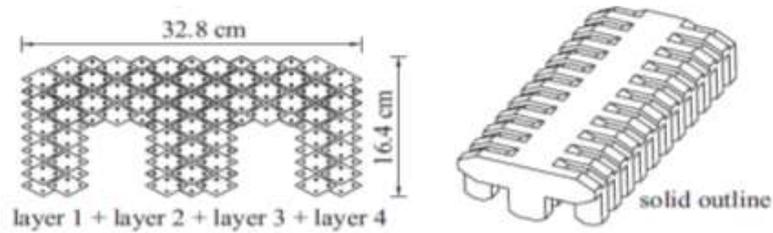
Gambar 2.24 Skema eksperimen silinder berpori [42]



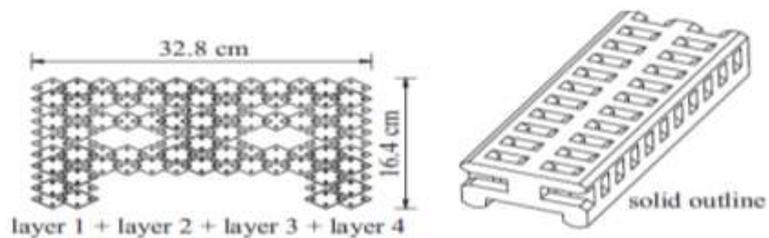
Model -1



Model-2



Model-3

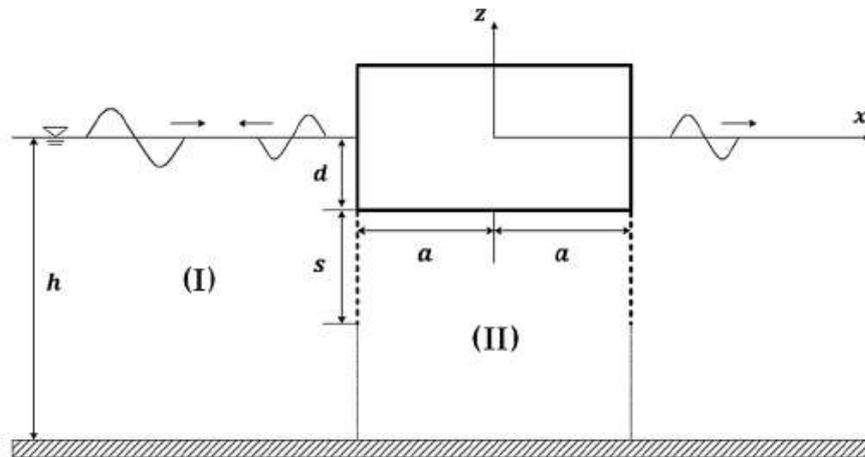


Model-4

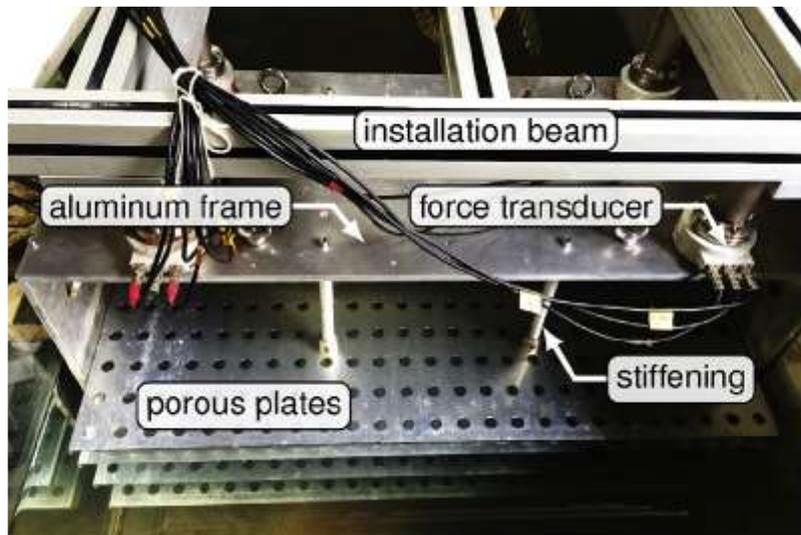
Gambar 2.25 Konfigurasi PFB [29]



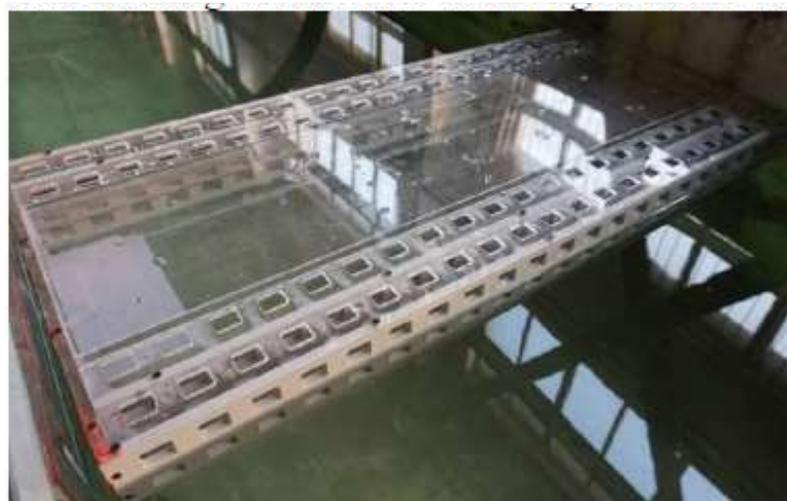
Gambar 2.26 FB pipa tegak lurus berpori [43]



Gambar 2.27 FB dengan pelat sisi berpori [39]



Gambar 2.28 FB pelat berpori 4-lapis horizontal [40]



Gambar 2.29 FB berpori [33]

Tabel 2.1 Investigasi berbagai FB tipe box

No.	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters				Dimensionless Parameters				Analy. Coef.	Motion	Mooring (deg)		
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d				H _i /L	B/L
A. FB Tipe Box																	
1	Box	McCarney (1985)	Experiment	Scale= 1:10 B=4.0, 4.8 I=29.7 h=1.5	Irregular	7.6	1.1	0.5- 1.1	2.5- 4.0	0	n.a	n.a	n.a	C _t	n.a	n.a	
2	Doble-Box	William at al. (2000)	Boundary Element Method (BEM)	B =4.88m Space=4.88m	Regular	12.19	1.22	n.a	n.a	0	n.a	n.a	n.a	n.a	surge heave pitch	45	
3	Box	Rahman at al. (2006)	Volume of Fluid (VOF) Method	L=0.304m B=0.68m H=0.137m	Irregular	0.62 0.65 0.68	0.0 0.3 0.6	n.a	0.8- 2.0	0	n.a	0.01 0.02 0.03	0.25- 0.35	C _t C _r C _l	Sway Heave Roll	60 90	
4	Hinge	Diamantoulaki & Angelides (2010)	3-D Hydrodynamic Model	Config. 0-5: L _r =20m; B=4m H _r =2m; dr=0.77m	Regular	10	n.a	n.a	n.a	0 45 90	n.a	n.a	0.02- 1.5	n.a	n.a	6 dof	n.a
5	Rectangular with & without pneumatic chambers	He at al. (2011)	Experiment	Model 1-4: L=1.42m; B=0.75m H=0.4m	Regular	0.45- 0.90	0.235- 0.177	0.04	1.1- 1.8	0	n.a	n.a	0.18- 0.45	C _t C _r C _l	n.a	n.a	
6	Module Box	Leokogeorgaki et al. (2014)	Experiment	Scale= 1:20 L _r =1.0m; L _{pb} =0.9m B=0.2m; H _r =0.07m	Regular Irregular	0.6	0.04	n.a	0.56- 1.01	45 60 90	n.a	0.03- 0.07	0.129- 0.410	n.a	heave roll	45 90	

Tabel 2.2 Investigasi berbagai FB tipe pontoon

No	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters						Dimensionless Parameters				Motion	Mooring (deg)	
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d	H/L	B/L			Analy. Coef.
B. FB Tipe Pontoon																	
1	Dual-Pontoon	William & Abul-Azm (1997)	Boundary Element Method (BEM)	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	surge heave pitch	n.a
2	Dual-Pontoon	Weng & Chou (2007)	Boundary Element Method (BEM)	w=0.25m; L=1.17m Space=0.5m	n.a	0.5	0.15	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	surge heave pitch	54.5
3	Pneumatic System	Koo (2009)	2-D non-liner Numerical Wave Tank (NWT)	B=50m ; db=10m gap=30m Dia Nozzle =1m	Regular Irregular	30	10	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	surge heave pitch	n.a
4	Dual-Pontoon	Tang et al. (2011)	Experiment & Boundary Element Method (BEM)	L=0.968m B=0.25m gap=0.016m fish net=0.5m x 0.455m	n.a	0.8	0.153	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	Sway Heave Roll	52
5	New Type	Ji et al. (2015)	Experiment	Scale= 1:20 dia=0.2m L=0.76m w=0.5m; h cage=0.4m	Regular	1.0	0.1	0.1- 0.2	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	Sway Heave Roll	n.a

Tabel 2.3 Investigasi berbagai FB tipe frame

No	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters				Dimensionless Parameters				Motion	Mooring (deg)			
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d			H _i /L	B/L	Analy. Coef.
C. FB Tipe Frame																	
1	Y-frame	Mani (1991)	Experiment	Scale=1:20 B _{top} =0.5m B _{btm} =0.1m D _{pipe} = 0.09m L _{pipe} =0.36-0.56m gap=2,4,6,9	Regular	1.0	0.16 0.36 0.46 0.56	0.054-0.24	1.2-2.0	0	n.a	0.46	0.01-0.1	0.095-0.224	C _t C _r	n.a	n.a
2	Cage	Murali & Mani (1997)	Experiment	Scale= 1:15 B=0.6,0.8,1.0 I=0.2,0.3,0.4 h=0.3	Regular	1.0	0.36-0.56	n.a	5.0-10.0	0	n.a	0.36-0.56	n.a	0.12-0.60	C _t C _r	n.a	24.4 36.1
3	Concrete	Allyn et al., 2001	Experimental & Finite Element Method (FEM) - STAAD III	Scale= 1:6.72 L=5.65m	Irregular	0.91	n.a	0.58 0.76	2.5 3.1	42	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t	n.a	n.a
4	Truss Structure	Uzaki et al. (2011)	Experiment	w=0.36m a=0.14m hp=0.12m ht=0.64m	Regular	0.6	0.06	0.021-0.13	0.56-2.0	0	0.14-1.20	n.a	0.029-0.058	n.a	C _t C _r C _i	Sway Heave	n.a

Tabel 2.4 Investigasi berbagai FB tipe mat, tethered float & pelat horizontal

No	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters				Dimensionless Parameters				Motion	Mooring (deg)				
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d			H _i /L	B/L	Analy. Coef.	
D. FB Tipe Mat																		
1	Floating Pipe Horizontal	Hegde et al. (2007)	Experiment	Scale= 1:30 n layers=3 D =0.032m S/D=5 w=0.77-4.91m	Regular	0.4 0.45 0.5	n.a	0.03- 0.18	1.2- 2.2	0	n.a	n.a	0.013- 0.05	0.4- 1.2	C _t	n.a	n.a	
2	Flexible mat-shape	Loukogeorgaki et al. (2012)	3-D Model Boundary Integral Equation Method (BIEM)	L _r =300m; B=60m H _r =2m; dt=0.5m	Regular	n.a	0.5	n.a	0- 0.625	0 30 60	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t C _r	6 dof	n.a	
E. FB Tipe Tethered Float																		
1	Tethered Float	Seymour & Hanes (1979)	Experiment	n Rows=11 D _{float} =0.292m L _{eff tht} =0.168m B _{float spec} =0.61m L _{float spec} =0.61m B _{Bwt} =0.775- 0.1079m L _{Bwt} =0.239m	Irregular	1.78	n.a	0.068- 0.153	1.13- 5.26	180	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t C _r C _t	n.a	n.a	n.a
F. FB Tipe Pelat Horizontal																		
1	Single-box, Double-box & Board net	Dong et al. (2008)	Experiment	Scale= 1:40	Regular	0.5	n.a	0.062 5-0.15	0.95- 1.58	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t	n.a	n.a	n.a

Tabel 2.5 Investigasi berbagai FB tipe porous

No	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters				Dimensionless Parameters				Analy. Coef.	Motion	Mooring (deg)			
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d				H _i /L	B/L	
G. FB Tipe Porous																		
1	Porous	Wang & Sun (2010)	Experiment	Scale= 1:75 L=0.32m B=0.68m h=0.2m porosity=0.63	Regular	0.44	0.40 0.42 0.44	0.04	0.6-1.4	0	n.a	n.a	0.025-0.132-0.107	0.569	C _t C _r C _l	0 n.a 30	15	
2	Porous Cylinder	Zhao at al. (2010)	Eigen Function Model with boundary Darcy's Law	R _{Cyl} =0.15m T _{plate} =0.001m D _{holes} =0.003m Ratio porous=0.14; 0.226; 0.326	Regular	3	0.3	n.a	0.5-1.8	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	Heave Surge Pitch	n.a	n.a
3	Porous Plate	Koutandos & Prinos (2011)	Numerical (COBRAS) & Experiment	L _{Bwt} =2m B _{Bwt} = 1.8m h _{Bwt} =1.5m	Regular	2	0.2	0.3	2.34-9.17	0	n.a	n.a	n.a	0.04-0.24	C _t C _r C _l	n.a	n.a	n.a
4	Porous Pipe	Shih (2012)	Experiment	D _{pipe} =0.006-0.016m W _{Bwt} =0.05-0.2m	Irregular	0.25	n.a	0.01-0.04	0.5-1.5	0	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t C _r C _l	n.a	n.a	n.a

Tabel 2.5 Investigasi berbagai FB tipe porous..... Lanjutan

No	Type of Floating Breakwater	Researcher	Type of Analysis	Model Dimension	Test Parameters							Dimensionless Parameters				Motion	Mooring (deg)		
					Wave	depth d (m)	Draft D (m)	H _i (m)	T (s)	α (deg)	d/L	D/d	H/L	B/L	Analy. Coef.				
5	Porous Side Plate	Cho (2016)	The matched eigen function expansion method (MEEM)	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t C _r C _l	Sway Heave Roll	n.a
6	Four-Layer Horizontal Porous Plate	Fang at al. (2018)	Experiment	$t_{h,plate}=0.002m$ $w=0.45m,$ $0.6m$ Porosities (%)=0.05, 0.08, 0.125 & 0.18	Regular	0.8	n.a	0.02-0.04	0.6-1.5	0	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t C _r C _l	n.a	n.a
7	Porous	Zheng at al. (2018)	Experiment	Scale= 1:33 $L_m=0.99m$ $B_m=0.545m$ $T_m=0.12m$ $L_{chain}=0.745m$	Regular	0.455	0.091	0.06-0.12	0.8-1.4	0	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	C _t	n.a	n.a

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Transformasi Energi Gelombang

Gelombang yang merambat dari laut dalam menuju laut dangkal (pantai), akibat pengaruh dasar laut terhadap gerakan partikel air, maka energi gelombang akan mengalami transformasi sesuai dengan kondisi dasar laut. Bentuk transformasi energi gelombang tersebut antara lain shoaling, refraksi, difraksi, gelombang pecah dan refleksi [96-98].

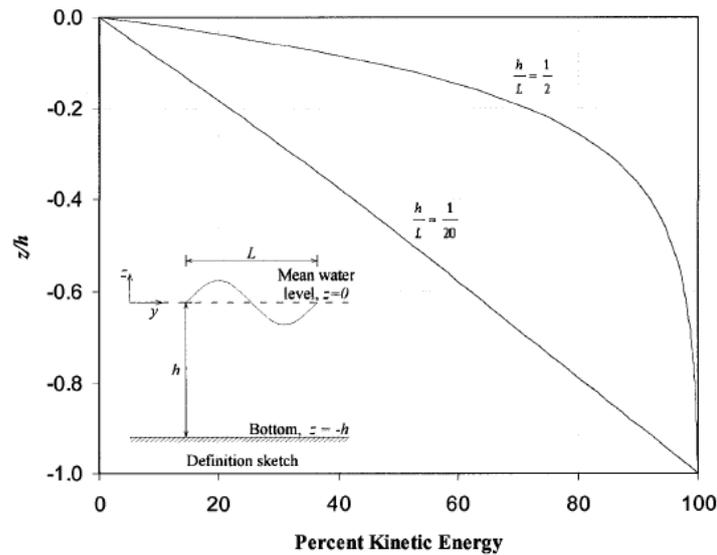
Fenomena serupa terjadi jika gelombang mengenai FB. Energi gelombang akan mengalami transformasi setelah mengenai struktur tersebut. Perilaku hidrodinamik FB akibat transformasi energi tersebut dipengaruhi oleh bentuk geometri struktur. FB mengganggu gelombang datang untuk mengurangi energi gelombang yang ditransmisikan dengan memantulkan dan menghilangkan sebagian energi gelombang yang masuk. Oleh karena itu, tujuan utama desain FB adalah untuk mengurangi amplitudo dari gelombang yang dipancarkan. Istilah terapung tidak mengacu pada struktur terapung bebas, tetapi struktur akan dibatasi gerakannya dengan tali tambat. Pemecah gelombang hanya akan menempati sebagian kecil dari kedalaman air dan umumnya berada di dekat permukaan air. Oleh karena ini penempatan FB perlu mempertimbangkan distribusi energi kinetik gelombang. Persentasi distribusi energi kinetik di atas setiap kedalaman z diberikan oleh Ozeren [99]:

$$\text{Persen Energi Kinetik} = 1 - \frac{\text{Sinh } 2k(h-z)}{\text{sinh } 2kh} \times 100\% \quad (2.2)$$

Hubungan ini dinyatakan sebagai fungsi kedalaman relatif z/h untuk $h/L=0.5$ dan $h/L=0.05$ (Gbr 2.30)

Interaksi gelombang dengan FB menyebabkan sebagian energi gelombang dipantulkan, sebagian energi gelombang akan ditransmisikan melalui bawah dan sekitar struktur dan diserap dalam bentuk disipasi gelombang. Interaksi ini akan menimbulkan beberapa komponen gaya pada struktur ini. Persamaan kesetimbangan energi untuk proses fisik ketika gelombang mengenai struktur FB dinyatakan sebagai:

$$E_I = E_T + E_R + E_L \quad (2.3)$$



Gambar 2.30 Persen energi kinetik terhadap kedalaman relatif z/h [99]

dimana E_I Total energi gelombang datang, E_T total energi gelombang transmisi, E_R total energi gelombang refleksi dan E_L total energi disipasi gelombang. Berdasarkan persamaan 2.3 diatas dapat diperoleh:

$$E_I = \frac{\gamma_w H_i^2 L}{8} ; E_R = \frac{\gamma_w H_r^2 L}{8} ; E_T = \frac{\gamma_w H_t^2 L}{8} \quad (2.4)$$

Jika energi yang hilang setara dengan tinggi gelombang H dan periode gelombang T yang sama, maka total energi gelombang yang dihamburkan adalah:

$$E_L = \frac{\gamma_w H_i^2 L}{8} \quad (2.5)$$

Dengan simplifikasi persamaan kesetimbangan energi dapat ditulis:

$$\left(\frac{H_r}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{H_t}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{H_l}{H_i}\right)^2 = 1 \quad (2.6)$$

$$K_R^2 + K_T^2 + K_L^2 = 1 \quad (2.7)$$

dimana K_R koefisien refleksi, K_T koefisien transmisi dan K_L koefisien loss. Disain FB efektif jika K_T dibuat sekecil mungkin sedangkan K_R dan K_L cukup besar. Namun dengan meningkatnya koefisien refleksi yang terlalu besar akan menyebabkan gelombang pantul cukup besar disisi lepas pantai struktur tersebut.

Energi gelombang datang dan refleksi yang terjadi dapat diestimasi dengan menggunakan metode Goda dan Suzuki [100] dengan memisahkan gelombang

datang dan gelombang refleksi. Berdasarkan time-series elevasi muka air yang diukur dengan dua probe gelombang pada permukaan air (Gbr. 2.31). Amplitudo gelombang dianalisis dengan teknik FFT. Selanjutnya koefisien refleksi K_R diestimasi sebagai berikut:

Profil gelombang datang dan refleksi gelombang dilokasi $x=x_1$ dan $x=x_1+\Delta l$ dapat diekspresikan sebagai [100]:

$$\eta_1 = (\eta_i + \eta_r)_{x=x_1} = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \quad (2.8)$$

$$\eta_2 = (\eta_i + \eta_r)_{x=x_2} = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t \quad (2.9)$$

dimana:

$$A_1 = a_i \cos \theta_i + a_r \cos \theta_r \quad (2.10)$$

$$B_1 = a_i \sin \theta_i - a_r \sin \theta_r \quad (2.11)$$

$$A_2 = a_i \cos(k\Delta l + \theta_i) + a_r \cos(k\Delta l + \theta_r) \quad (2.12)$$

$$B_2 = a_i \sin(k\Delta l + \theta_i) - a_r \sin(k\Delta l + \theta_r) \quad (2.13)$$

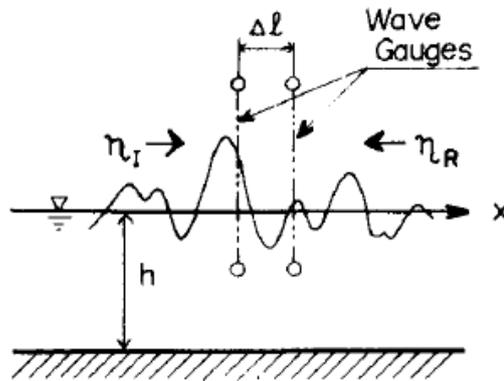
$$\theta_i = kx_1 + \varepsilon_i \quad (2.14)$$

$$\theta_r = kx_1 + \varepsilon_r \quad (2.15)$$

Amplitudo a_i dan a_r dapat dihitung dengan:

$$a_i = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} [(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$a_r = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} [(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2]^{1/2} \quad (2.17)$$



Gambar 2.31 Definisi sket gelombang refleksi dan datang [100]

Energi gelombang datang E_i dan pantul E_r dapat ditentukan sebagai:

$$E_i = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_i(f) df \quad (2.18)$$

$$E_r = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_r(f) df \quad (2.19)$$

$S_i(f)$ dan $S_r(f)$ adalah spektrum frekuensi gelombang datang dan refleksi dan f frekuensi. Selanjutnya K_R dan K_T dapat ditentukan dari:

$$K_R = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} \quad (2.20)$$

$$K_T = \frac{H_t}{H_i} \quad (2.21)$$

dimana H_i dan H_t adalah tinggi gelombang datang dan transmisi. Prediksi redaman gelombang (K_L koefisien loss) dapat dihitung sebagai:

$$K_L = \sqrt{1 - K_R^2 - K_T^2} \quad (2.22)$$

2.2.2 Hidrodinamika Gerakan Struktur Terapung

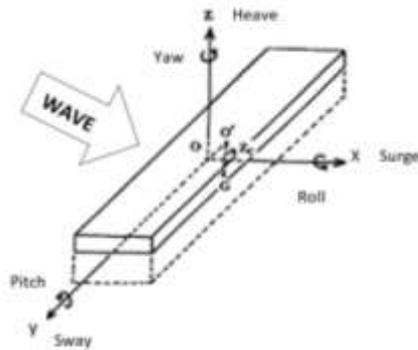
2.2.2.1 Model Gerakan Struktur Terapung

Bangunan apung mempunyai 6 derajat kebebasan, yang terdiri dari gerak translasi dan rotasi (Gbr 2.32). Gerak translasi merupakan gerakan dimana setiap titik dari bangunan apung bergerak dengan bentuk lintasan yang sama lurus, sedangkan gerak rotasi merupakan gerak dimana setiap titik bangunan apung bergerak dengan lintasan lingkaran. Jenis gerak dari struktur terapung tersebut adalah:

- Mode gerak translasi, yakni: *surge*,(sb-x), *sway* (sb-y) dan *heave* (sb-z)
- Mode gerak rotasi, yakni *roll* (sb-x), *pitch* (sb-y) dan *yaw* (sb-z)

2.2.2.2 Beban Hidrodinamika Struktur Terapung

Suatu struktur terapung di laut akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung [102] diantaranya:



Gambar 2.32 Derajat kebebasan struktur apung [101]

a. Gaya Eksitasi Gelombang

Gaya yang dialami struktur terapung, saat struktur ditahan untuk beresilasi tetapi menerima gelombang datang (beban akibat eksitasi gelombang). Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (gaya Froude-Krylov) dan gaya difraksi. “Gaya Froude-Krylov” dapat ditentukan dengan pers. 2.23, dengan p merupakan distribusi tekanan, n merupakan unit vektor dan dA merupakan luasan kecil dari suatu benda.

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \tag{2.23}$$

Persamaan ini menghubungkan distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut untuk struktur didapat dengan menurunkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan Bernoulli (pers. 2.24). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks [102].

$$p = \rho g \zeta_0 e^{kz} \sin(\omega t - kx) \tag{2.24}$$

dimana ρ massa jenis air sekitar struktur (kg/m³), g percepatan gravitasi (m/s²), ζ_0 amplitudo gelombang (m), k angka gelombang, z posisi di sumbu vertikal (m), ω frekuensi gelombang (rad/s), t waktu (s) dan x posisi di sumbu horizontal (m).

b. Gaya Reaksi

Gaya saat struktur terapung digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang (gaya reaksi). Gaya reaksi yang dialami

struktur dipengaruhi oleh massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*) dan kekakuan (*stiffness*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.

- Massa Tambah (*Added Mass*)

Bessel 1828 melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*) [103]. Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung. Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak. Gaya akibat massa tambah tersebut diformulasikan sebagai:

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \tag{2.25}$$

dimana i mode gerak struktur 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*); a massa tambah (kg) dan $\ddot{\xi}$ respon percepatan gerak struktur (m/s^2).

- Redaman (*damping*)

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, pers. 2.26 ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numerik [104]:

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \tag{2.26}$$

dimana b koefisien redaman hidrodinamis dan $\dot{\xi}$ respon kecepatan gerak struktur (m/s).

- Kekakuan (*stiffness*)

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave* (ξ_3), *pitch* (ξ_{44}) dan *roll* (ξ_5) [105]. Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai pers. 2.27. Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.27)$$

dimana c kekakuan struktur (N/m) dan ξ respon gerak struktur (m). Nilai c dari *heave*, *roll* dan *pitch* adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.28)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM_T} \quad (2.29)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM_L} \quad (2.30)$$

dimana A_{wp} luas permukaan di garis air (m²), V volume displacement struktur (m³), $\overline{GM_T}$ panjang metacentre melintang (m) dan $\overline{GM_L}$ panjang metacentre memanjang (m).

2.2.2.3 Persamaan Gerak

Gerak bangunan apung dapat dianalisa dengan menggunakan hukum II Newton sebagai:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.31)$$

Dengan $\sum F$ resultan gaya (N), m massa struktur (kg) dan $\ddot{\xi}$ percepatan struktur (m/s²). Persamaan ini menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberikan gaya kepada struktur, sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang melawan gaya aksi:

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.32)$$

Dengan memasukkan gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan ini dapat dikembangkan menjadi:

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.33)$$

dimana $\sum F$ gaya resultan (N), F_a gaya inersia (N), F_b gaya redaman (N) dan F_c gaya pengembali (N) . Dengan demikian diperoleh persamaan:

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.34)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.35)$$

dimana $F_{eksitasi}$ gaya eksitasi gelombang (N), m massa struktur (kg), a massa tambah (kg), $\ddot{\xi}$ respon percepatan gerak struktur (m/s^2), b koefisien redaman sistem, $\dot{\xi}$ respon kecepatan gerak struktur (m/s), c kekakuan struktur (N/m) dan ξ respon posisi gerak struktur (m).

2.2.2.4 Response Amplitude Operator (RAO)

RAO merupakan nilai untuk mentransfer beban gelombang dalam rentang frekuensi menjadi bentuk respons yang diterima pada suatu struktur. Sehingga umumnya RAO juga dikenal sebagai *transfer function*. Selain itu RAO juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang (ξ_{respon}/ξ_{gel}) . Amplitudo respons bisa berupa gerakan, tegangan maupun getaran.

RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur terhadap amplitudo gelombang datang, yakni:

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\xi_{k0}}{\zeta_0} \right) \quad (2.36)$$

Dengan ξ_{k0} amplitudo respon gerakan struktur (m) dan ζ_0 amplitudo gelombang (m). Sedangkan untuk RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang, yakni:

$$\text{RAO}(\omega) = \frac{\xi_{k0}}{k_w \zeta_0} = \frac{\xi_{k0}}{(\omega^2/g) \zeta_0} \quad (2.37)$$

Dengan ξ_{k0} amplitudo respon gerakan struktur (m), ζ_0 amplitudo gelombang (m), k_w angka gelombang dan ω frekuensi gelombang (rad/m).

2.2.3 Sistem Mooring

Sistem *mooring* pada struktur terapung berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, *wire*, atau *syntetic rope*. Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya atau tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Menurut McCartney [4], pemasangan sistem *mooring* pada FB ada 3 cara, yaitu: a) FB dapat dipasang dengan piling, dimana FB naik dan turun mengikuti elevasi muka air tetapi tidak ada gerakan lateral; b) FB dapat dipasang dengan menggunakan sistem anchor dengan tali tambat; dan c) FB dapat dipasang dengan menggunakan pile pancang dan talinya. Ketiga cara pemasangan sistem *mooring* tersebut ditunjukkan pada Gbr. 2.33. Tipe-tipe dari sistem *mooring* pada struktur apung adalah sebagai berikut:

- *Catenary Line Mooring*

Merupakan sistem *mooring* yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini, jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.

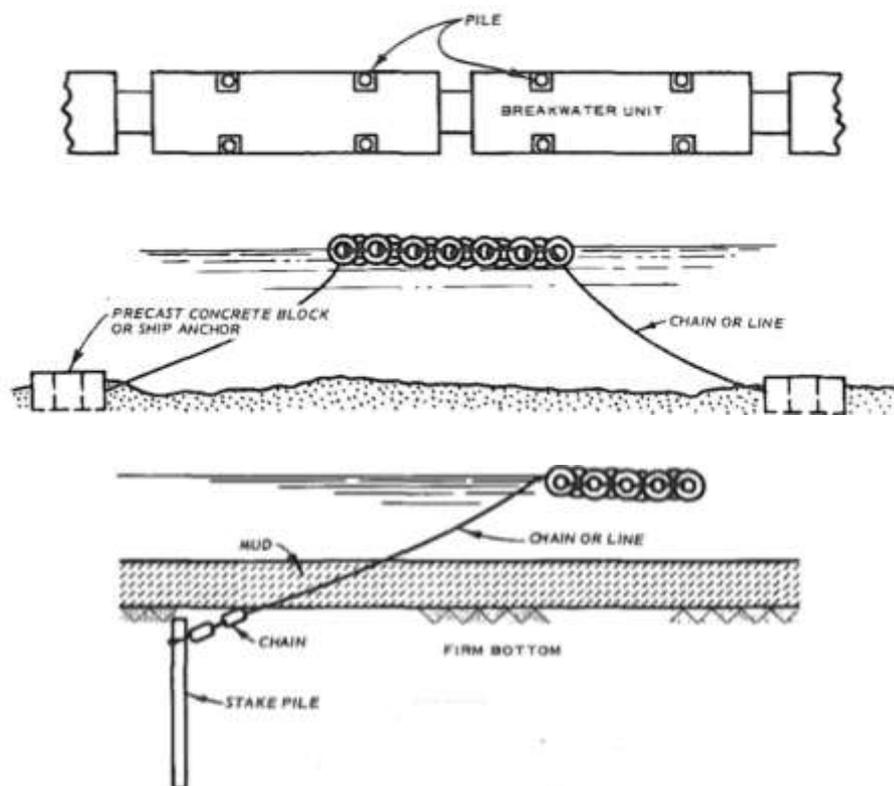
- *Taut Mooring System*

Sistem *mooring* ini memiliki konfigurasi *mooring lines* dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut*

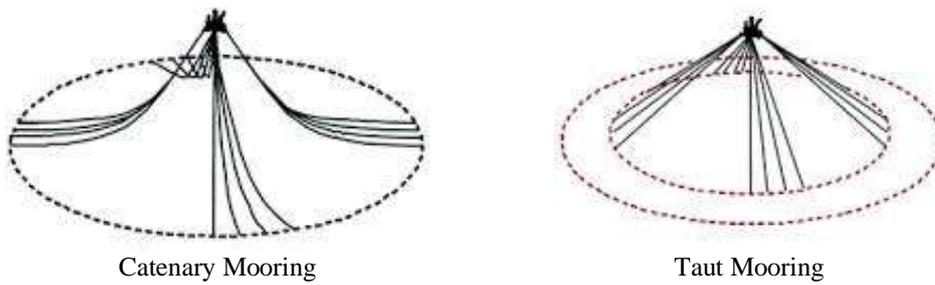
mooring ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.

2.2.4 Kesebangunan Model

Dasar dari pemodelan fisik adalah perilaku model memiliki kemiripan dengan prototipe. Dengan demikian, model fisik yang divalidasi dengan benar dapat digunakan untuk memprediksi prototipe. Namun, ada kemungkinan bahwa hasil model fisik mungkin tidak menunjukkan perilaku prototipe karena efek skala atau efek laboratorium. Peran model fisik adalah untuk meminimalkan efek skala dengan memahami dan menerapkan hubungan kesamaan yang tepat, dan untuk meminimalkan efek laboratorium melalui operasi model [107].



Gambar 2.33 Cara pemasangan sistem mooring FB [4]



Gambar 2.34 Sistem tambat tipe catenary dan taut [106]

Model fisik memiliki beberapa keuntungan [108], yakni:

- Model fisik dapat menggabungkan dan mengintegrasikan persamaan baik linear maupun non-linear tanpa menyederhanakan asumsi dan dapat menentukan koefisien empiris untuk model analitis dan numerik yang kurang dipahami.
- Eksperimen lapangan sangat bervariasi dan sulit dikendalikan (gelombang, angin, arus, dan lainnya).
- Eksperimen pada model lebih terkontrol. Ukuran yang lebih kecil memungkinkan pengumpulan data yang lebih mudah dan lebih murah dari beberapa variable.
- Model fisik memberikan pandangan langsung pada proses.
- Konstruksi prototipe mungkin sangat berisiko atau tidak ekonomis tanpa model untuk memverifikasi asumsi dan kinerja.

Selain itu model fisik juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya :

- Efek skala dapat mempengaruhi kondisi realita. Untuk meminimalkan efek skala, dapat menggunakan model sebesar mungkin yang sesuai dengan waktu, biaya, dan kendala ruang fasilitas yang tersedia.
- Efek laboratorium yang mencakup batasan-batasan model yang diperlukan untuk mendukung pengujian yang dilakukan. Di dunia nyata, tidak ada batas buatan untuk menghasilkan efek yang diinginkan, gelombang mungkin memiliki karakteristik multi arah dengan frekuensi dan penyebaran terarah yang tidak selalu memungkinkan untuk disimulasikan secara akurat di laboratorium.

- Pemaksaan fungsi dalam prototipe tidak dapat disimulasikan dalam model karena biaya atau keterbatasan.
- Konstruksi dan penerapan model fisik mungkin tidak hemat biaya. Untuk aplikasi yang relatif mudah, model numerik dapat lebih hemat biaya. Aplikasi model fisik dan numerik harus dipertimbangkan.

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya [109].

2.2.4.1 Kesamaan Geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.38)$$

Dimana l_p dan l_m dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan λ merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

2.2.4.2 Kesamaan Kinematik

Kesamaan kinematik menunjukkan kesamaan gerak antara partikel dalam model dan prototipe. Kesamaan kinematik dicapai ketika rasio antara komponen dari semua gerakan vektor untuk prototipe dan model adalah sama untuk semua partikel setiap saat. Pada model yang serupa secara geometris, kesamaan

kinematik memberikan jalur partikel yang secara geometris mirip dengan prototipe. Kesamaan kinematik memastikan gerakan gelombang dan aliran kinematika terkait direplikasi dengan benar dalam model fisik.

Sebangun kinematik dipenuhi apabila aliran pada model dan prototipe sebangun. Menandakan bahwa kecepatan aliran di titik-titik yang sama pada model dan prototipe mempunyai arah yang sama dan sebanding.

2.2.4.3 Kesamaan Dinamik

Kesamaan dinamik antara dua sistem yang serupa secara geometris dan kinematis mensyaratkan bahwa rasio semua gaya vektor dalam kedua sistem harus sama [110]. Hal ini berarti bahwa harus ada rasio prototipe terhadap model konstan dari semua massa dan gaya yang bekerja pada sistem. Persyaratan untuk kesamaan dinamis muncul dari hukum kedua Newton yang menyamakan jumlah vektor gaya eksternal yang bekerja pada suatu elemen dengan reaksi massa elemen terhadap gaya-gaya tersebut.

Sebangun dinamik sangat diperlukan dalam permodelan fisik. Hughes [107], menyatakan bahwa pada struktur pantai proses fisik yang terjadi dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Gaya-gaya tersebut meliputi gaya inersia, gaya tekan, gaya berat, gaya gesek dan gaya tegangan permukaan. Dalam penelitian ini kriteria kesebangunan yang harus dipenuhi adalah kriteria sebangun dinamik menurut kondisi bilangan Froude. Bilangan Froude dapat diekspresikan dengan rasio antara gaya inersia dengan gaya gravitasi.

$$F_i = \rho L^2 v^2 \quad (2.39)$$

$$F_g = \rho L^3 g \quad (2.40)$$

dimana F_i gaya inersia, F_g gaya berat, ρ densitas fluida (kg/m^3), L panjang (m), v kecepatan (m/s) dan g percepatan gravitasi (m/s^2).

Sebangun dinamik diekspresikan sebagai perbandingan gaya-gaya tersebut diatas sebagai bilangan tak berdimensi dan dinyatakan dalam kriteria-kriteria pada bilangan Froude:

$$\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_p = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_m \quad (2.41)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel 2.6 merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude.

Tabel 2.6 Faktor pengali model terhadap prototype pada berbagai variable yang digunakan dalam skala Froude [111]

<i>Variable</i>	<i>Unit</i>	<i>Scale Factor</i>	<i>Remarks</i>
Geometric			
Length	L	λ	Any Characteristic dimension of the object
Volume	L ³	λ^3	For any portion of the object
Angle	None	1	e.g., between members or solid angle
Radius of Gyration	L	λ	Measured from a fixed point
Moment of Inertia Mass	ML ²	λ^5	Taken about a fixed point
Center of Gravity	L	λ	Measured from a reference point
Kinematics & Dynamics			
Time	T	$\lambda^{1/2}$	The same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time
Velocity	LT ⁻¹	$\lambda^{1/2}$	Rate of change of displacement
Acceleration	LT ⁻²	1	Rate of change of velocity
Displacement	L	λ	Position at rest is considered zero
Spring Constant (Linear)	MT ⁻²	λ^2	Force per unit length of extension
Damping Factor	None	1	A ratio of damping and critical damping coefficient
Natural Period	T	$\lambda^{1/2}$	The period at which inertia force = restoring force
Wave Mechanics			
Wave Height	L	λ	Consecutive crest to trough distance
Wave Period	T	$\sqrt{\lambda}$	The time between two successive crests passing a point
Wave Length	L	λ	Distance between two successive crests at a given time
Wave Elevation	L	λ	Form of wave (distance from still waterline)

2.3 Keterbaruan dan Orisinalitas Penelitian

Penelitian tentang floating breakwater telah dimulai dari bentuk yang paling sederhana tipe *box*, *pontoon*, *frame*, *mat*, *tehtered fload*, *pelat horizontal* hingga ke bentuk terkini tipe *porous* (Tabel 2.1 - 2.5). Berbagai tipe porous floating breakwater (PFB) ini oleh para peneliti telah dirancang dengan melakukan modifikasi dengan mengubah bentuk, layout dan koneksi antar struktur untuk mendapatkan koefisien transmisi, refleksi, gaya mooring dan gerakan struktur yang mempunyai efek hidrodinamika yang cukup baik.

Berdasarkan analisis Uzaki et al [74] bahwa rangka batang di depan struktur dapat memecah gelombang gelombang datang sehingga dapat menurunkan energi gelombang dan menurut Wang dan Sun [30] disain pelat porous pada sisi FB sangat efektif meningkatkan kinerja FB dan optimasi parameter disain dapat dikaji secara komprehensif dengan simulasi numerik. Penelitian Fang et al [40], jumlah lapisan pelat berpori dan lebar FB yang semakin besar akan meningkatkan kemampuan disipasi pada gelombang panjang. Lebar FB berperan cukup signifikan. Perilaku ini juga dapat dilakukan dengan menurunkan porositas pelat bagian atas. Bentuk porous juga dapat menurunkan gaya mooring 3%-5.5% dengan sistem tambat melebar. Peneliti Wang dan Sun [29] [30], menemukan bahwa gaya mooring yang terjadi di posisi *windward* dan *leeward* cenderung sama jika gaya mooring semakin meningkat dan sudut mooring semakin menurun. K_T semakin turun dengan meningkatnya B/L (B lebar FB, L panjang gelombang) dan gaya mooring dan disipasi energi gelombang meningkat dengan semakin besarnya B/L ($K_T \leq 0.5$ dan $E_{loss} \geq 0.78$ jika $B/L \geq 0.323$). Zeng et al [33] membandingkan FB bentuk porous dan konvensional menemukan bahwa, pada tinggi gelombang (H) yang sama, K_T dan gaya mooring semakin besar dengan meningkatnya periode gelombang (T) dan untuk T yang sama, K_T dan gaya mooring semakin besar dengan meningkatnya tinggi gelombang. Namun pada gelombang panjang dengan H kecil, FB tipe porous tidak dapat secara efektif mereduksi gelombang pada kondisi freeboardnya kecil. Jadi freeboard berperan sangat penting dalam perencanaan FB dimana struktur tersebut akan dikonstruksi.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, studi literatur yang telah dilakukan, penelitian ini akan mengkaji analisis kinerja hidrodinamika floating breakwater bentuk berpori sebagai fokus utama, yakni pengembangan bentuk porous floating breakwater (PFB). Bentuk porous mempunyai beberapa keunggulan sebagaimana diuraikan diatas oleh peneliti terdahulu. Diharapkan bahwa hasil dari penelitian ini akan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan disain floating breakwater dalam mereduksi gelombang laut. Penelitian ini memberikan kontribusi keilmuan berupa modifikasi tipe berpori/porous berupa usulan bentuk slope berpori. Bentuk porous ini diusulkan menjadi dua bentuk dasar, yakni non-porous slope dan porous slope.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

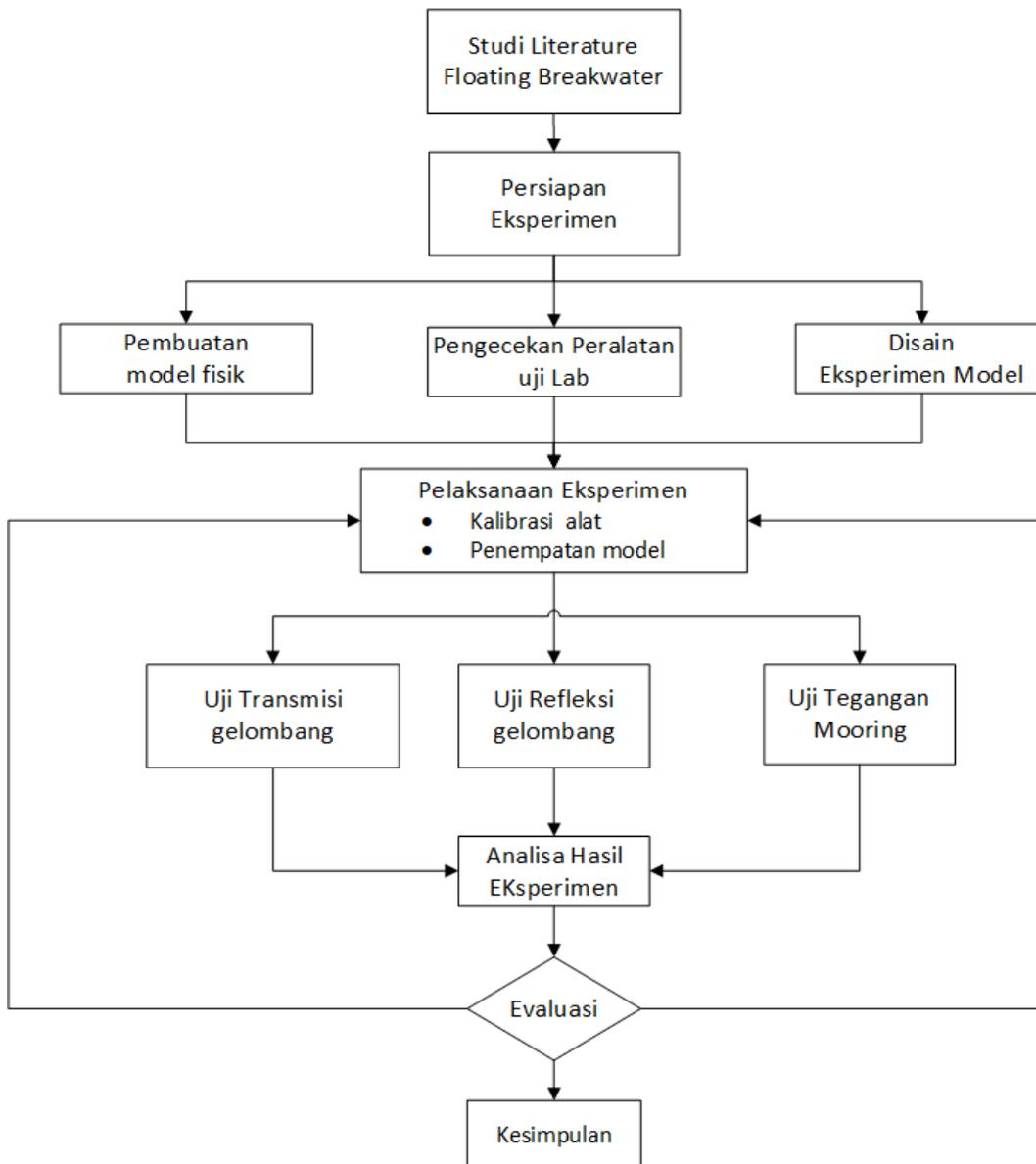
3.1 Metodologi Eksperimen

Proses penelitian perlu disusun dan dipersiapkan secara sistematis untuk memudahkan tahapan pelaksanaan. Tahapan pelaksanaan tersebut secara garis besar dibagi dalam 2 tahap, yakni:

Tahap pertama merupakan “Tahap Eksperimen di Laboratorium”. Pada Tahap ini akan dilakukan pembuatan model fisik PFB untuk diuji di Laboratorium. PFB dirancang berbahan plat Aluminium, fibreglass, PVC dan MDF sebagai model. Peralatan pendukung proses pembuatan model disiapkan dengan perencanaan yang baik agar sesuai dengan disain yang direncanakan. Selanjutnya model hasil rancangan diuji di wave flume di Departemen Teknik Kelautan ITS. Materi penting yang diuji pada tahap ini antara lain: uji transmisi dan refleksi gelombang, dan tegangan mooring akibat gaya gelombang. Pada uji laboratorium akan dilakukan pada berbagai parameter gelombang (H , T , α) dan berbagai bentuk layout tali tambat serta susunan PFB. Hasil model eksperimen ini selanjutnya dianalisa dan dibandingkan dengan pemodelan numerik.

Tahap kedua merupakan “Tahap Pemodelan Numerik” dilakukan untuk melengkapi uji model fisik pada tahap sebelumnya. Perilaku hidrodinamis, efisiensi dan efektifitas FB akan dilakukan dengan pemodelan numerik menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD). Uji model numerik ini mencakup transmisi gelombang, refleksi gelombang, gerakan struktur akibat gaya gelombang serta tegangan mooring. Hasil kajian pemodelan numerik akan ditelaah lebih jauh dengan melihat kinerja dari berbagai hasil perancangan PFB terhadap uji model fisik. Detail pemodelan numerik dibahas dalam subbab 3.2.

Tahapan penelitian eksperimen mengikuti diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir eksperimen PFB di wave flume

3.1.1 Skala Model Fisik

Skala model yang digunakan berdasarkan kriteria kesebangunan dinamik menurut bilangan *Froude*, dimana gaya dan tekanan pada prototipe dan model adalah sama. Hubungan antara model dan prototipe dinyatakan dengan besaran

skala tanpa distorsi, dimana skala horizontal dan vertikal sama. Hubungan model dan prototipe dinyatakan dengan beberapa perbandingan besaran sbb:

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (3.1)$$

- Dimensi panjang, kedalaman air, diameter dan tinggi gelombang: $L = \lambda$
- Dimensi waktu: $T = \lambda^{1/2}$

dimana p prototipe, m model, λ rasio skala linier protipe dan model PFB. Pada penelitian ini digunakan skala 1:20 untuk menyesuaikan dimensi PFB dan flume tank.

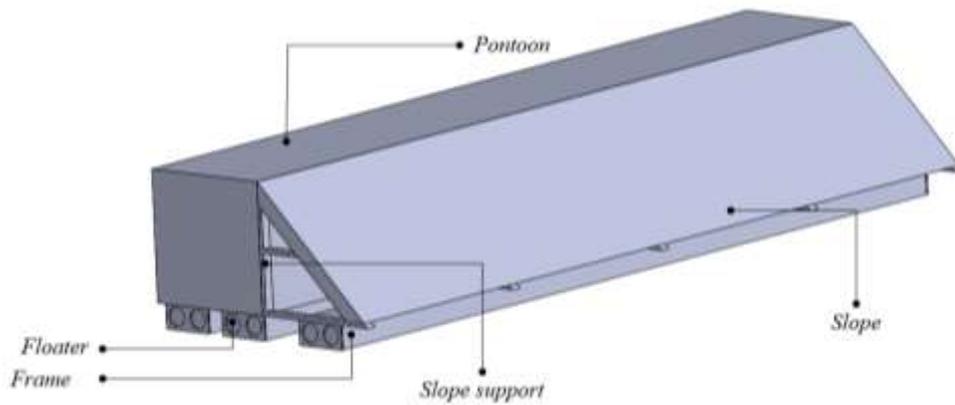
3.1.2 Model PFB

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, kemampuan desain PFB sangat bergantung pada bentuk, dimensi, kondisi permukaan, dan konfigurasi. Gelombang yang datang dipantulkan dan ditransmisikan oleh PFB yang besarnya tergantung pada desain struktur. Variasi kondisi permukaan dapat dicapai dengan desain permukaan berpori berdasarkan parameter bentuk, ukuran, orientasi, dan porositas. PFB yang digunakan dalam penelitian ini telah dirancang dengan menambahkan struktur slope berpori di depan struktur utama ponton. Bentuk ini terinspirasi dari penelitian Uzaki et al. [74], dan juga beberapa penelitian terkait [29] [30] [33] sebagaimana diuraikan dalam subbab 2.3

Disain model PFB terbagi menjadi beberapa bagian yaitu: *pontoon*, *frame*, *floater* dan *slope* (Gbr. 3.2) dengan material yang berbeda (Tabel 3.1). Bahan pembuatan model ponton terbuat dari *fiberglass* dan slope berpori dibuat dari *Medium Density Fiberboard* (MDF) yang diperkuat dengan rangka atau penyangga. Struktur ini juga dilengkapi dengan pelampung yang berfungsi untuk menjaga daya apung dan stabilitas. Dimensi utama struktur (ponton) ini adalah panjang 1.0 m, lebar 0.15 m, tinggi 0.15 m, dan freeboard 0.1 m di atas permukaan air untuk semua model. Struktur porositas dirancang sebesar 0% dan 5% dengan sudut kemiringan 45° dan 60°. Selanjutnya berdasarkan skala model 1:20, disusun berbagai jenis bentuk model untuk eksperimen di wave flume (Tabel 3.3 dan Gbr. 3.3).

Tabel 3.1 Material model PFB

Bagian	Material	Massa Jenis (g/cm ³)
<i>Pontoon</i>	<i>Fiberglass</i>	2.56
<i>Frame</i>	Aluminium	2.7
<i>Floater</i>	PVC (<i>Polyvinyl Chloride</i>)	1.3
<i>Slope</i>	MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>)	0.7



Gambar 3.2 Bagian-bagian PFB

Tabel 3.2 Data model PFB untuk eksperimen

Nama	Width	Slope	Porosity
	(m)	(deg)	(%)
Model 1	0.15	0	0
Model 2	0.30	45	0
Model 3	0.30	45	5
Model 4	0.24	60	0
Model 5	0.24	60	5



Model 1



Model 2



Model 3



Model 4



Model 5

Gambar 3.3 Model PFB

3.1.3 Gelombang Uji

Parameter gelombang yang digunakan dalam eksperimen disesuaikan dengan kemampuan PFB dalam meredam gelombang, yakni tinggi gelombang 1.0 – 2.5 meter dan periode gelombang 3.0 – 9.0 detik, sehingga diperoleh nilai kemiringan gelombang (*wave steepness*) antara 0.00113 – 0.00315. Parameter gelombang ini selanjutnya disesuaikan dengan wave generator yang akan digunakan dalam eksperimen di flume tank. Arah gelombang datang, kedalaman air dan sudut mooring ditetapkan seperti dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Variasi input model eksperimen di flume tank

No	Parameter	Prototipe	Skala Model	Model Fisik
1	Tinggi Gelombang (m)	1.0	1 : 20	0.05
		1.5		0.075
		2.0		0.10
		2.5		0.125
2	Periode Gelombang (detik)	3	$1 : \sqrt{20}$	0.67
		5		1.1
		7		1.5
		9		2
3	Arah Gelombang (deg)	0	-	0
4	Sudut Mooring (deg)	45	-	45
5	Kedalaman Air (m)	16	1 : 20	0.75

3.1.4 Peralatan Uji Lab

a) Flume Tank

Flume Tank adalah tempat akan dilakukan uji model PFB (Gbr. 3.4). Peralatan ini terdiri dari *wave flume*, *wave generator*, *wave probe*, dan sistem komputer pengendali. *Wave flume* memiliki bentuk seperti kolam dengan kemampuan untuk membangkitkan gelombang, arus, dan angin. Ukuran *wave flume* yang digunakan untuk eksperimen fisik ini memiliki panjang 20.0 m, tinggi 2.5 m, dan lebar 2.0 m. *Wave generator* merupakan alat pembangkit gelombang. Alat ini terdiri dari 4 buah *rod* yang masing-masing memiliki *flap* pada permukaan air dan dapat bergerak naik-turun secara independen untuk membangkitkan gelombang. *Wave generator* yang digunakan untuk eksperimen fisik ini mampu membangkitkan gelombang reguler dan *irregular*. *Wave probe* merupakan sebuah alat berbentuk silinder yang dilengkapi dengan sensor elektronik. Alat ini berguna untuk mengukur elevasi permukaan air. Dengan mencelupkan alat tersebut ke dalam air, elektrode akan mengukur konduktivitas air kemudian memberikan bacaan berapa elevasi muka air yang terekam pada sensor tersebut. Dalam eksperimen fisik ini, diperlukan 2 buah komputer dengan fungsi yang berbeda. Masing-masing fungsinya yaitu untuk mengatur proses pembangkitan gelombang di *wave flume*, dan untuk menampilkan bacaan elevasi permukaan air yang dikeluarkan oleh *wave probe*.



Wave Flume



Wave Generator



Wave Probe



Komputer Pengendali

Gambar 3.4 Peralatan di flume tank

b) Uji Tegangan Mooring, Transmisi dan Refleksi Gelombang

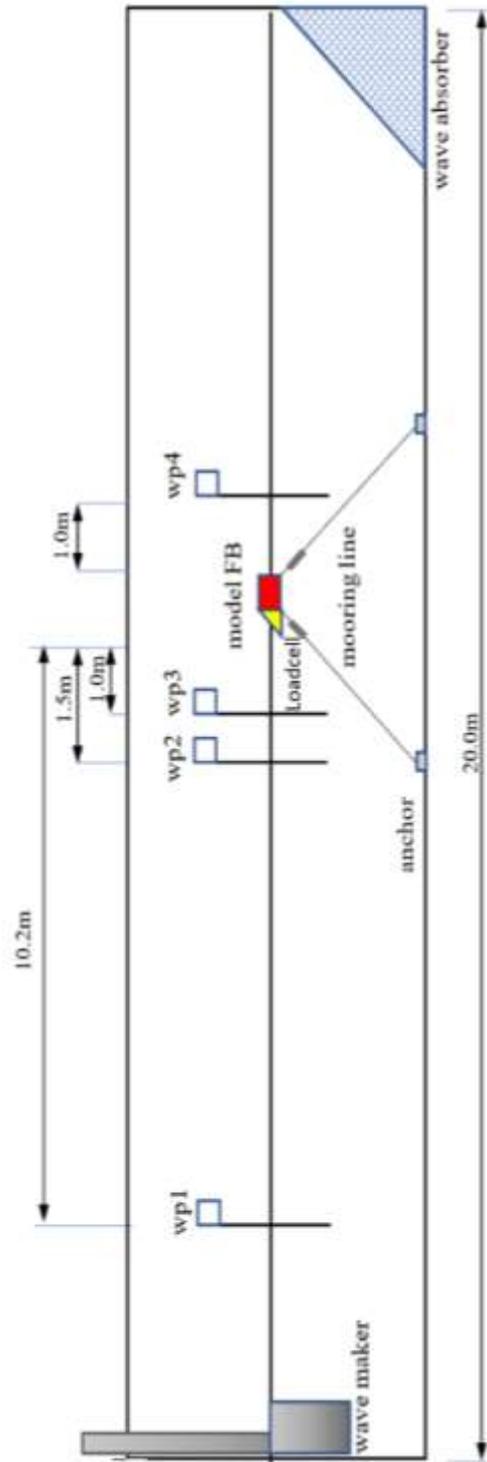
Pengujian refleksi dan transmisi pada struktur PFB dilakukan pada penelitian ini dengan menempatkan wave probe (Gbr. 3.5). Wave probe 1 (wp1) berfungsi untuk merekam data input yang dibangkitkan wave generator yang dikendalikan oleh Komputer. Gelombang refleksi dan gelombang datang yang mengenai PFB secara bersamaan direkam oleh wp2 dan wp3. Kedua wp ini berfungsi memisahkan gelombang refleksi dan datang dengan melakukan analisis berdasarkan metode Goda dan Suzuki [100]. Sedangkan wp4 yang terletak dibelakang struktur berfungsi merekam data transmisi gelombang.

Model PFB ini akan diuji pada kondisi tertambat. Tali tambat pada uji model akan dilakukan dengan menggunakan pegas. Pegas mempunyai karakteristik yakni panjang pegas 820 mm, diameter luar 6.5 mm, tebal kawat 2 mm, dan kekakuan 4.3 N/mm. Pengukuran tegangan tali dilakukan dengan peralatan *load cell*. Perubahan tegangan tali akan menyebabkan deformasi dari *load cell* tersebut, sehingga menyebabkan *strain-gauge* dari *load cell* akan memberi tegangan listrik yang berubah. Tegangan listrik yang dihasilkan tersebut akan diperbesar dengan amplifier (HX711) dan didigitasi menggunakan *micro-controller* (Arduino Uno) menjadi data digital, kemudian diteruskan ke komputer, dan 4) Komputer menampilkan data tegangan tiap 1 detik dalam satuan gram. Sistem pengukuran tegangan mooring dapat dilihat pada Gbr. 3.6.

3.1.5 Kalibrasi Wave Probe dan Load Cell

a) Kalibrasi Wave Probe

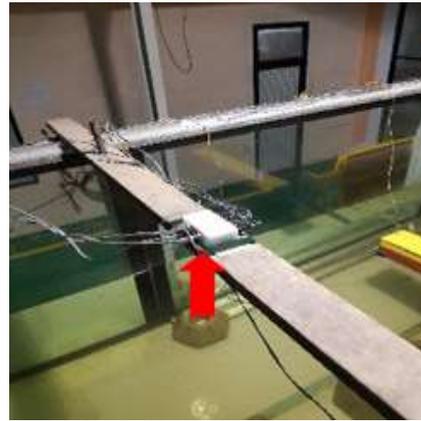
Untuk mendapatkan keakuratan *wave probe* dalam mengukur ketinggian muka air, maka perlu dilakukan kalibrasi pada setiap *wave probe*. Adapun proses kalibrasi dilakukan dengan mencelupkannya ke air dan melihat bacaan *wave probe*. Berdasarkan proses tersebut akan diperoleh regresi antara hasil pembacaan dan ketinggian muka air aktual untuk masing-masing *wave probe*. Pada prosesnya, *wave probe* dicelupkan pada ketinggian muka air 35 cm hingga 65 cm dengan interval 10 cm (Gbr. 3.7). Pada setiap ketinggian muka air, setelah muka air dalam kondisi tenang, dilakukan proses perekaman data ketinggian muka air pada *wave probe*. Perekaman data dilakukan sebanyak 1500 data atau kurang lebih 60 detik. Hasil perekaman menunjukkan fluktuasi bacaan sehingga diambil rata-rata dari serangkaian data yang ada. Kalibrasi *wave probe* ini juga dilakukan sesudah eksperimen. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 3.4 dan Gbr. 3.8. Berdasarkan hasil kalibrasi sebelum dan pasca eksperimen diperoleh rata-rata kesalahan wp1 sebesar 1.68%, wp2 1.95%, wp3 1.59% dan wp4 1.9%. Hasil ini menunjukkan bahwa *wave probe* yang digunakan cukup akurat dengan kesalahan pengukuran kurang dari 5%.



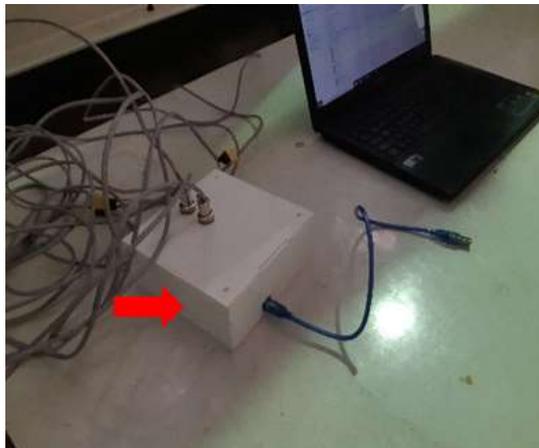
Gambar 3.5 Layout posisi dan alat ukur eksperimen PFB



Load Cell



Terminal box

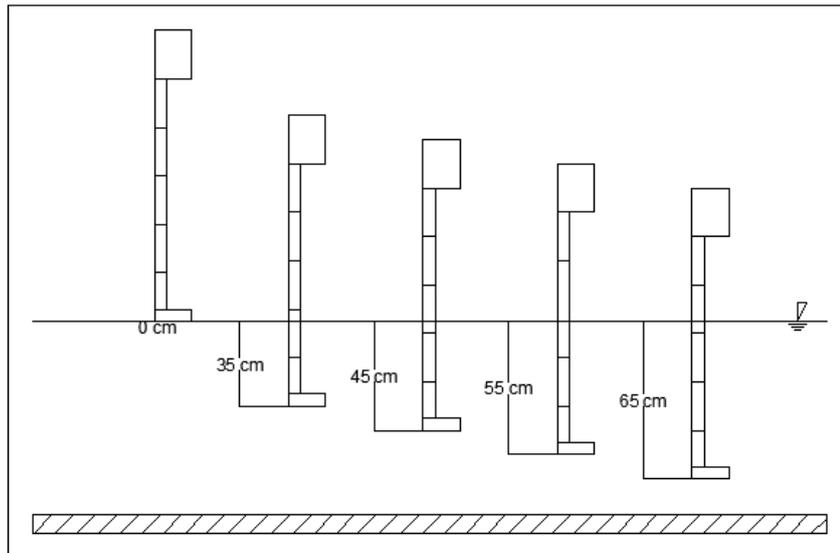


Amplifier(HX711) dan micro-controller



Komputer Kontrol

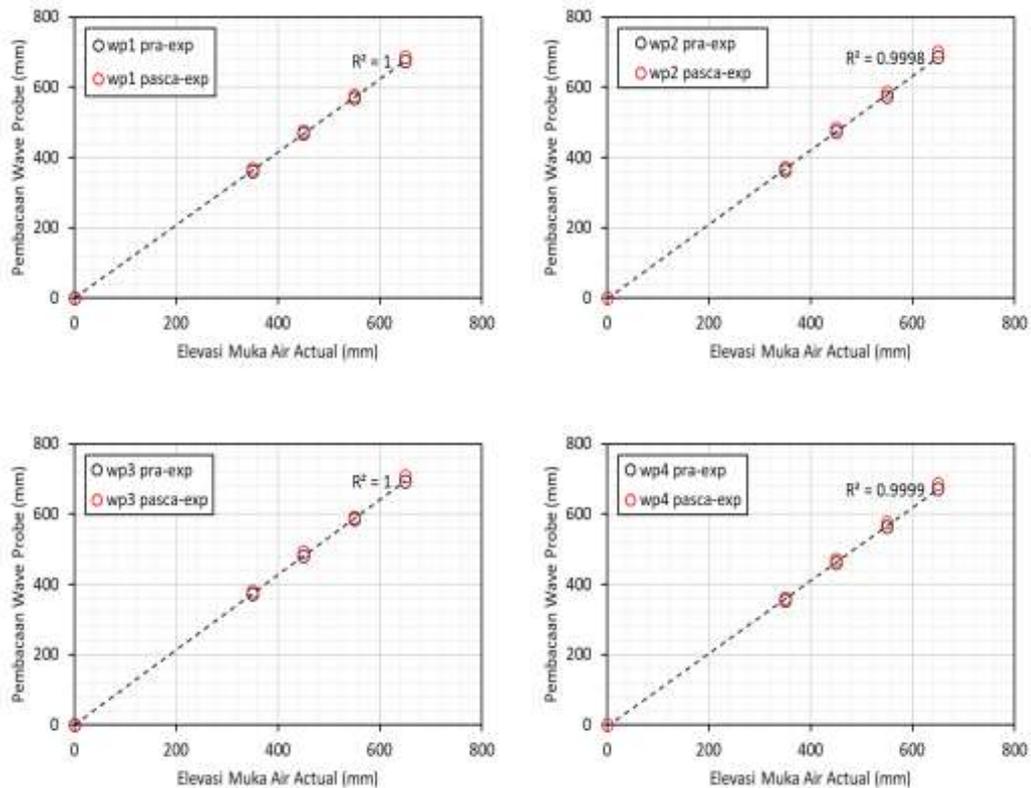
Gambar 3.6 Susunan perangkat pengukuran tegangan Mooring PFB



Gambar 3.7 Prosedur kalibrasi wave probe

Tabel 3.4 Hasil kalibrasi *wave probe* sebelum dan pasca eksperimen

Elevasi Muka Air (mm)								
Aktual	WP 1		WP 2		WP 3		WP 4	
	Pra	Pasca	Pra	Pasca	Pra	Pasca	Pra	Pasca
0	0	0	-0.33	0	0	0	-0.96	0
350	362.24	368.28	364.02	371.29	374.03	379.7	355.22	361.78
450	468.07	477.20	474.08	483.50	482.35	491.96	462.00	471.36
550	569.85	578.00	574.08	585.40	585.24	591.03	565.87	576.53
650	674.09	686.15	687.66	701.50	694.18	707.99	673.43	686.79



Gambar 3.8 Kalibrasi *wave probe* sebelum dan sesudah eksperimen

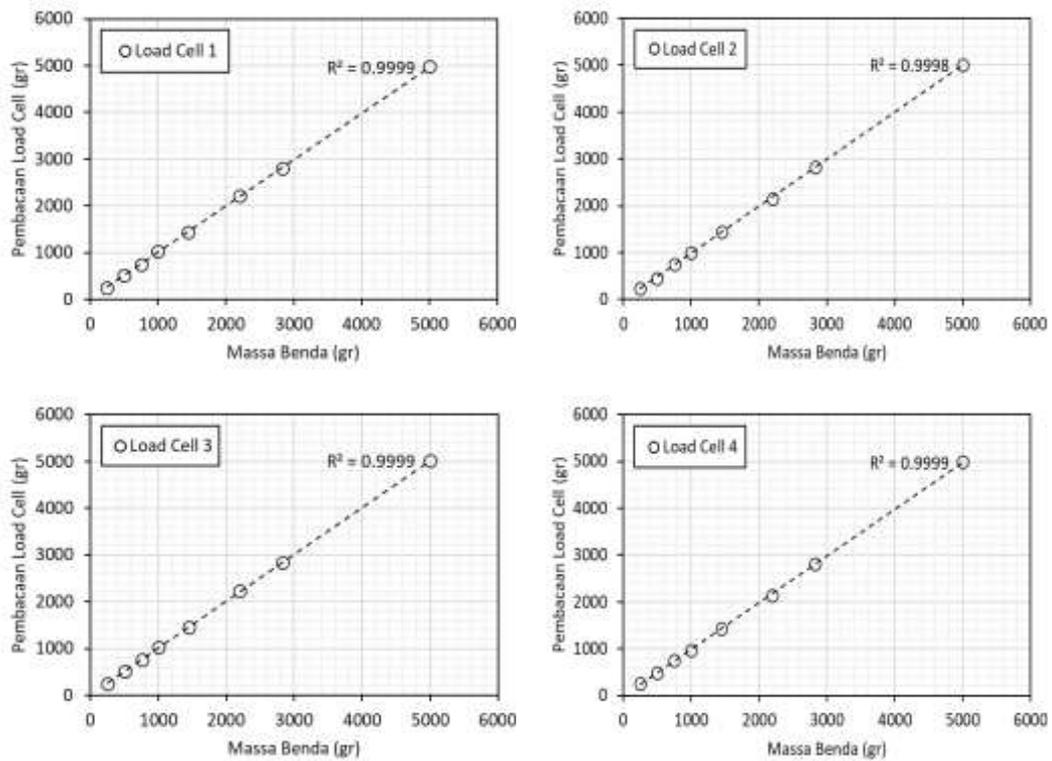
b) Kalibrasi Load Cell

Kalibrasi *load cell* (LC) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah alat *load cell* tersebut dapat bekerja dengan baik (akurat). Kalibrasi dilakukan pada saat sebelum eksperimen dilakukan, supaya pada saat pengujian model di flume tank, diperoleh hasil yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Kalibrasi *load cell*

dilakukan dengan cara menimbang beban sejumlah 8 buah, yakni 250 gr, 500 gr, 750 gr, 1000 gr, 1500 gr, 2200 gr, 3000 gr dan 5000 gr. Beban yang digunakan diukur terlebih dahulu menggunakan timbangan elektronik digital dan berat yang terbaca tersebut menjadi berat acuan. Beban ditali dan digantungkan ke *load cell* sesuai dengan arah gaya. Pada komputer pengontrol gaya yang dihasilkan oleh *load cell* akan ditampilkan perubahan tegangannya. Hasil tegangan kemudian dicatat sebanyak 3 kali dan hasilnya diambil nilai rata-ratanya. Metode ini digunakan untuk melakukan kalibrasi pada tiap *load cell*. Kemudian dari nilai tersebut dilakukan regresi. Perbedaan bacaan dan beban sebenarnya juga diperhatikan sehingga terdapat faktor pengali untuk tiap *load cell*. Hasil kalibrasi *load cell* dinyatakan pada Tabel 3.5 dan Gbr. 3.9.

Tabel 3.5 Hasil pengukuran beban pada *load cell*

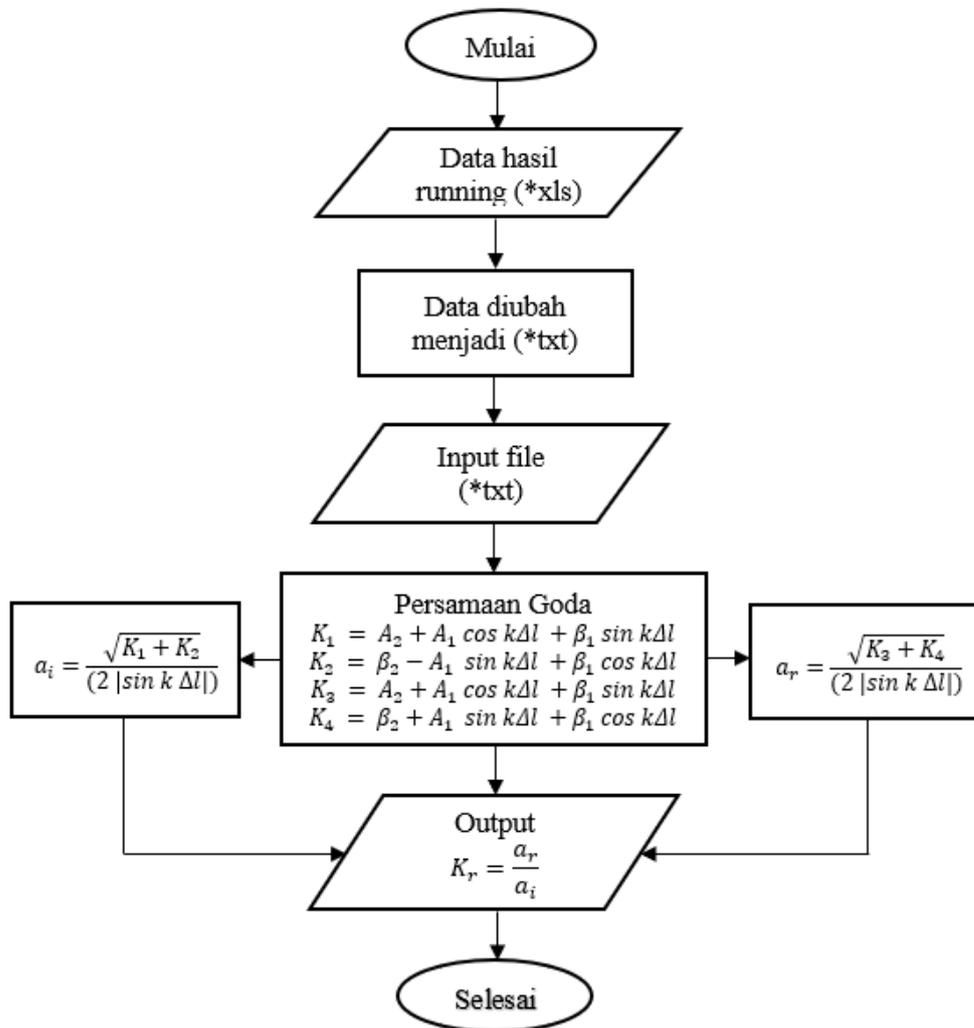
Beban	Massa (gr)			
	LC1	LC2	LC3	LC4
250.00	259.12	241.72	254.58	254.78
500.00	516.62	453.07	520.19	491.66
754.00	750.38	754.07	755.67	760.88
1000.00	1025.16	994.36	1027.38	964.06
1447.00	1435.80	1447.63	1449.59	1432.19
2200.00	2212.42	2155.44	2231.76	2147.77
2826.00	2801.10	2825.04	2826.79	2809.46
5000.00	4976.00	5010.97	5013.42	4985.73



Gambar 3.9 Hasil kalibrasi *load cell*

3.1.6 Analisa Transmisi dan Refleksi Gelombang

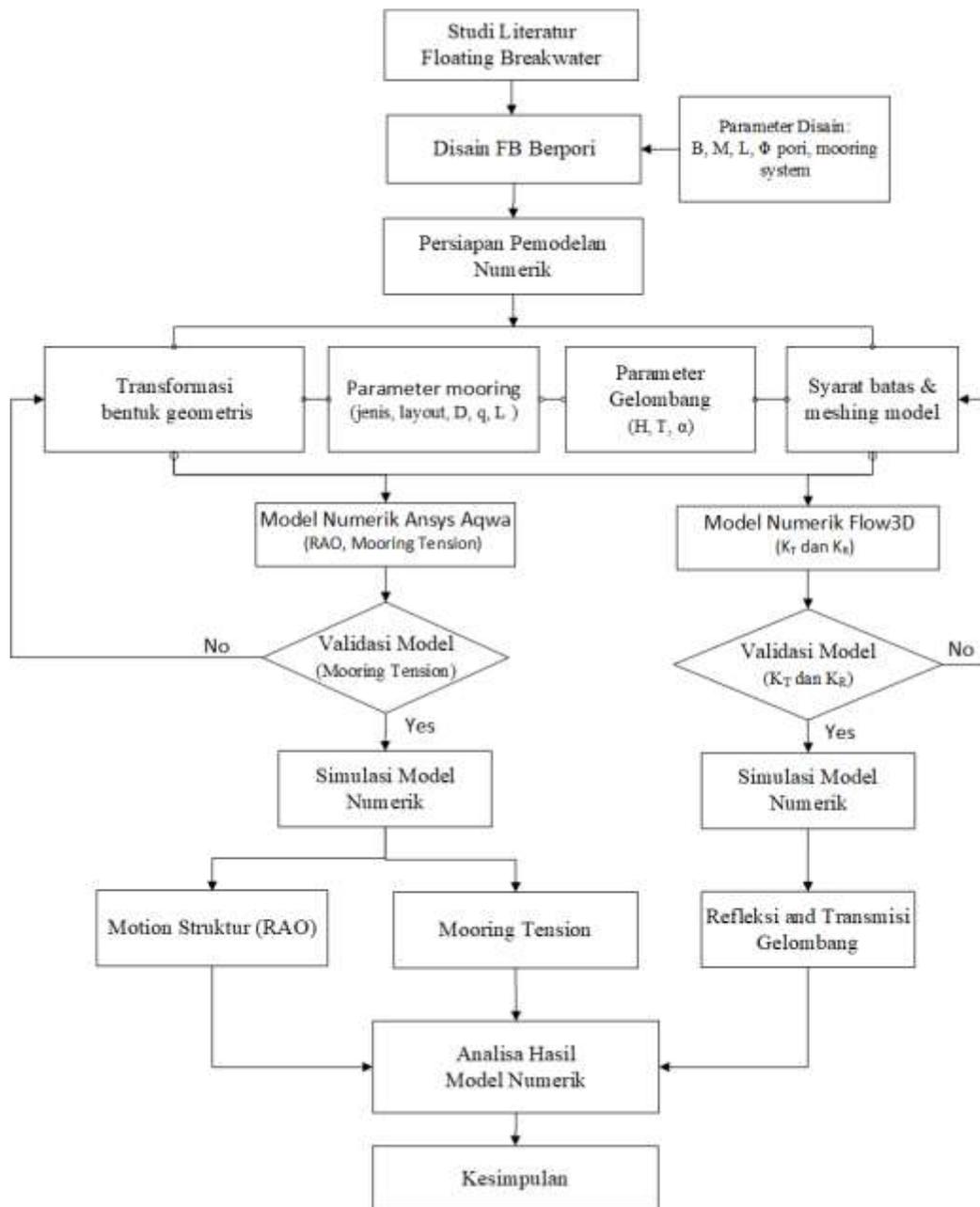
Data elevasi muka air yang tercatat pada wave probe dianalisis untuk mendapatkan parameter koefisien transmisi (KT) dan refleksi (KR). KR ditentukan dari perbandingan tinggi gelombang transmisi (H_t) dengan tinggi gelombang datang (H_i). H_i diperoleh dari data wave probe 1 dan H_t dari wave probe 4 (lihat Gbr. 3.5). Sedangkan wave probe 2 dan 3 merekam data refleksi dan gelombang datang secara bersamaan. Selanjutnya data dari wave probe 2 dan 3 ini dipisahkan menjadi gelombang refleksi dengan metode Godan dan Suzuki [100], sebagaimana telah dijelaskan dalam subbab 2.2.1. dan dinyatakan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.10. Diagram alir koefisien refleksi gelombang dengan metode Goda dan Suzuki [100]

3.2 Metodologi Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dalam penelitian ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:



Gambar 3.11 Diagram alir pemodelan numerik PFB

3.2.1 Transmisi dan Refleksi Gelombang pada PFB

3.2.1.1 Flow 3D

FLOW-3D adalah suatu perangkat lunak yang mengaplikasikan metode *computational fluid dynamic* (CFD) yakni sebuah metode untuk memecahkan suatu persamaan gerak *volume of fluid* (VOF) dengan menggunakan analisa numerik dan algoritma. Dalam pemodelan CFD ini, lingkungan aliran fluida dibatasi pada

kondisi batas tertentu untuk mensimulasikan efek di sekitar area yang menjadi fokus penyelidikan. Prinsip aliran tiga dimensi menjelaskan bahwa perilaku aliran fluida diselesaikan dengan persamaan RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) di bawah ini. Persamaan aliran fluida untuk volume kontrol diselesaikan pada struktur grid selisih hingga dan stagger. Grid komputasi dibuat pada grid persegi panjang tiga dimensi. Permukaan bebas ditelusuri dengan menggabungkan metode VOF dengan RANS [112]. Persamaan RANS dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta_{u_s}) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta_{v_s}) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta_{w_s}) \quad (3.4)$$

dimana kecepatan fluida pada axis (u, v, w), fraksi volume terbuka pada aliran terbuka (V_F), fraksi luas terbuka aliran fluida (A_x, A_y, A_z), percepatan gravitasi (G_x, G_y, G_z), percepatan viskos (f_x, f_y, f_z), hilangnya aliran dalam media berpori atau melintasi pelat insulasi berpori (b_x, b_y, b_z), dan suku terakhirnya adalah massa komponen geometri.

FLOW-3D merupakan software yang dapat dimanfaatkan dalam percobaan ataupun permodelan yang memiliki hubungan dengan aliran fluida. Pada penelitian ini FLOW-3D digunakan untuk memodelkan *floating breakwater* di wave tank tersebut. Output yang diharapkan adalah tinggi permukaan air sebelum dan sesudah terkena struktur, akan tetapi selain nilai ketinggian permukaan juga didapatkan output yang lain seperti kondisi tekanan perairan, kecepatan partikel gelombang, *turbulence*, dan masih banyak lagi sesuai dengan kebutuhan. Software ini juga memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihan FLOW-3D adalah:

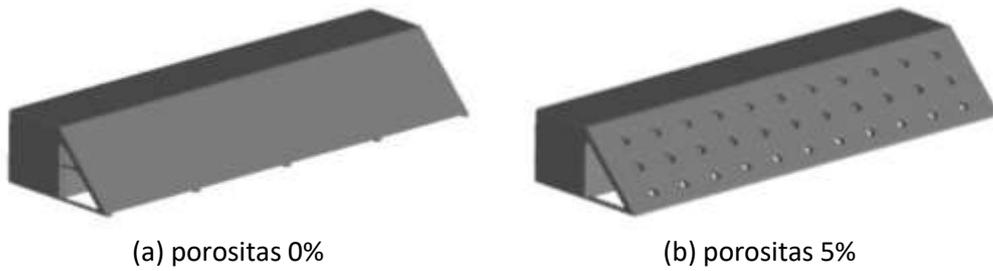
memiliki tampilan yang mudah dipahami dalam membuat konfigurasi input untuk sebuah permodelan; pengamatan hasil *running* model dapat dilihat secara visual disetiap posisi yang dibutuhkan *output* yang ditampilkan berupa gambar dan video; dan hasil tampilan simulasi bagus karena menyerupai kondisi riil. Sedangkan kelemahannya adalah: perlu mesh yang rapat untuk mendapatkan hasil yang detail, tetapi mengakibatkan proses *running* yang dilakukan lama serta menghasilkan file yang berukuran besar; dan pemodelan dengan bentuk *Solid 3D*, membutuhkan prosedur yang lama dan rumit ketika menginputkan koordinat model *solid*

3.2.2.2 Model Numerik Refleksi dan Transmisi Gelombang

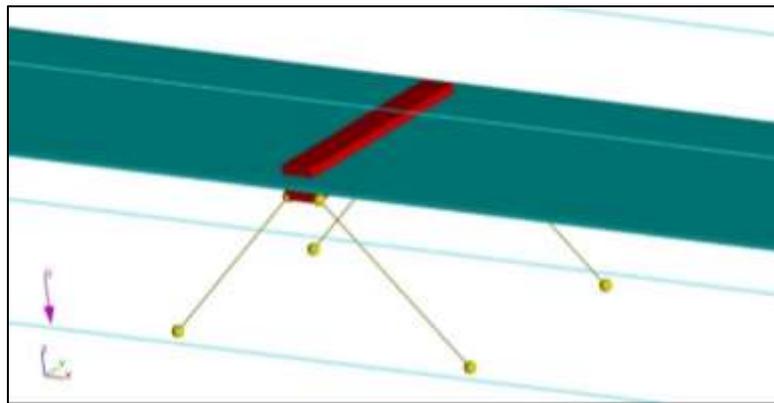
Model floating breakwater untuk pemodelan numerik dilakukan dengan *software SolidWorks*. Hasil pemodelan numerik yang baik dapat dicapai dengan mengatur dimensi gelombang sesuai dengan kondisi saat percobaan pada kedalaman air 0.8 m. Setelah memodelkan wave tank, langkah selanjutnya adalah mengatur jumlah *mesh*. *Meshing* yang digunakan dalam pemodelan adalah 0.05-0.08 m (Gbr. 3.12). Langkah selanjutnya adalah menyiapkan model fisik floating breakwater dan mooring line CFD. Struktur diletakkan menghadap arah X_{max} , atau sumbu x positif, dengan koordinat tali tambat disesuaikan dengan sudut kemiringan floating breakwater (Gbr. 3.13).

Karakteristik input hidrostatis meliputi densitas fluida 1000 kg/m^3 , gravitasi $9,8 \text{ kg/m}^2$ terhadap sumbu-z negatif, dan gerak turbulen yang digunakan adalah laminar. Kondisi batas dalam pemodelan ini adalah sebagai berikut: a) *Waves* (W_v). Dalam kondisi batas ini, gelombang dapat memasuki area komputasi dan merambat ke arah yang diharapkan ke kondisi batas lainnya. Data jenis gelombang, periode gelombang, amplitudo gelombang, dan kedalaman air dimasukkan dalam kondisi batas ini. Kondisi batas ini didefinisikan di sebelah kanan (X_{Max}). b) *Symmetry* adalah kondisi batas tanpa aliran fluks skalar sepanjang batas. c) *Walls* (W), kondisi batas dimana dinding kedap air mengelilingi mesh tank, dan d) *Outflow* (O) adalah kondisi batas yang digunakan untuk aliran gelombang yang dimodelkan untuk mencegah cairan terakumulasi di belakang wave tank. Pada kondisi batas ini, *wave absorber* juga dimodelkan sehingga tidak terjadi refleksi di belakang struktur. Setelah menetapkan kondisi batas (Gbr. 3.14), langkah selanjutnya adalah

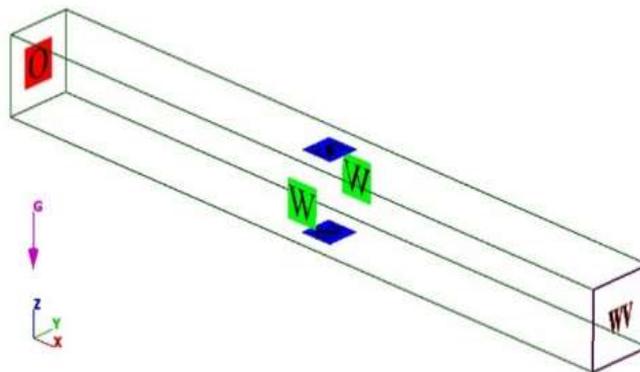
menempatkan wave probe untuk merekam hasil eksperimen, dengan mengambil data elevasi muka air pada titik-titik tertentu yang telah ditentukan. Jenis wave probe yang digunakan adalah probe fluida: *stasioner* atau terpasang, yang memungkinkan probe ini tetap pada posisinya. Contoh hasil kontur elevasi muka air ditunjukkan pada Gbr. 3.15 dan 3.16.



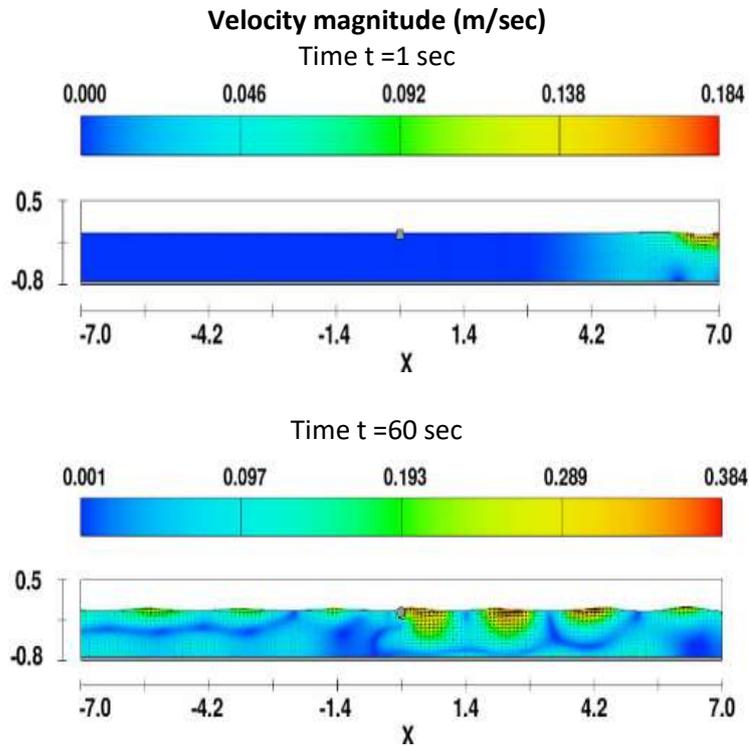
Gambar 3.12 Contoh geometri 3D model floating breakwater



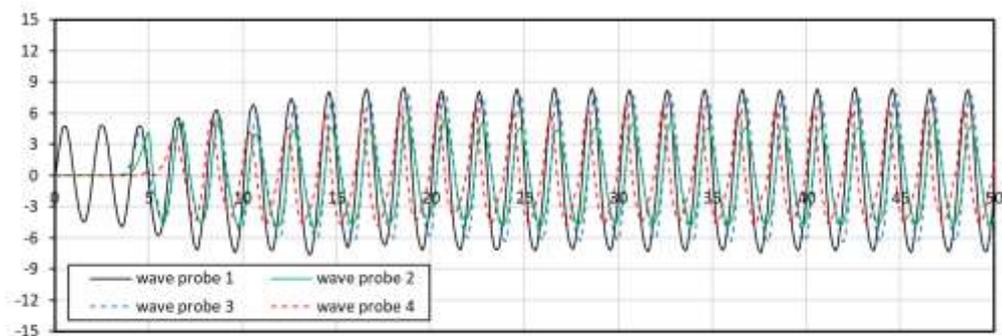
Gambar 3.13 Pemodelan floating breakwater pada wave tank



Gambar 3.14 Domain komputasi kondisi batas

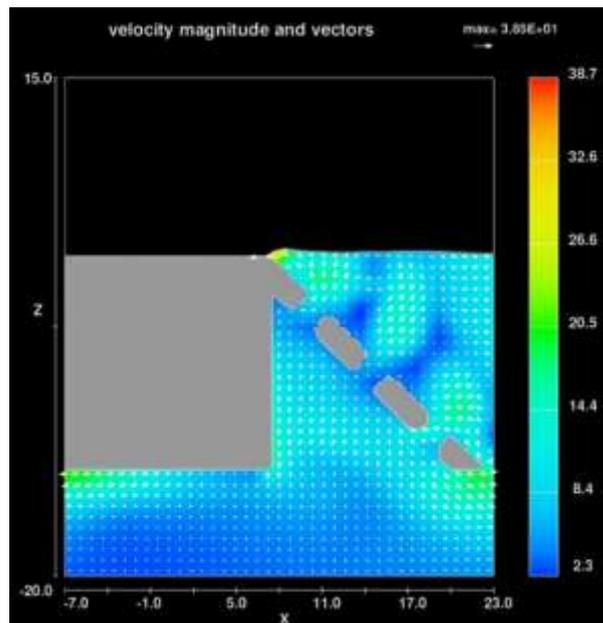


Gambar 3.15 Kontur elevasi muka air

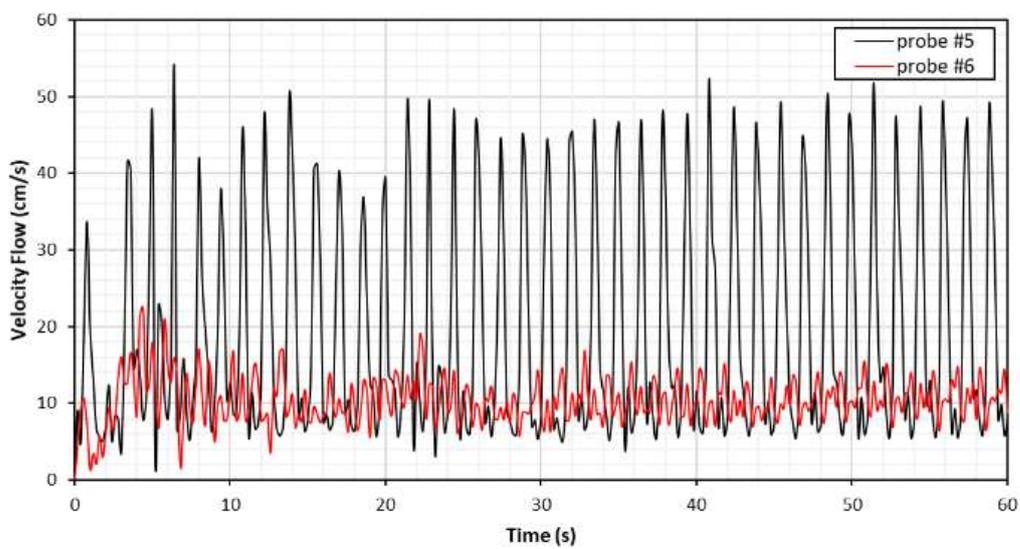


Gambar 3.16 Profil elevasi muka air

Detil aliran pada permukaan struktur (wp5) dan struktur pori (wp6) ditunjukkan pada Gbr. 3.17 dan 3.18. Secara umum, kecepatan aliran pada permukaan struktur lebih kecil dibandingkan setelah melewati struktur. Berdasarkan fenomena tersebut, bentuk pori menunjukkan sangat efisien dalam mengurangi hamtaman air terhadap struktur. Selain itu, struktur berpori tidak menyerap energi gelombang secara keseluruhan, sehingga gaya mooring yang diterima akibat energi gelombang dapat lebih kecil dibandingkan dengan tanpa porositas.



Gambar 3.17 Vektor kecepatan aliran di sekitar PFB



Gambar 3.18 Profil kecepatan aliran di permukaan struktur dan setelah melewati pori pada FB

3.2.2 Respons Amplitudo Operator dan Tegangan Mooring FB

3.2.2.1 Pemodelan Numerik

Tahap pemodelan numerik gerakan FB akan meliputi sejumlah langkah kerja sebagai berikut:

- a. Langkah pertama dalam tahap model numerik ini adalah mentransformasikan desain geometris FB skala model yang dibuat dengan Solidworks/AutoCAD menjadi data geometris yang sesuai untuk pemodelan numerik dengan Ansys Aqwa. Model geometri numerik kemudian dicek validasinya antara pemodelan numerik dan analitik. Validasi ini mencakup displacement struktur FB. Jika validasi sudah memenuhi maka model geometri numerik dapat digunakan dalam simulasi model.
- b. Langkah kedua adalah merancang layout mooring dan dicek efektivitasnya.
- c. Langkah ketiga dalam tahap ini adalah melakukan running pemodelan numerik, dengan kondisi FB terhubung dengan tali tambat. Input data yang dimasukkan adalah data geometri, massa, letak titik pusat massa dan jari-jari girasi. Selanjutnya input data yang lain yakni tinggi, dan frekuensi dan arah datang gelombang (Tabel 3.3). Output data adalah berupa RAO gerakan, yakni gerakan translasi (*surge*, *sway* dan *heave*) dan gerakan rotasi (*roll*, *pitch* dan *yaw*).
- c. Langkah keempat adalah melakukan running pemodelan numerik dengan memasukkan faktor redaman atau kekakuan. Redaman atau kekakuan tersebut akan dimodelkan dengan peredam atau tali tambat pada FB. Output data adalah berupa RAO dalam kondisi FB terintegrasi dengan tali tambat.
- d. Langkah berikutnya, melakukan perbandingan gaya mooring antara hasil eksperimen dengan numerik pada semua skenario model FB.
- e. Melakukan eksplorasi model untuk mengetahui faktor pengaruh arah datang gelombang, perubahan elevasi air akibat pasang surut, sudut mooring, dan layout pada FB.

3.2.2.2 Konvergensi Model

Studi konvergensi model dilakukan dengan dua konvergensi, yaitu konvergensi time step, lalu dilanjutkan dengan konvergensi ukuran mesh. Detail variasi time step untuk studi konvergensi time step pada model 1 dengan $H=10$ cm dan $T=1.1$ s (Tabel 3.6). Sebagai contoh adalah perbandingan antara gerakan heave dibagi amplitud ($Heave/A$) dengan time series dibagi periode (t/T) (Gbr. 3.19).

Berdasarkan hasil diatas *time step* $T/10$ belum cukup konvergen karena hasilnya masih berbeda dengan $T/20$, sedangkan $T/20$, $T/30$, $T/40$, $T/50$ hasilnya

sudah hampir sama yang berarti stabil, sehingga dapat dinyatakan bahwa pada *time step* T/20 sudah cukup konvergen. Selanjutnya dilakukan uji konvergensi ukuran mesh dengan menggunakan besaran *time step* dari hasil uji konvergensi diatas yaitu T/20. Berikut merupakan detail variasi ukuran *mesh* untuk studi konvergensi pada model 1 dengan T/10, Hi=10 cm, dan T=1.1s (Tabel 3.7) (Gbr.3.20).

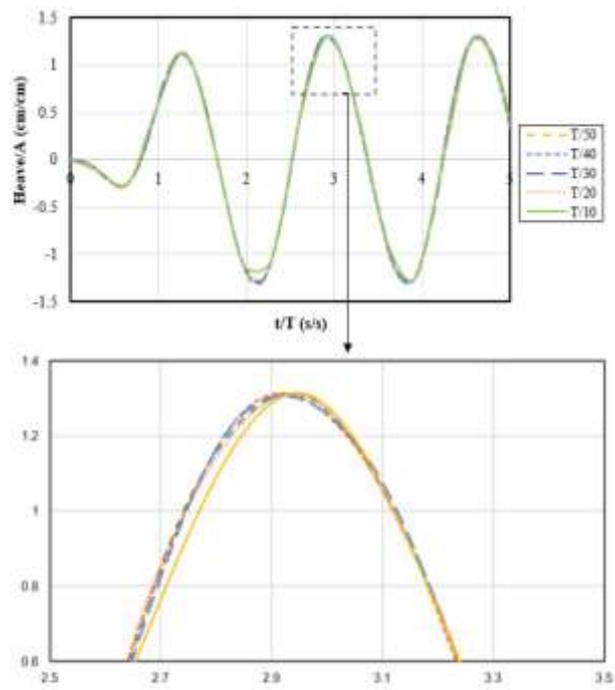
Tabel 3.6 Variasi time step

Variasi	<i>Time Step</i>	Ukuran <i>Mesh</i>
1	T/10	Hi/5
2	T/20	Hi/5
3	T/30	Hi/5
4	T/40	Hi/5
5	T/50	Hi/5

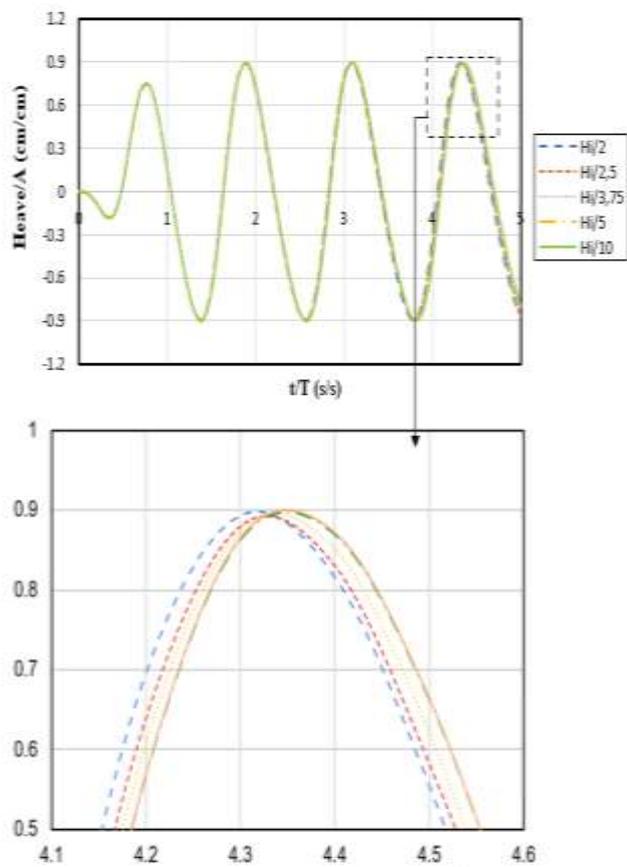
Tabel 3.7 Variasi ukuran mesh

Variasi	<i>Time Step</i>	Ukuran <i>Mesh</i>
6	T/20	Hi/2
7	T/20	Hi/2,5
8	T/20	Hi/3,75
9	T/20	Hi/5

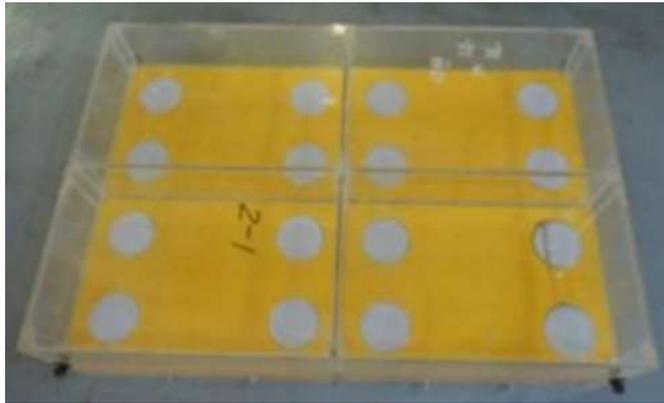
Analisa hasil konvergensi time step dan mesh ini diaplikasikan pada model ponton FB dengan model ponton Ji et al [114] (Gbr. 3.21 dan 3.22). Secara general, *pattern trend* gerakan *heave* yang dihasilkan oleh dua pontoon tersebut memiliki kecenderungan gerakan *heave* menaik seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang datang. Perbedaan besar gerakan *heave* dan panjang gelombang (L) yang terjadi pada kedua *pontoon* tersebut diakibatkan karena perbedaan dimensi, massa, dan kedalaman tangki simulasi.



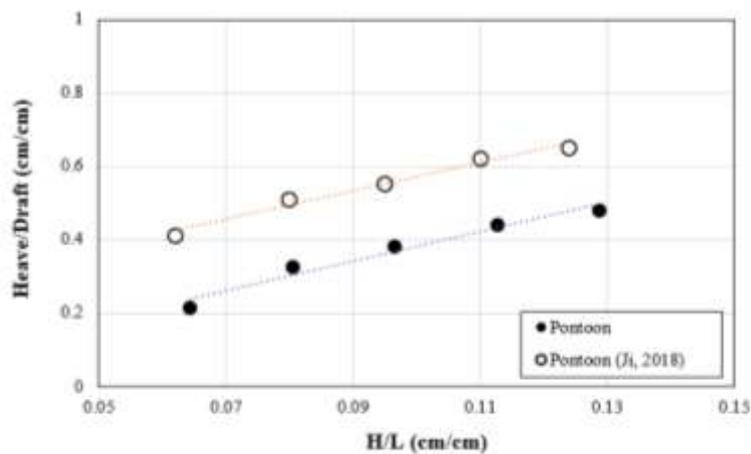
Gambar 3.19 Konvergensi *time step*



Gambar 3.20 Konvergensi ukuran *mesh*



Gambar 3.21 Model pontoon Ji et al. [114]



Gambar 3.22 Trend gerakan heave pada model ponton studi dan Ji et al, 2018

3.2.2.3 Validasi Hidrostatik

Validasi hidrostatik model struktur dilakukan untuk mengetahui struktur FB tersebut sesuai dengan kondisi pada penelitian sebelumnya. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan analitik dan hasil pemodelan Ansys. Pada software ansys aqwa setiap model dilakukan meshing dan definisikan material yang digunakan untuk mendapatkan berat displacement pada setiap model. Hasil validasi hidrostatik dinyatakan pada Tabel 3.9 dan 3.10. Berdasarkan analisa rata-rata *error* parameter hidrostatik pada keempat model dengan meshing sebesar $H/5=2$ cm sesuai dengan hasil konvergensi *mesh size* yaitu sebesar 0.024% pada single model dan sebesar 0.079% pada layout array.

Tabel 3.9 Validasi model single FB

Model	Analitik (gr)	Ansys (gr)	<i>Error (%)</i>
Model 1	19150,38	19157	0.035
Model 2	26550,85	26553	0.008
Model 3	26448,07	26452	0.015
Model 4	26345,29	26335	0.039

Tabel 3.10 Validasi displasemen FB array

Array	Analitik (gr)	Ansys (gr)	<i>Error (%)</i>
I-shaped	57451,14	57471	0.035
V-shaped	69251,90	69166	0.124

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

ANALISA HASIL EKSPERIMEN

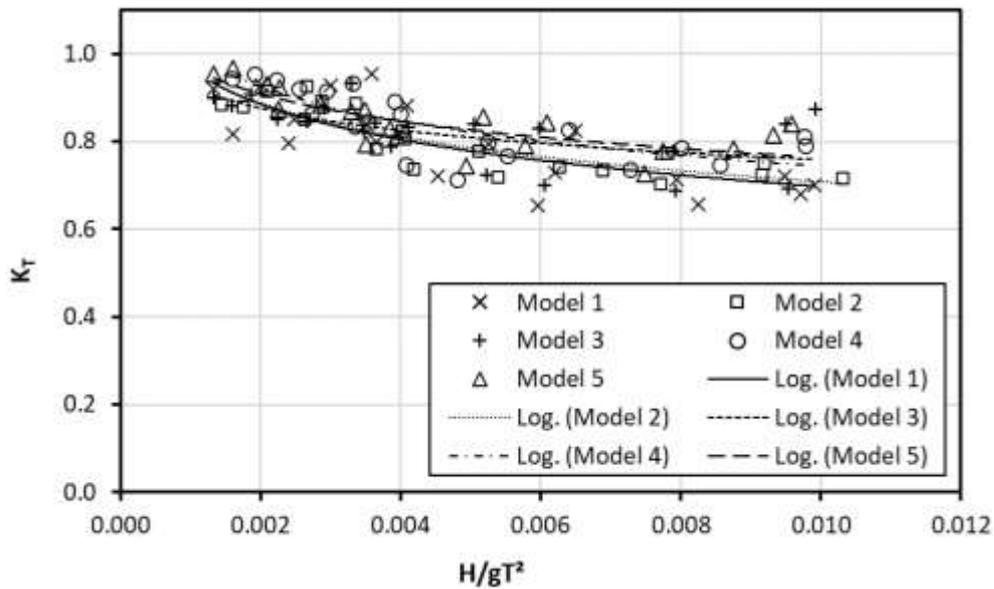
4.1 Koefisien Transmisi dan Refleksi FB

Performa hidrodinamika FB ditentukan oleh koefisien transmisi dan refleksi. Koefisien transmisi, K_T adalah perbandingan tinggi gelombang transmisi dengan gelombang datang. Jika nilai K_T lebih rendah, ini menunjukkan bahwa FB merupakan peredam gelombang yang efektif. Koefisien refleksi, K_R mewakili rasio tinggi gelombang yang dipantulkan dengan tinggi gelombang datang. Jika nilai K_R lebih rendah, berarti FB merupakan struktur anti-reflektif yang efektif.

4.1.1 Perbandingan Kinerja pada Model FB

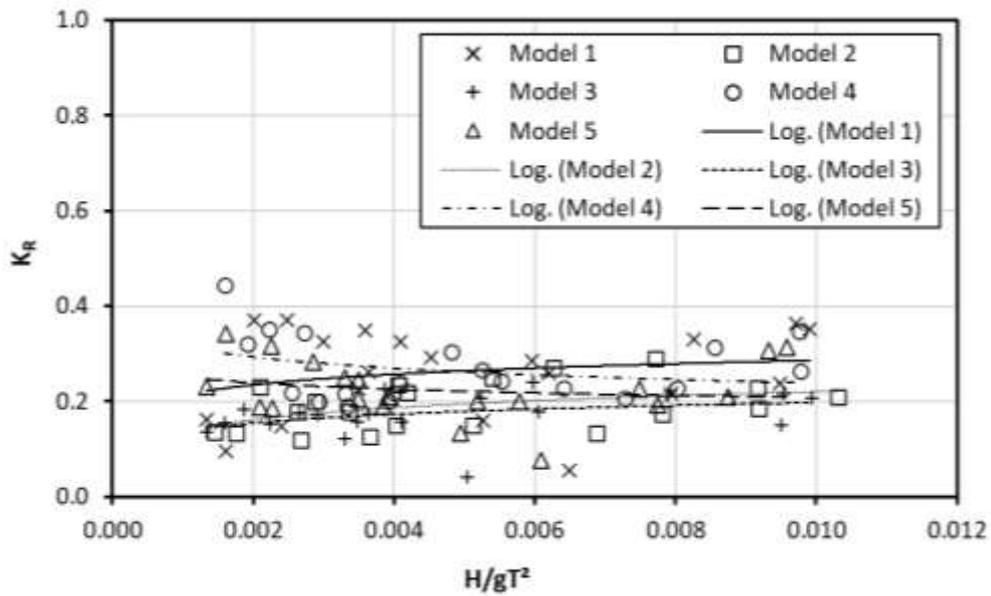
Gbr. 4.1 dan 4.2 menampilkan K_T dan K_R pada lima model FB yang diplot terhadap parameter gelombang, H/gT^2 , di mana H adalah tinggi gelombang datang, g adalah percepatan gravitasi dan T adalah periode gelombang datang. Parameter gelombang menentukan kecuraman gelombang datang, dimana parameter besar menunjukkan gelombang pada kecuraman tinggi dan sebaliknya.

Gbr. 4.1 mewakili transmisi gelombang dalam lima model FB, diketahui bahwa nilai K_T berangsur-angsur menurun dengan meningkatnya parameter gelombang. Hal ini menunjukkan bahwa redaman gelombang pada FB bekerja sedikit lebih baik saat bekerja pada gelombang yang lebih curam. Model 1 (ponton) memiliki K_T paling rendah dibandingkan model lainnya karena model ini memiliki struktur permukaan yang tegak lurus dengan gelombang datang sehingga gelombang akan teredam dengan baik. Dengan bentuk permukaan struktur yang berbeda, K_T pada model 2, 3, 4, dan 5 memberikan rata-rata peningkatan persentase sebesar 0.84%, 3.24%, 4.72%, dan 7.63% terhadap bentuk ponton. Namun, efek lain yang juga harus diperhatikan adalah gelombang refleksi, tegangan tali mooring, dan gerak struktur.



Gambar 4.1 Perilaku hidrodinamik transmisi gelombang pada model FB

Kemampuan refleksi dari gelombang FB ditunjukkan pada Gbr. 4.2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa semakin besar parameter gelombang maka semakin besar pula nilai K_R . Model 1 memberikan rata-rata nilai K_T yang rendah. Sebaliknya, K_R memiliki nilai tertinggi diantara model lainnya. Pada model 2 - 5, K_R mengalami penurunan sebesar 21.1%, 31.7%, 4.1%, dan 13.1% terhadap bentuk ponton, secara berturut-turut. Secara umum dapat dikatakan bahwa model 1 memiliki kemampuan meredam energi gelombang yang baik. Namun, refleksi gelombangnya juga besar. Oleh karena itu, dalam penerapannya di lapangan diperlukan pertimbangan yang cukup kompleks, termasuk gerak dari FB itu sendiri. Pergerakan struktur yang besar akan menyebabkan FB itu sendiri bertindak sebagai pembangkit gelombang, sehingga meningkatkan tinggi gelombang. Pergerakan struktur ini dapat dikontrol dengan sistem mooring yang baik dan permukaan struktur yang porous. Dapat dilihat, berdasarkan uji model, bahwa bentuk pori mempengaruhi perilaku hidrodinamika FB secara signifikan.



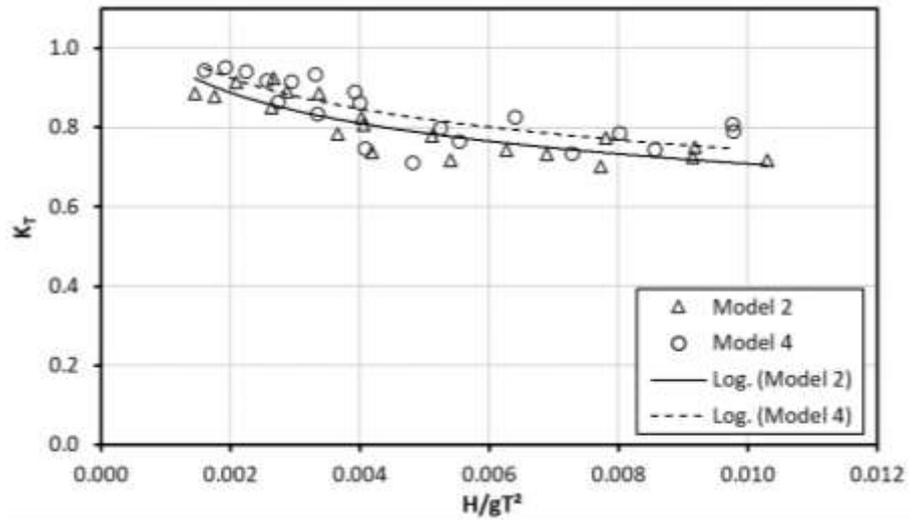
Gambar 4.2 Perilaku hidrodinamik refleksi gelombang pada model FB

4.1.2 Pengaruh Slope pada FB

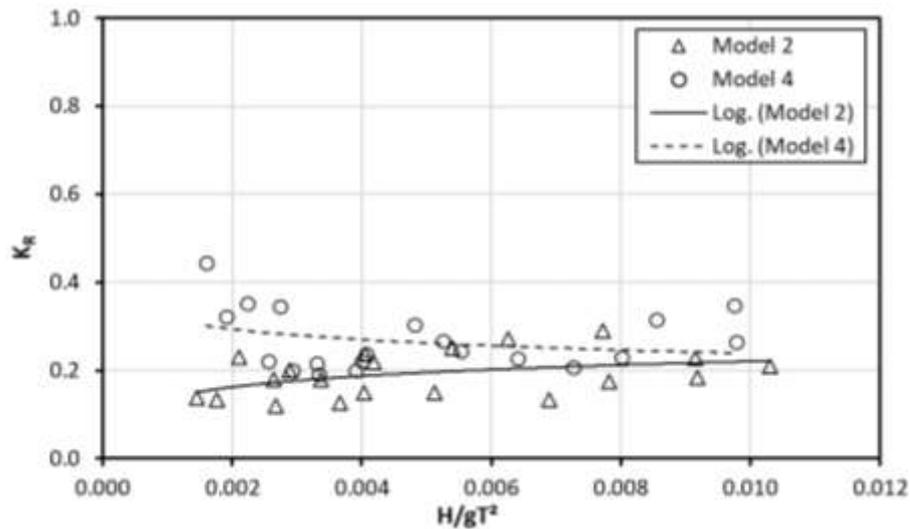
Peningkatan pada redaman gelombang FB diselidiki pada variasi slope yang berbeda (45° , 60°). Perbandingan antar model dilakukan berdasarkan persentase porositas dan slope FB. Model 2 memiliki slope 45° dan porositas 0% dibandingkan dengan model 4 yang memiliki slope 60° dan porositas yang sama yaitu 0%. Demikian juga model 3 dibandingkan dengan model 5 yang memiliki slope 45° dan 60° pada porositas 5%. Gbr. 4.3 - 4.6 menunjukkan perilaku hidrodinamika K_T dan K_R terhadap pengaruh perubahan slope pada FB.

Berdasarkan uji model, pengaruh slope sangat signifikan. Secara umum dapat dilihat bahwa semakin besar slopenya maka semakin besar pula nilai K_T -nya. Hal yang sama terjadi pada K_R . Oleh karena itu, dengan meningkatnya parameter gelombang, maka nilai K_T menurun, dan nilai K_R meningkat. Pada kondisi parameter gelombang rendah, nilai K_T pada semua model menunjukkan nilai yang tinggi dan pengaruh yang cukup besar pada slope 60° dan porositas 5%. Hal ini terjadi karena pengaruh struktur berpori, sehingga menimbulkan disipasi gelombang yang besar. Slope pada FB dapat meningkatkan rata-rata nilai persentase K_T dan K_R masing-masing sebesar 3.85% dan 21.67% pada porositas

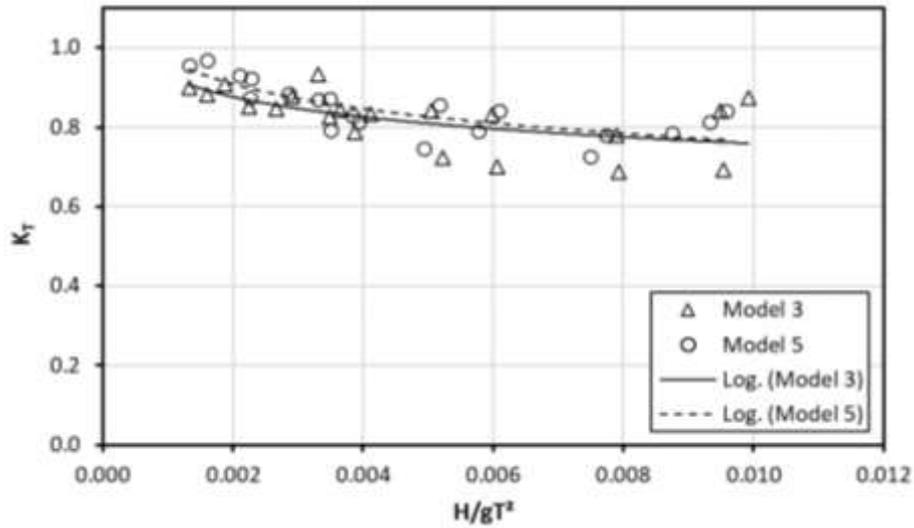
struktur 0%. Sedangkan pada porositas 5% dapat meningkatkan nilai K_T sebesar 4.25% dan K_R sebesar 27.22% pada slope 45° dan 60°.



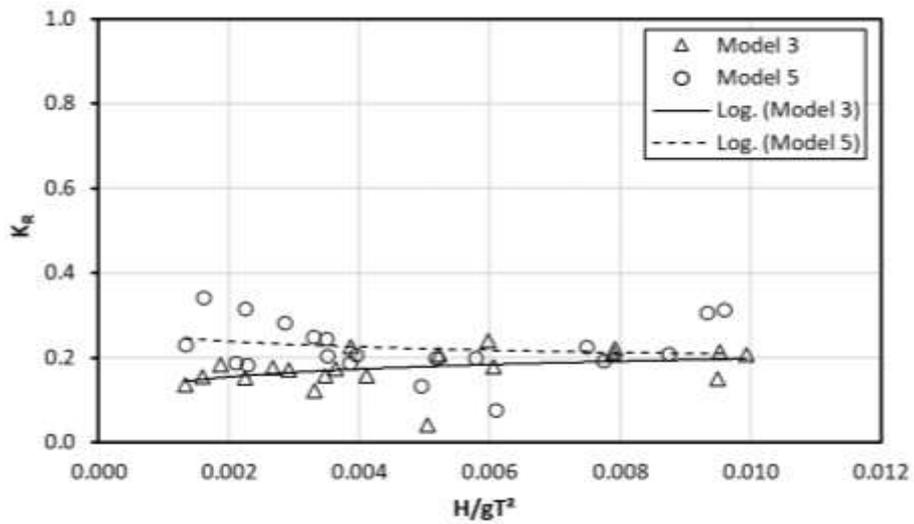
Gambar 4.3 Pengaruh perubahan slope terhadap K_T pada model 2 dan 4



Gambar 4.4 Pengaruh perubahan slope terhadap K_R pada model 2 dan 4



Gambar 4.5 Pengaruh perubahan slope terhadap K_T pada model 3 dan 5



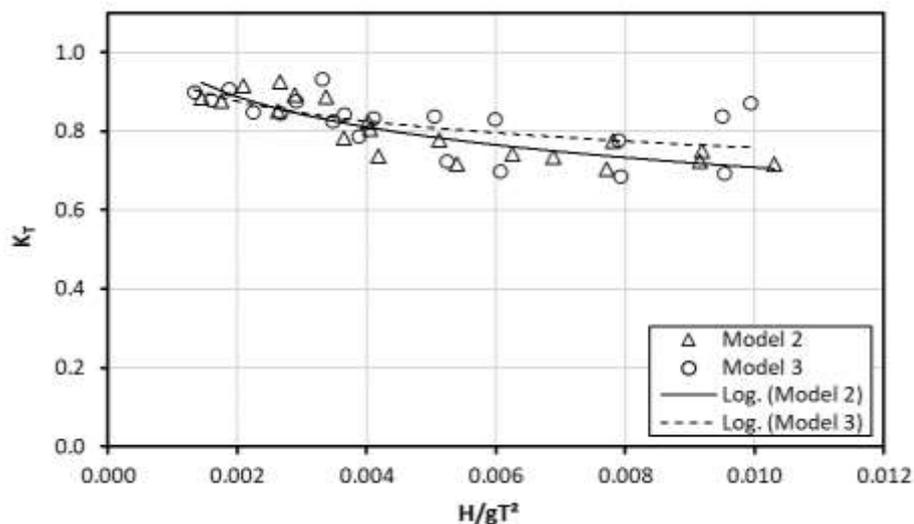
Gambar 4.6 Pengaruh perubahan slope terhadap K_R pada model 3 dan 5

4.1.3 Pengaruh Porositas pada FB

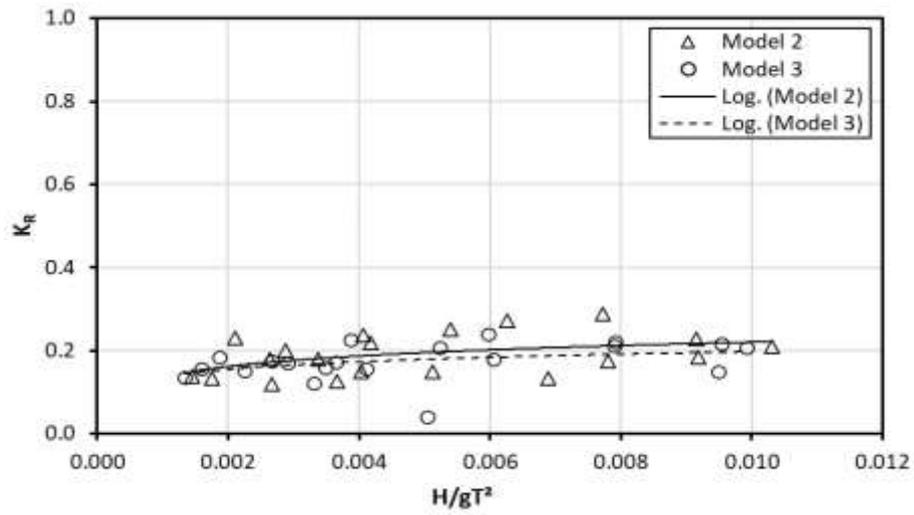
Berikut adalah analisis yang menunjukkan perilaku koefisien transmisi dan refleksi terhadap porositas. Analisis ini akan membandingkan K_T dan K_R antar model pada porositas 0% dan 5%. Perbandingan Model 2 (slope 45°, porositas 0%) dengan Model 3 (slope 45°, porositas 5%) dan Model 4 (slope 60°, porositas 0%) dengan Model 5 (slope 60°, porositas 5%). Besarnya pengaruh porositas terhadap koefisien K_T dan K_R pada parameter gelombang ditunjukkan pada Gbr. 4.7 - 4.10.

Berdasarkan perbandingan dengan *trendline* yang ada, terlihat bahwa FB dengan porositas 0% memberikan nilai K_T yang lebih kecil dibandingkan dengan porositas 5%. Artinya FB tanpa porositas dapat menyerap gelombang lebih baik dibandingkan dengan struktur berpori. Sebaliknya, porositas 0% dapat meningkatkan K_R yang lebih besar dari porositas 5%. Dengan demikian, terlihat bahwa porositas berperan penting dalam menaikkan atau menurunkan K_T dan K_R . FB dengan porositas 5% dapat meningkatkan K_T sebesar 2.38% pada slope 45° dan 2.78% pada slope 60° dan menurunkan K_R sebesar 9.45% dan 13.4% pada sudut slope 45° dan 60°. Hal ini sesuai dengan penelitian Zeng et al. [33], pada gelombang panjang dengan tinggi gelombang kecil, PFB mempunyai K_T lebih kecil 0.5%-4% terhadap bentuk tanpa pori. Karena PFB tidak dapat mencapai disipasi gelombang yang efektif pada sebagian besar kondisi terutama karena freeboard struktur yang kecil.

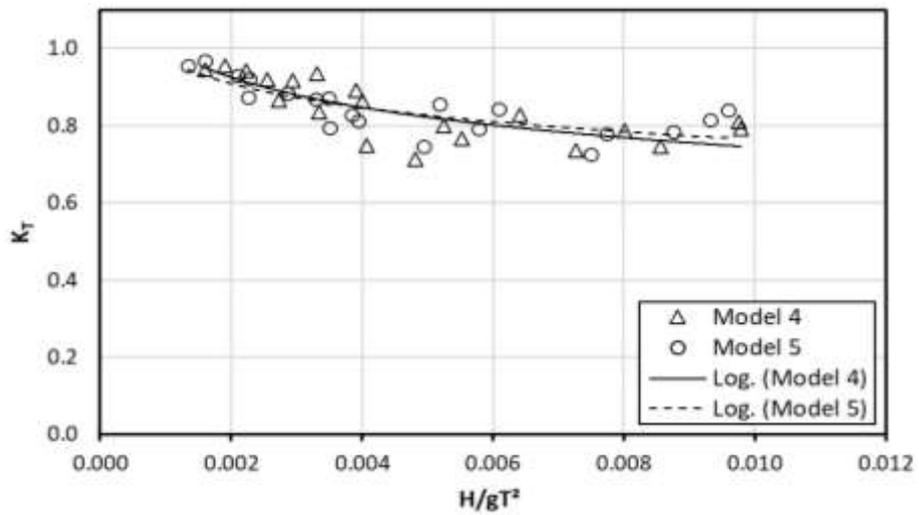
Namun, dalam aplikasi praktis, aspek lain juga harus dipertimbangkan, yaitu tegangan mooring line, gerak, dan stabilitas struktural. Semakin banyak energi gelombang yang diserap (K_T kecil, K_R besar), semakin besar pula gerak struktur yang terjadi, karena energi gelombang secara alami akan berubah menjadi energi gerak. Kondisi ini akan berdampak pada stabilitas dan tegangan mooring line.



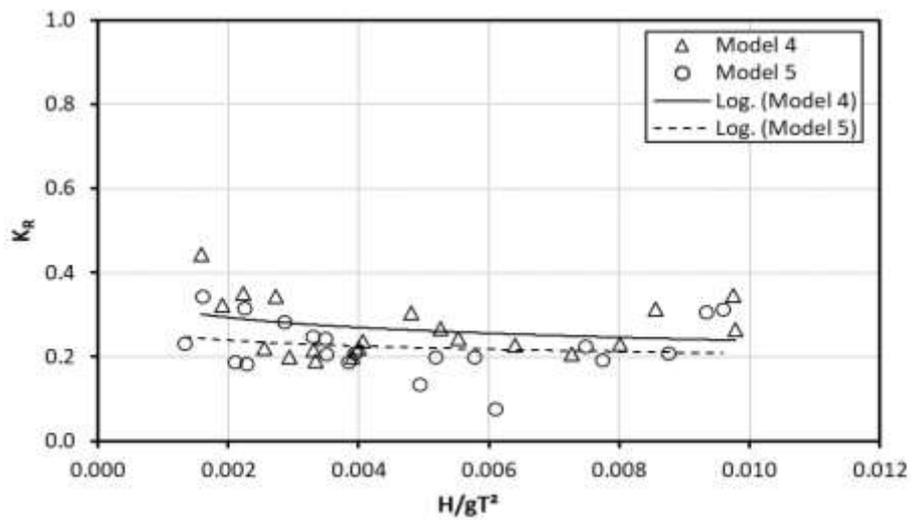
Gambar 4.7 Dampak perubahan porositas terhadap K_T pada model 2 dan 3



Gambar 4.8 Dampak perubahan porositas terhadap K_R pada model 2 dan 3



Gambar 4.9 Dampak perubahan porositas terhadap K_T pada model 4 dan 5



Gambar 4.10 Dampak perubahan porositas terhadap K_R pada model 4 dan 5

4.2 Tegangan Mooring pada FB

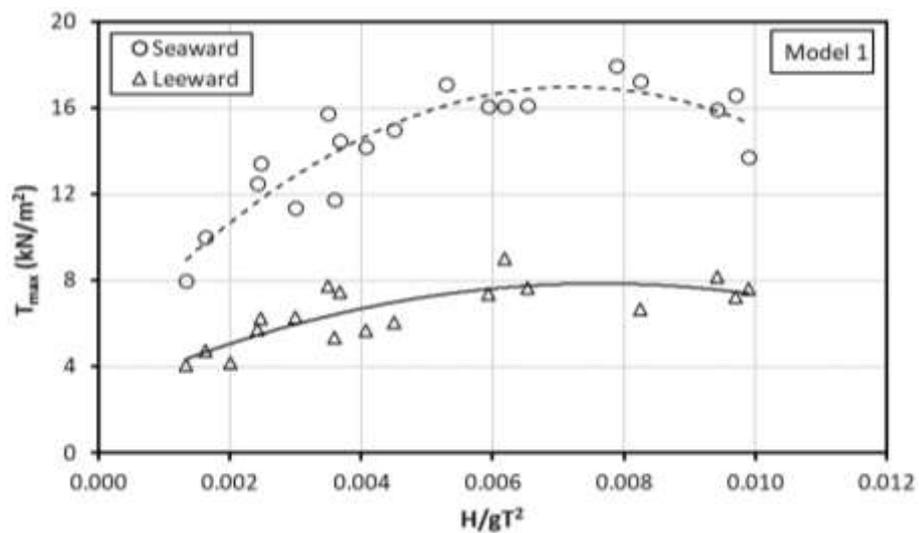
4.2.1 Tegangan Mooring pada Sisi *Seaward* dan *Leeward* FB

Tegangan mooring pada sisi *seaward* dan *leeward* dalam lima model FB ditunjukkan pada Gbr. 4.11 - 4.15. Tegangan mooring sebagai fungsi kecuraman gelombang, H/gT^2 , dengan tinggi gelombang H , periode gelombang T , dan percepatan gravitasi g . Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa kecuraman gelombang mempengaruhi tegangan yang diterima sistem tali tambat pada FB. Semakin tinggi kecuraman gelombang, semakin besar pula tegangan maksimum yang diterima sistem tambat pada masing-masing model. Kecuraman gelombang tinggi diartikan sebagai kondisi yang menggabungkan gelombang tinggi dengan frekuensi tinggi. Tegangan mooring sisi arah laut (*seaward*) selalu lebih besar daripada sisi arah pantai (*leeward*) (Tabel 4.1). Fenomena ini juga dapat dilihat dari perilaku model saat diuji pada wave flume dan relevan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mane et al. [31].

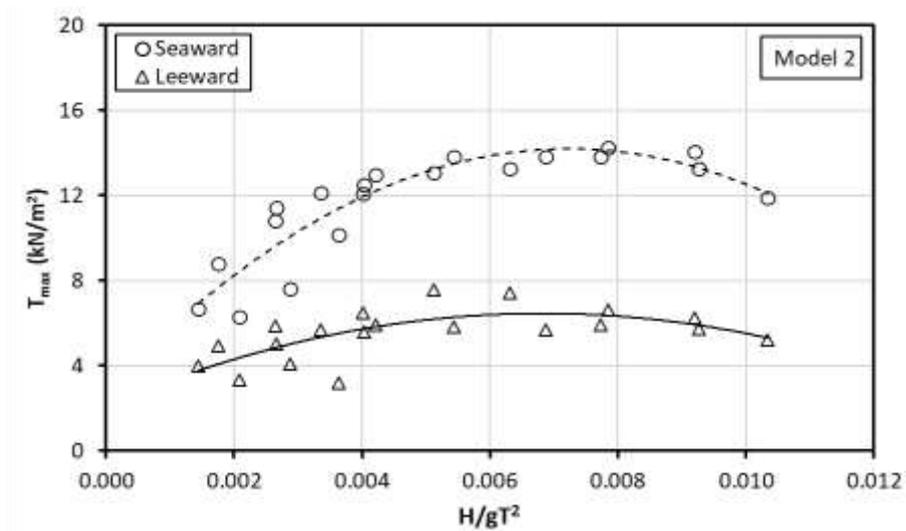
Perbandingan tegangan mooring pada semua model ditunjukkan pada Gbr. 4.16 dan 4.17. Pada sisi *seaward*, tegangan mooring maksimum akan terus meningkat hingga kecuraman gelombang mencapai 0.008 dan menurun secara bertahap dengan bertambahnya kecuraman gelombang. Ponton (model 1) memiliki tegangan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan keempat model lainnya (Tabel 2). Karena dalam bentuk ponton, struktur akan menerima gaya gelombang pada permukaan yang tegak lurus dengan arah datangnya gelombang sehingga tegangan mooring yang diterima tali tambat akan cukup besar. Pada model 2 - 5, permukaan FB mempunyai slope (45° dan 60°) dan porous (model 3 dan 5) untuk mengurangi beban gelombang yang diterima sehingga dapat mengurangi tegangan mooring. Terjadi penurunan tegangan mooring sebesar 23.6% pada model 2, 44.3% pada model 3, 34.0% pada model 4, dan 51.9% pada model 5 terhadap model 1. Demikian pula, FB pada sisi *leeward* memiliki perilaku yang sama dengan *seaward*. Terjadi penurunan tegangan mooring pada model 2 sebesar 15.4%, model 3 sebesar 38.5%, model 4 sebesar 32.3%, dan model 5 sebesar 46.25% terhadap model 1.

Tabel 4.1. Tegangan mooring pada sisi seaward and leeward

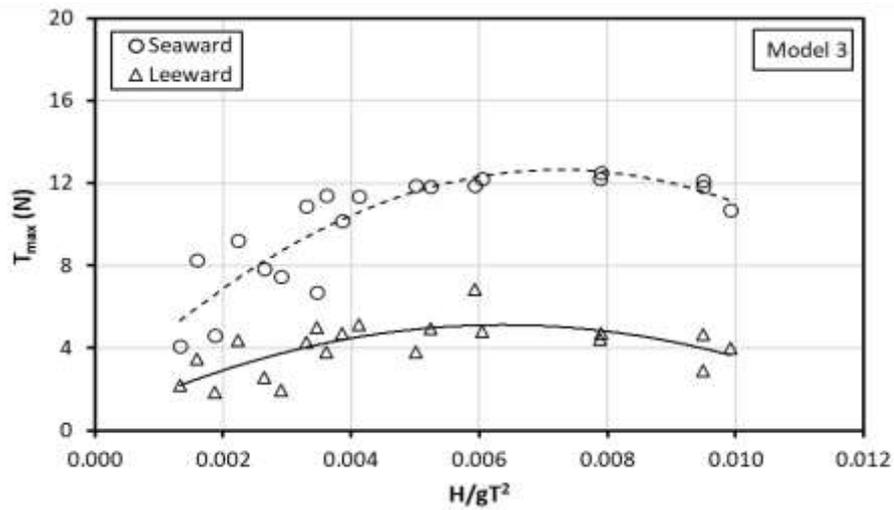
Name	Seaward (kN/m ²)	Leeward (kN/m ²)
Model 1	14.4	6.5
Model 2	11.6	5.5
Model 3	9.9	4.0
Model 4	10.7	4.4
Model 5	9.5	3.4



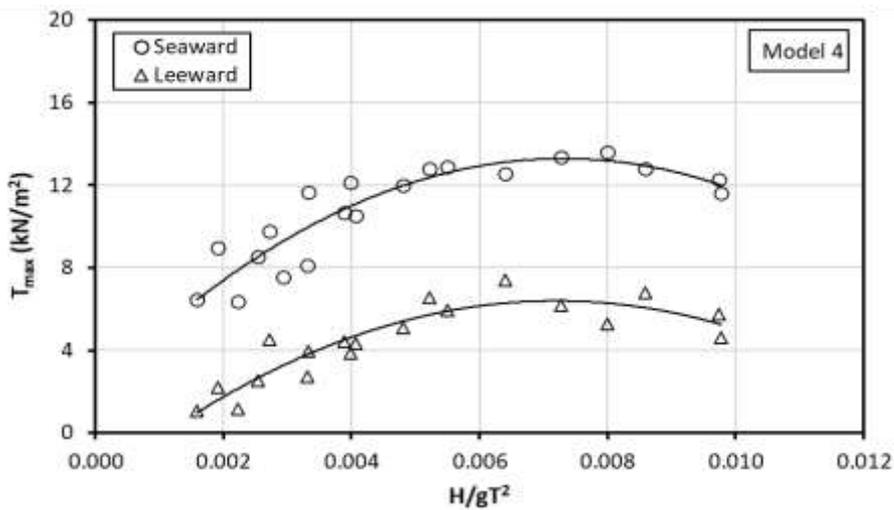
Gambar 4.11 Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 1



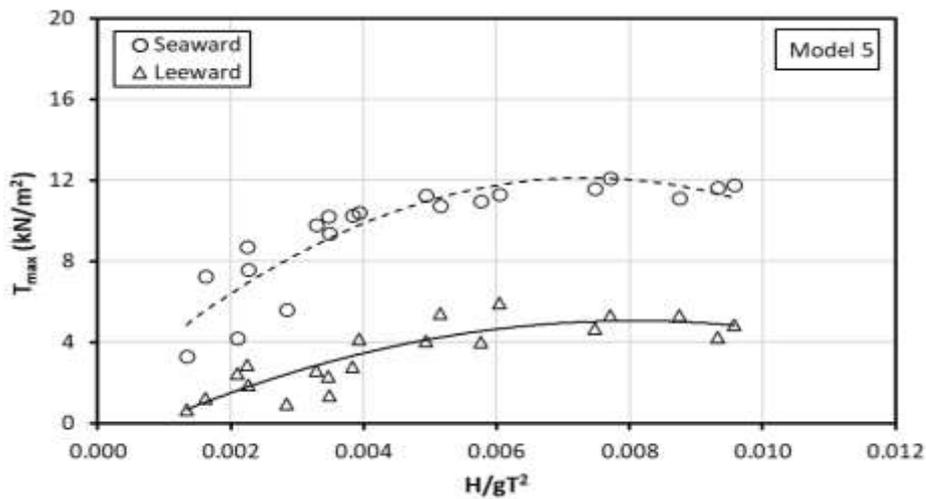
Gambar 4.12 Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 2



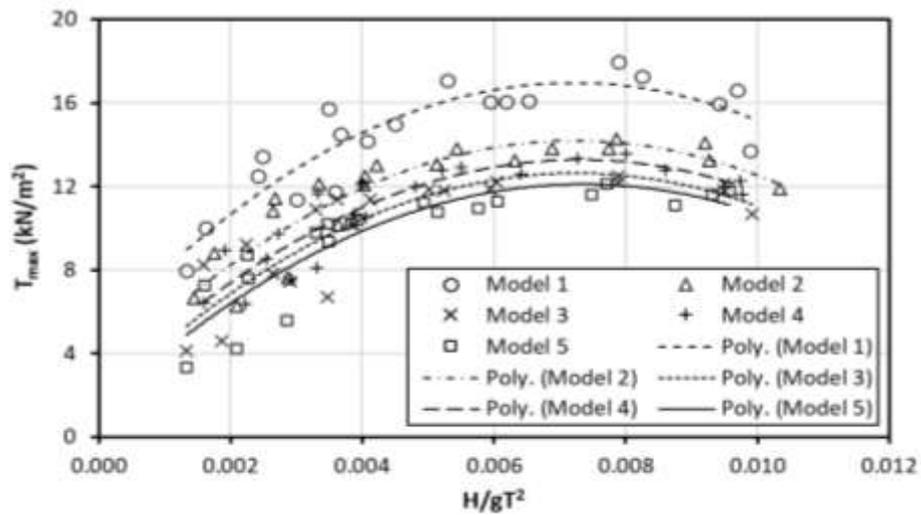
Gambar 4.13 Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 3



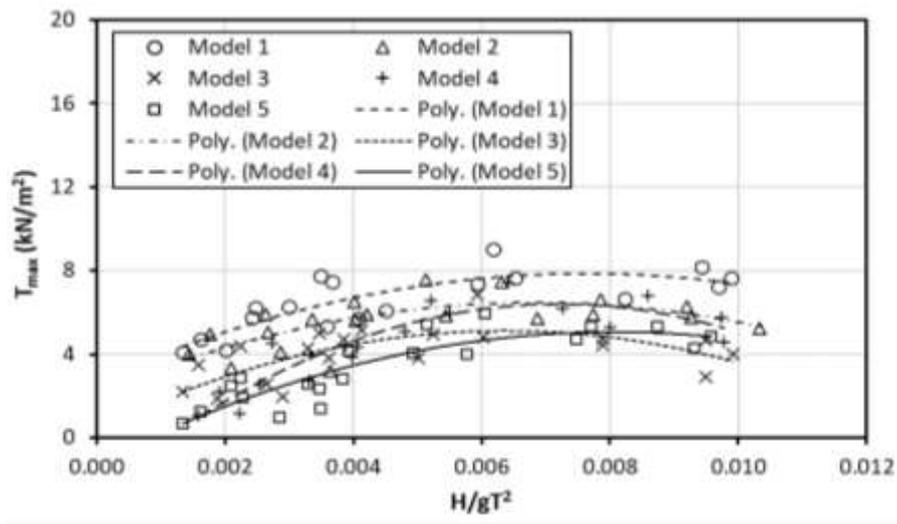
Gambar 4.14 Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 4



Gambar 4.15 Tegangan mooring pada sisi seaward dan leeward pada model 5



Gambar 4.16 Tegangan mooring pada sisi seaward pada lima model FB



Gambar 4.17 Tegangan mooring pada arah leeward dalam lima model FB

4.2.2 Pengaruh Slope pada Tegangan Mooring FB

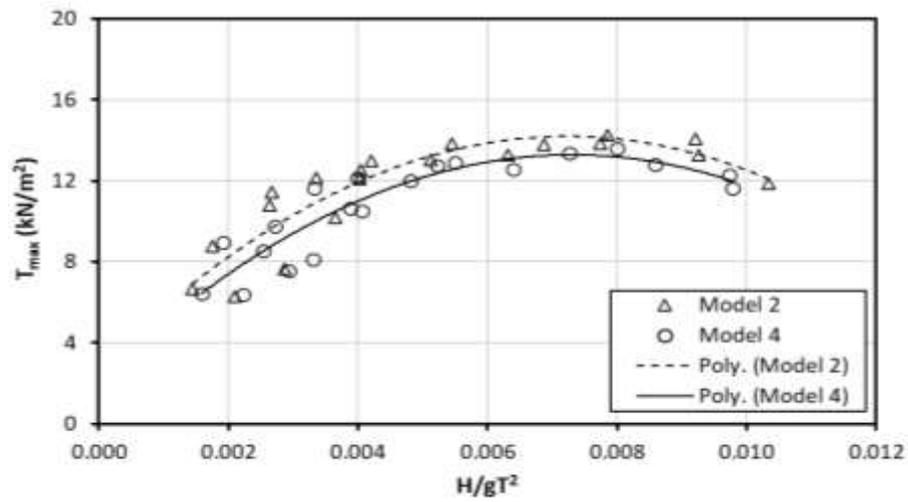
Gbr. 4.18 dan 4.19 menunjukkan pengaruh variasi slope FB (45° , 60°) terhadap tegangan tambat rata-rata dengan porositas 0% dan 5%. Seperti halnya dengan analisis tegangan tambat pada bagian sebelumnya, grafik yang disajikan membandingkan tegangan berbagai model dengan sudut slope yang berbeda pada sisi seaward. Hasil analisis menunjukkan bahwa sudut slope yang lebih landai (45°) dapat meningkatkan tegangan mooring yang diterima oleh FB masing-masing

sebesar 8.5% dan 5.3% pada porositas 0% dan 5% terhadap slope 60°, secara berturut-turut. Studi oleh Ji et al. [69] menunjukkan bahwa K_T berbanding terbalik dengan tegangan mooring line seiring dengan perubahan tinggi gelombang, dan dapat disimpulkan bahwa tegangan mooring meningkat ketika sudut slope yang digunakan signifikan.

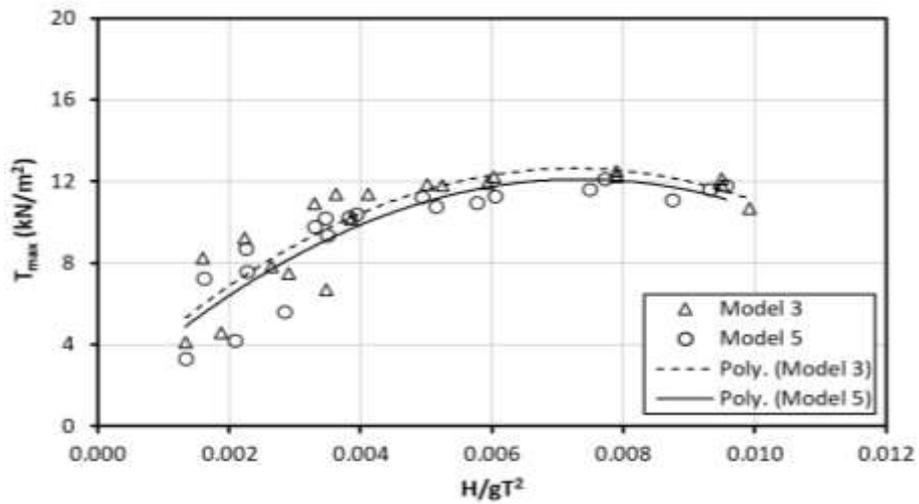
4.2.2 Pengaruh Porositas pada Tegangan Mooring FB

Gbr. 4.20 dan 4.21 menunjukkan perilaku tegangan mooring terhadap porositas. Analisis ini membandingkan tegangan mooring antara model pada porositas 0% dan 5%, dan slope FB adalah 45° (model 2 dan 3) dan 60° (model 4 dan 5). Berdasarkan perbandingan dengan *trendline* eksisting, FB dengan porositas 5% dapat memberikan tegangan mooring yang lebih rendah dibandingkan tanpa porositas (non-porous, 0%). Artinya, bentuk porous pada FB dapat mengurangi tegangan mooring. FB dengan porositas 5% dapat menurunkan tegangan mooring sebesar 16.5% dan 13.5% pada slope struktur masing-masing 45° dan 60°.

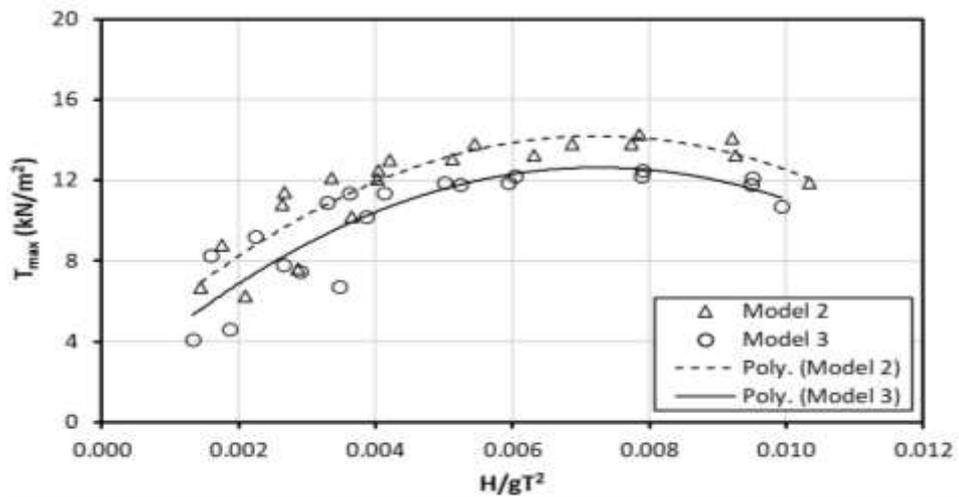
Fenomena ini mengikuti penelitian Ji et al. [69] pada FB dengan jaring apung. FB jaring apung diisi dengan bola dibandingkan dengan tanpa diisi bola. FB jaring bola dianggap struktur dengan persentase porositas yang lebih tinggi. Studi ini menegaskan bahwa model FB yang menerima tegangan mooring lebih tinggi adalah jaring berisi bola. Penambahan porositas terbukti menyebabkan penurunan tegangan mooring yang diterima oleh mooring line. Penelitian serupa juga telah dipelajari oleh Zheng et al. [33]. FB berpori memiliki gaya mooring yang lebih kecil daripada bentuk yang tidak berpori; semakin besar porositasnya, semakin kecil gaya mooring dari FB.



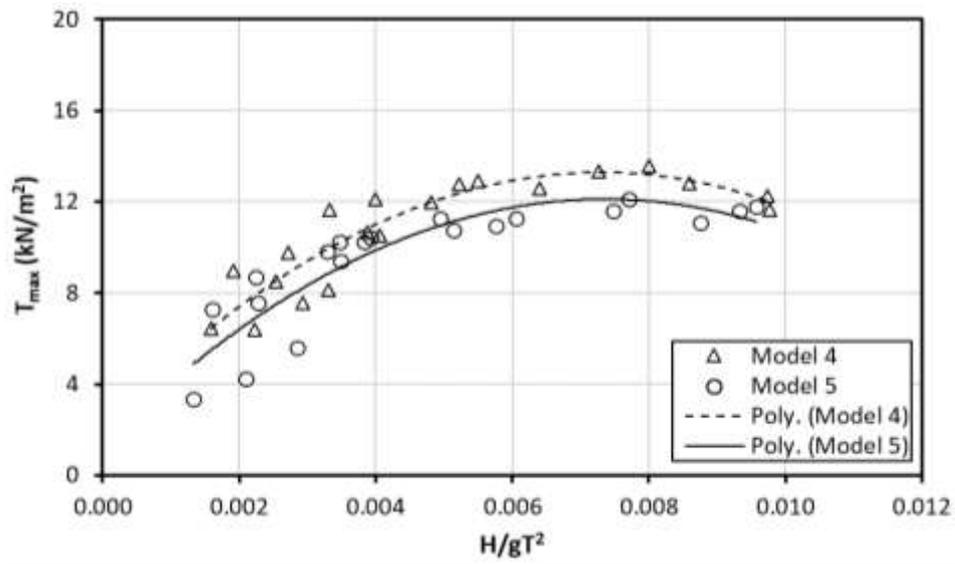
Gambar 4.18 Pengaruh slope terhadap tegangan mooring FB tanpa pori



Gambar 4.19 Pengaruh slope terhadap tegangan mooring FB dengan porositas 5%.



Gambar 4.20 Pengaruh porositas terhadap tegangan mooring FB pada slope 45°



Gambar 4.21 Pengaruh porositas terhadap tegangan mooring FB pada slope 60°

BAB 5

ANALISA HASIL MODEL NUMERIK

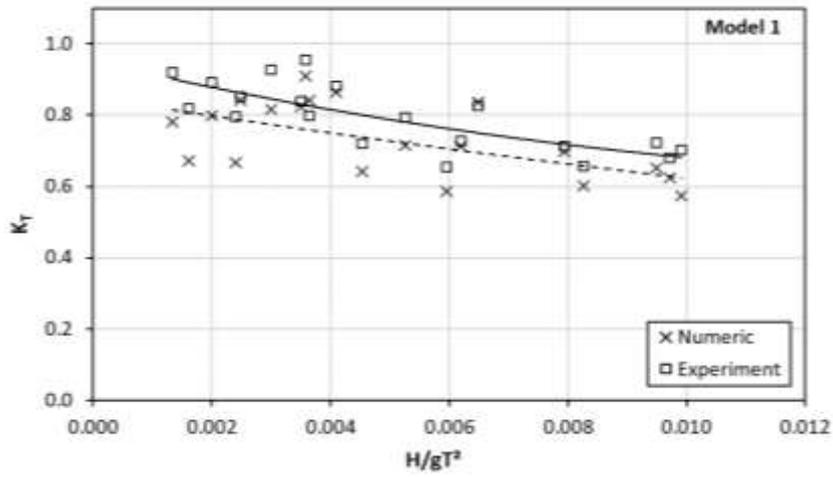
5.1 Performance Hidrodinamika Floating Breakwater

5.1.1 Validasi Koefisien Transmisi Gelombang (K_T)

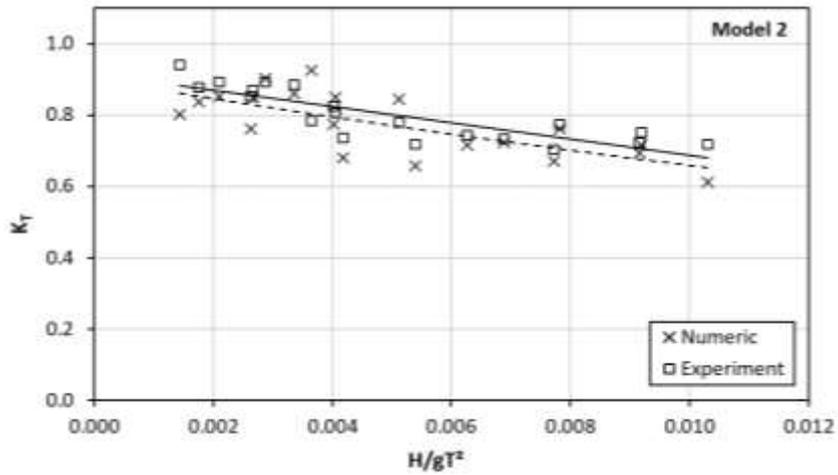
Pada pemodelan numerik ini, simulasi dilakukan dengan kondisi yang sama saat eksperimen. Validasi model numerik dilakukan untuk menguji keakuratan hasil numerik dengan eksperimen pada model 1 - 5 (Gbr. 3.3, Tabel 3.2). Hasil analisis K_T untuk masing-masing model diplot untuk mengetahui pengaruh bilangan parameter gelombang (H/gT^2) terhadap K_T dengan menggunakan persamaan linier. Ditemukan bahwa variasi linier memberikan nilai R^2 yang paling signifikan. Berdasarkan data dari analisis K_T , dimungkinkan untuk membandingkan setiap model dengan hasil uji eksperimen sebelumnya. Berikut adalah grafik perbandingan K_T dari masing-masing model (Gbr 5.1 – 5.5).

Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa *trendline* hasil simulasi numerik dan eksperimen relatif sama. Perbedaan error antara hasil model numerik dan eksperimen rata-rata K_T masing-masing model ditunjukkan pada Tabel 5.1. Nilai error pada model 1 sampai 5 adalah 7.7%, 7.57%, 2.28%, 5.717%, dan 4.42%, secara berturut-turut. Hasil keseluruhan antara pemodelan numerik dan eksperimen masih di bawah 10%, sehingga pemodelan tersebut tergolong baik. Pada hasil pemodelan numerik dan eksperimen terdapat sedikit perbedaan nilai dimana pada pemodelan numerik memiliki K_T yang lebih kecil dari hasil eksperimen. Ada beberapa penyebab perbedaan ini, diantaranya gerakan surge FB yang berlebihan dapat meningkatkan K_T . Kelebihan gerak ini dapat terjadi karena perbedaan saat memodelkan FB dan sistem mooring line. Tidak semua fenomena selama pengujian model fisik dapat dimodelkan secara numerik.

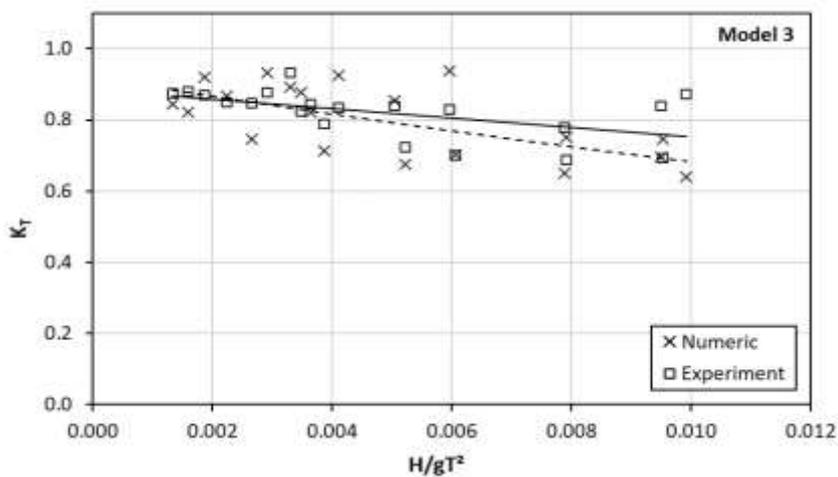
Hasil analisis K_T menunjukkan bahwa semakin landai kemiringan FB maka K_T akan semakin kecil, dan semakin *impermeabel* kemiringan struktur maka nilai K_T akan semakin kecil.



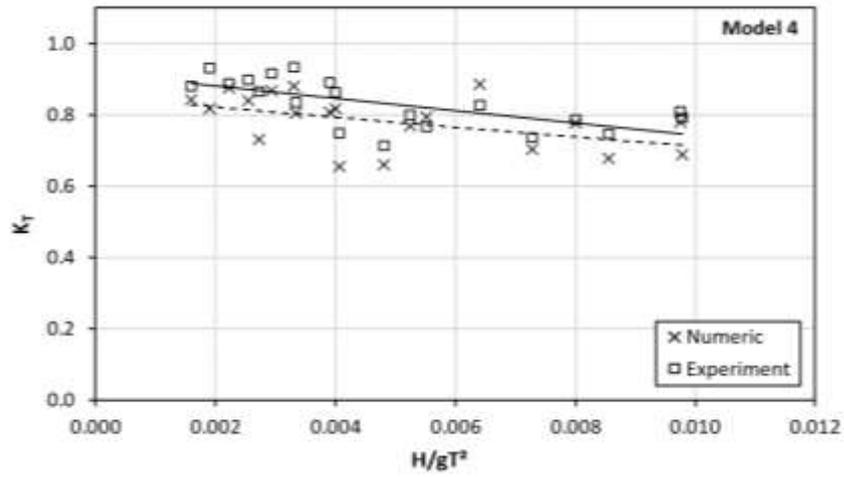
Gambar 5.1 Validasi K_T model 1 hasil numerik dan eksperimen



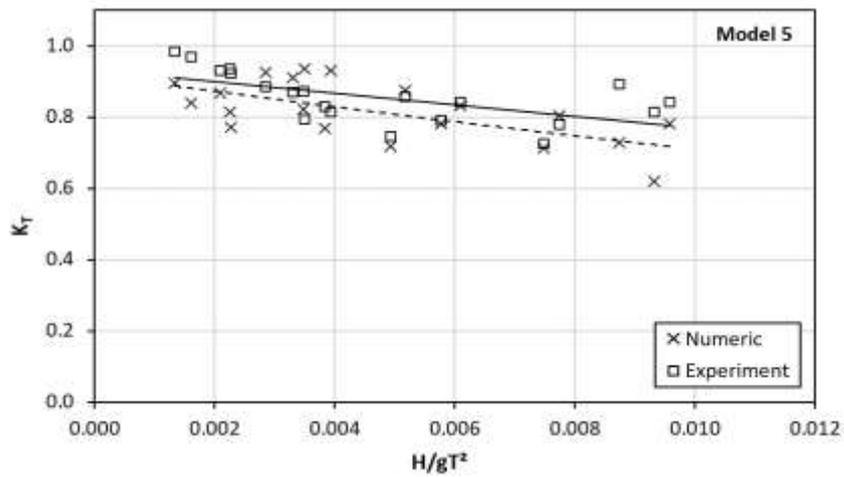
Gambar 5.2 Validasi K_T model 2 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.3 Validasi K_T model 3 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.4 Validasi K_T model 4 hasil numerik dan eksperimen



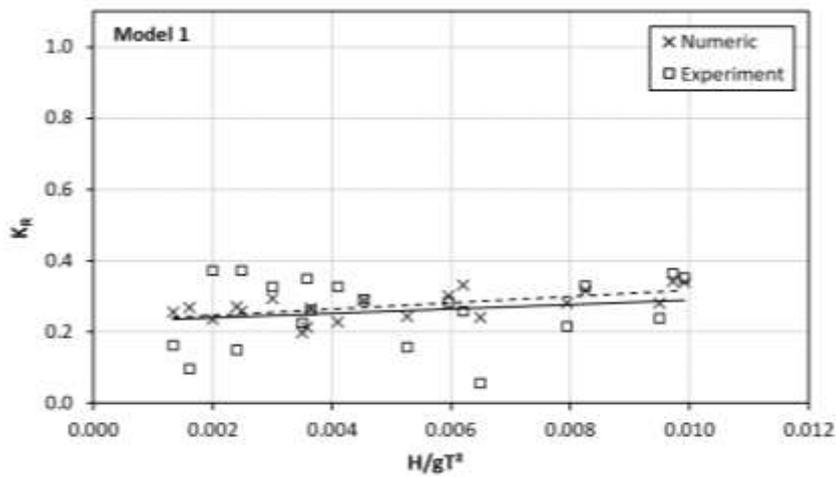
Gambar 5.5 Validasi K_T model 5 hasil numerik dan eksperimen

Table 5.1 Validasi K_T pada berbagai model FB

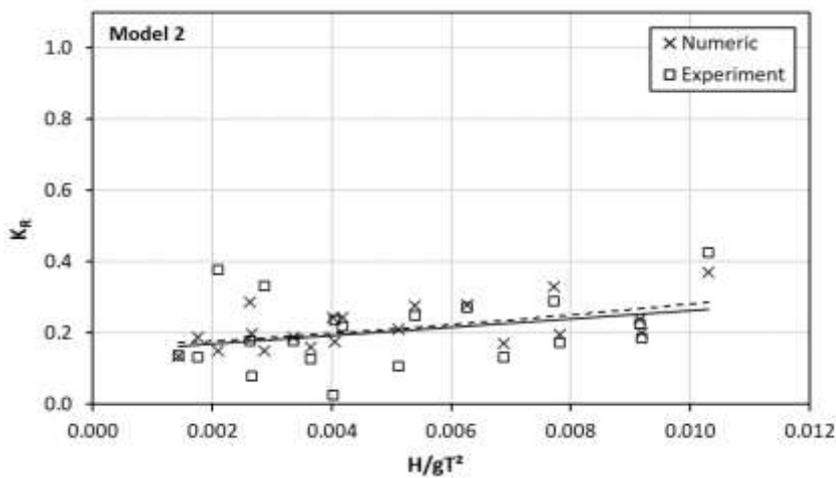
Model	K_T		Error
	Numeric	Experiment	%
Model 1	0.73	0.79	7.70
Model 2	0.77	0.72	7.57
Model 3	0.80	0.82	2.28
Model 4	0.78	0.83	5.71
Model 5	0.82	0.85	4.42

5.1.2 Validasi Koefisien Refleksi Gelombang (K_R)

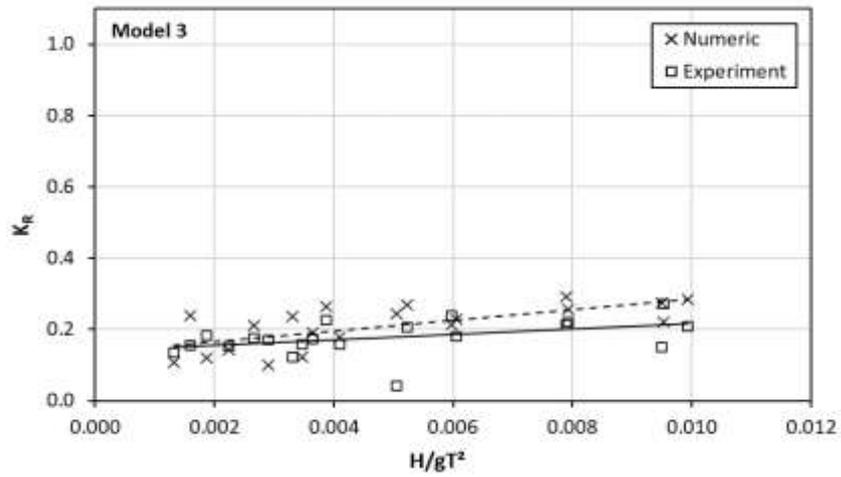
Hasil analisis model numerik K_R dirangkum pada Gbr 5.6 – 5.10. Tabel 5.2 menunjukkan rata-rata error K_R untuk masing-masing model numerik terhadap hasil eksperimen. K_R pada model 1 sampai 5 berturut-turut adalah 5.27%, 7.29%, 8.22%, 4.07%, dan 5.76%. Dengan melakukan perbandingan berdasarkan bentuk struktur impermeable dan porous, dapat dijelaskan bahwa semakin landai kemiringan FB maka semakin kecil K_R nya, dan sebaliknya semakin curam kemiringan FB, semakin besar K_R nya.



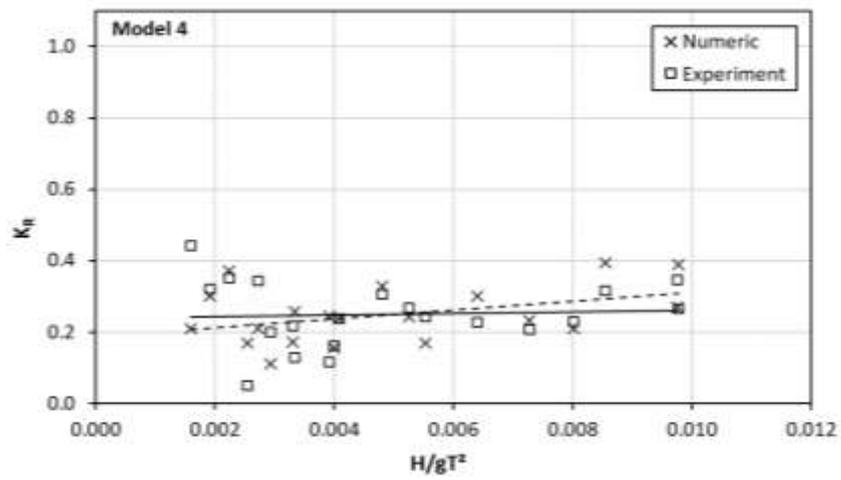
Gambar 5.6 Validasi K_R model 1 hasil numerik dan eksperimen



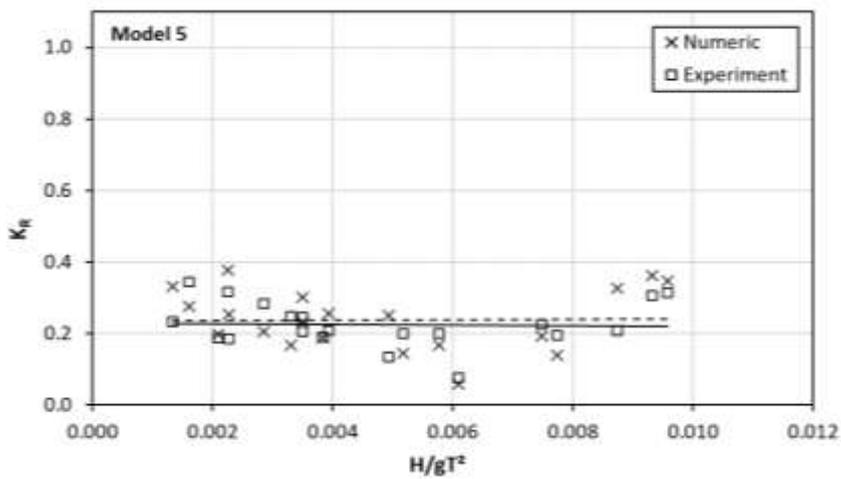
Gambar 5.7 Validasi K_R model 2 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.8 Validasi K_R model 3 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.9 Validasi K_R model 4 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.10 Validasi K_R model 5 hasil numerik dan eksperimen

Perbandingan K_R menunjukkan bahwa hasil simulasi numerik dan eksperimen berbeda (Tabel 5.2). Perbedaan ini terjadi karena pada saat pengujian eksperimen terjadi pantulan dari dinding flume tank yang menyebabkan elevasi air yang terbaca pada wave probe naik. Berdasarkan penelitian Mansard dan Funke [115], untuk mendapatkan hasil yang baik pada metode Goda dan Suzuki [100], jarak antar probe gelombang yang merekam data elevasi muka air akibat refleksi dari struktur harus diubah setiap periode gelombang yang berbeda. Sehingga metode ini tidak menghasilkan K_R yang maksimal.

Table 5.2 Validasi K_R pada berbagai model FB

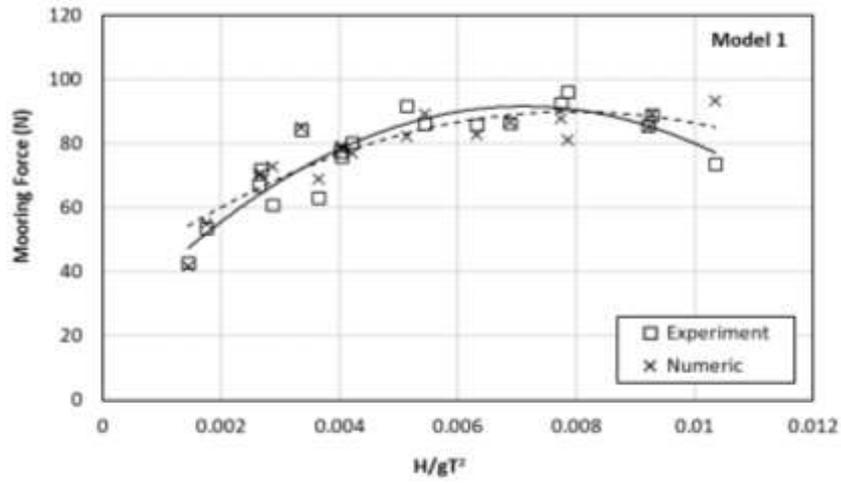
Model	Rata-rata K_R		Error
	Numeric	Experiment	%
Model 1	0.27	0.26	5.27
Model 2	0.22	0.20	7.29
Model 3	0.21	0.19	8.22
Model 4	0.25	0.24	4.07
Model 5	0.24	0.23	5.76

5.1.3 Validasi Gaya Mooring

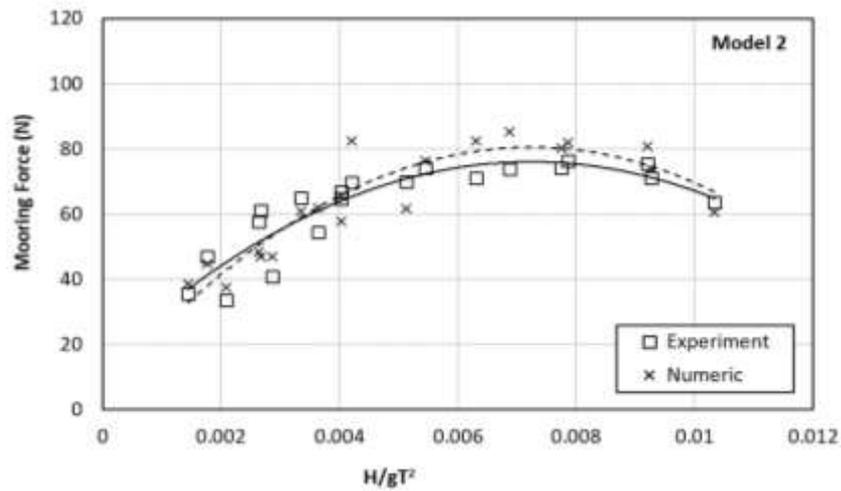
Hasil analisis model numerik gaya mooring dinyatakan dalam Gbr 5.11 – 5.15. Tabel 5.3 menunjukkan rata-rata error gaya mooring untuk masing-masing model numerik terhadap hasil eksperimen, pada model 1 sampai 5 secara berturut-turut adalah 0.85%, 2.28%, 3.53%, 2.88%, dan 3.78%. Hasil ini menunjukkan bahwa rata-rata error antara model numerik dengan eksperimen adalah dibawah 5%, artinya model numerik cukup baik. Jika diamati lebih jauh bentuk pori dan slope struktur di depan FB cukup berpengaruh terhadap gaya mooring.

Table 5.3 Validasi gaya mooring pada berbagai model FB

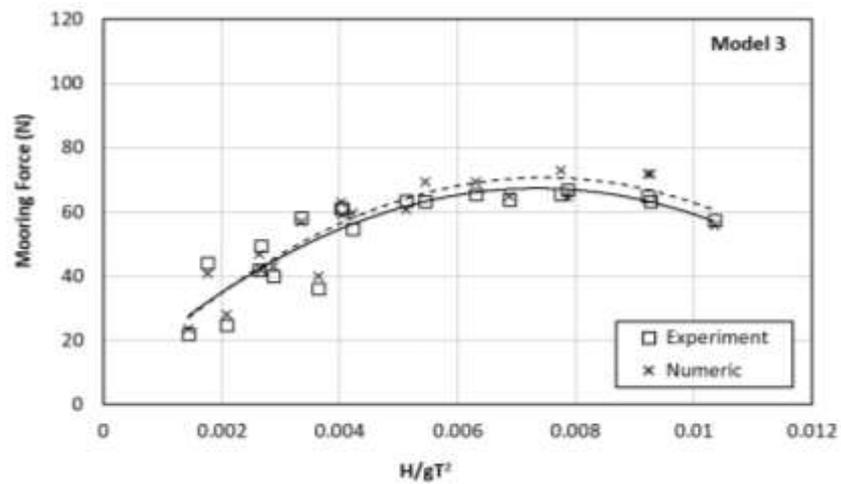
Model	Gaya Mooring (N)		Error
	Numeric	Experiment	%
Model 1	77.69	77.04	0.85
Model 2	63.77	62.35	2.28
Model 3	55.26	53.38	3.53
Model 4	59.13	57.48	2.88
Model 5	48.79	50.71	3.78



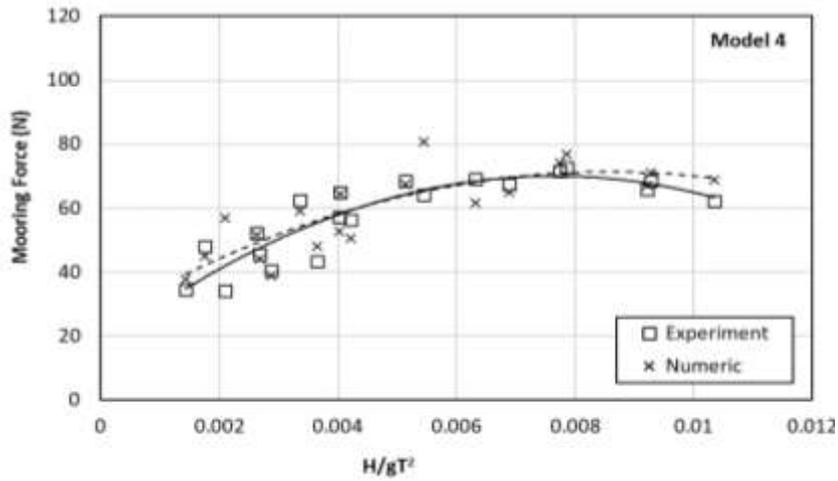
Gambar 5.11 Validasi gaya mooring model 3 hasil numerik dan eksperimen



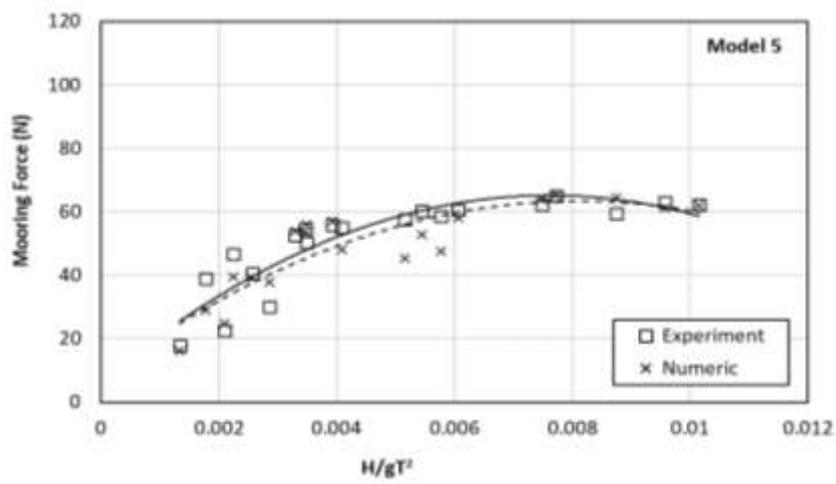
Gambar 5.12 Validasi gaya mooring model 2 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.13 Validasi gaya mooring model 3 hasil numerik dan eksperimen



Gambar 5.14 Validasi gaya mooring model 4 hasil numerik dan eksperimen



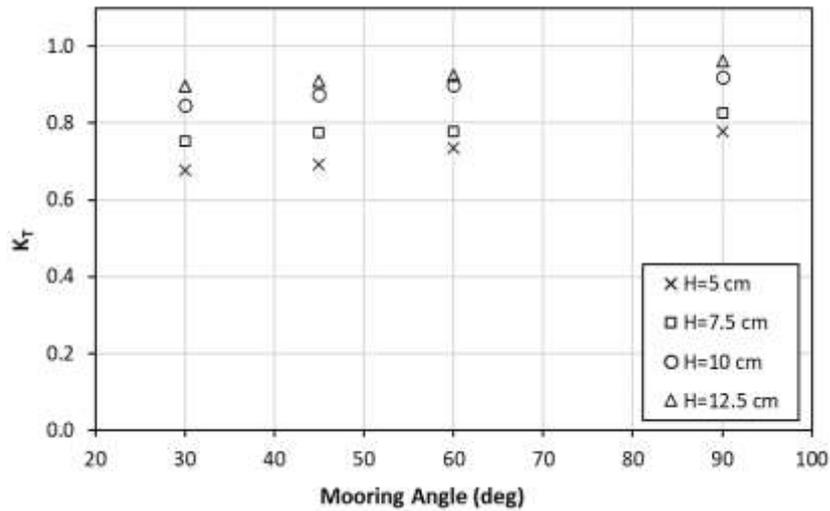
Gambar 5.15 Validasi gaya mooring model 5 hasil numerik dan eksperimen

5.1.4 Pengaruh Sudut Mooring pada K_T and K_R

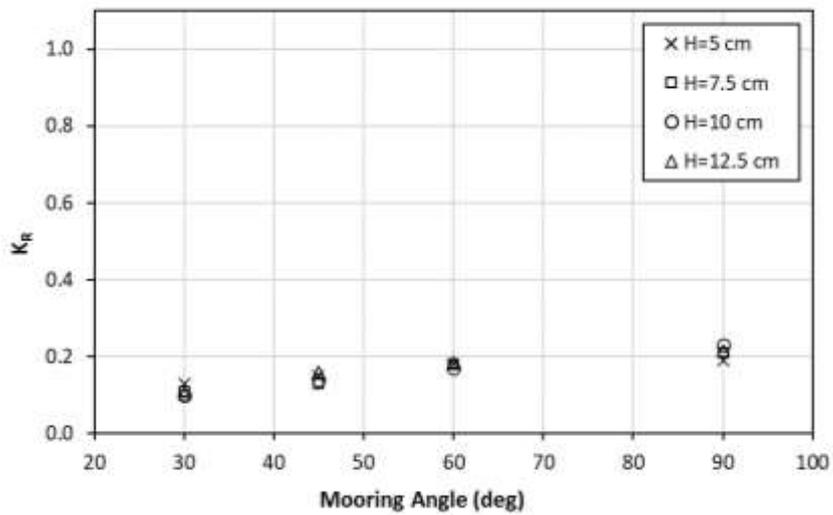
Setelah proses kalibrasi, K_T dan K_R floating breakwater dieksplorasi dengan simulasi CFD untuk mengkaji pengaruh perubahan sudut mooring. Pada model eksplorasi ini digunakan **model 2** sebagai contoh studi. Simulasi numerik dilakukan pada periode gelombang, $T = 2$ detik, dan tinggi gelombang $H = 5$ cm, 7.5 cm, 10 cm, dan 12.5 cm dengan konfigurasi sudut tali tambat 90° , 60° , 45° , dan 30° .

Hasil simulasi sudut mooring line pada K_T dan K_R ditunjukkan pada Gbr. 5.16 dan 5.17. Dapat dilihat bahwa semakin tegak suatu sudut mooring maka K_T dan K_R

akan semakin tinggi. Hal tersebut dapat terjadi karena floating breakwater lebih leluasa bergerak, dan adanya efek tarikan dari mooring line pada sudut 90° yang menyebabkan K_T menjadi lebih tinggi.



Gambar 5.16 Pengaruh sudut mooring terhadap K_T



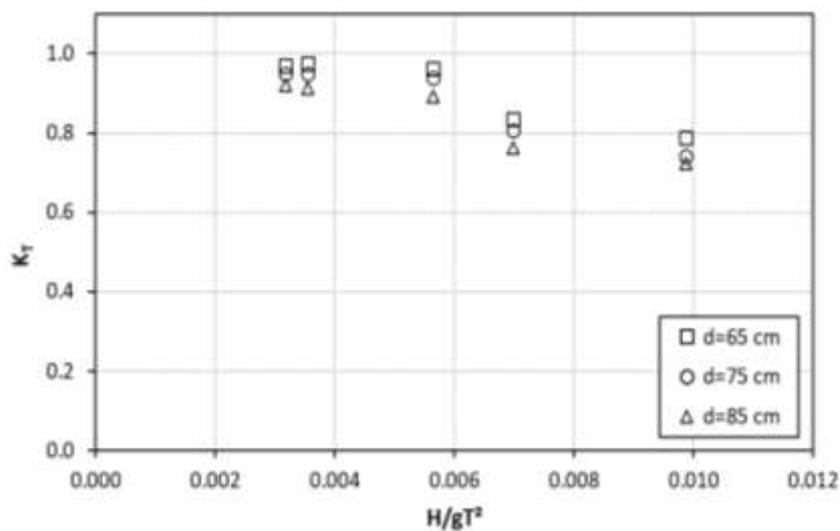
Gambar 5.17 Pengaruh sudut mooring terhadap K_R

5.1.5 Pengaruh Elevasi Muka Air pada K_T dan K_R

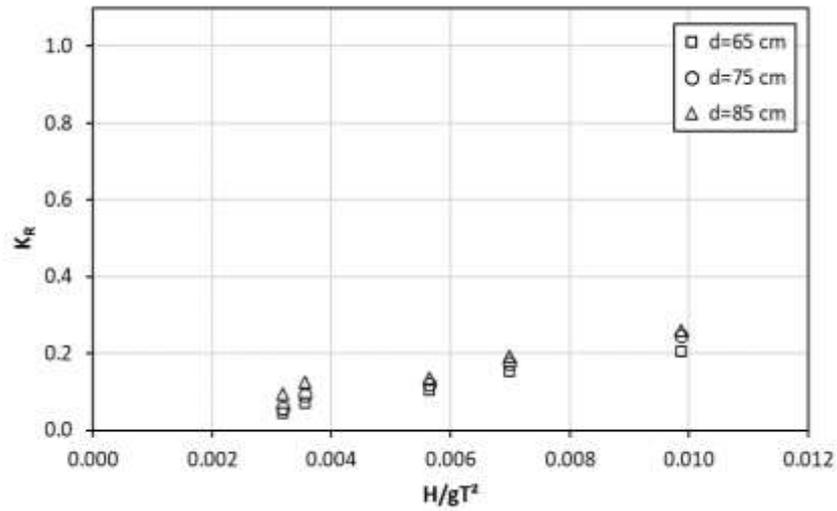
Pengaruh perubahan elevasi muka air ($d= 85$ cm, 75 cm, dan 65 cm) terhadap K_T dan K_R struktur floating breakwater dilakukan dengan simulasi numerik pada **model 2**. Simulasi dilakukan dengan variasi periode gelombang 1.1 detik sampai

2.0 detik dan tinggi gelombang 12.5 cm. Sudut tali tambat diset 30° dengan panjang tali 150 cm.

Gbr 5.18 dan 5.19 menunjukkan pengaruh elevasi muka air terhadap K_T dan K_R . Ketinggian air kondisi pasang 85 cm, muka air tenang 75 cm, dan air surut 65 cm memberikan K_T rata-rata 0.84, 0.88, dan 0.90, secara berturut-turut. Pada saat yang sama, K_R rata-rata masing-masing adalah 0.16, 0.14, dan 0.12. Grafik tersebut menunjukkan bahwa perubahan elevasi muka air mempengaruhi K_T dan K_R . Pada kedalaman 85 cm menghasilkan transmisi gelombang minor dan memiliki refleksi gelombang tertinggi. Karena ketika tinggi muka air tenang dan surut (75 cm dan 65 cm) tali tambat akan kendur dan menyebabkan floating breakwater bergerak lebih bebas. Jika diamati lebih jauh, nampak bahwa K_T hampir mendekati 1, artinya hanya sedikit gelombang yang tereduksi oleh FB. Karena FB dirancang dengan *freeboard* 5cm (riil 1.0m), sementara tinggi gelombang datang (H_i) sebesar 12.5cm (riil 2.5m) sehingga menyebabkan terjadinya *overtopping*. Fenomena pasang surut ini harus menjadi perhatian bagi para insinyur saat merancang struktur di kawasan pantai.



Gambar 5.18 Pengaruh perubahan elevasi muka air terhadap K_T

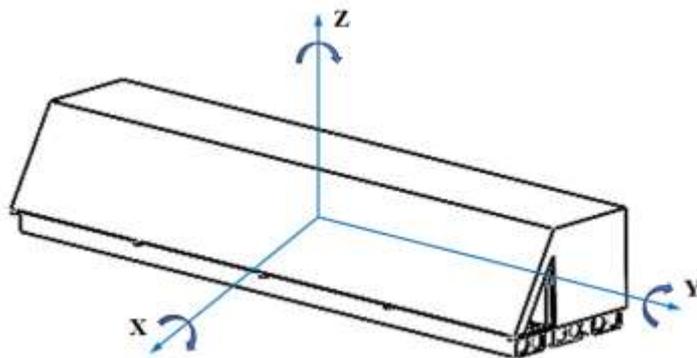


Gambar 5.19 Pengaruh perubahan elevasi muka air terhadap K_T

5.2 Performance Hidrodinamika pada Berbagai Layout FB

5.2.1 Respons Dinamis Gerakan FB

Analisis response amplitudo operator (RAO) struktur dilakukan pada moda gerak 6 derajat kebebasan yaitu mode gerak translasi (surge, sway, heave) dan rotasi (roll, pitch, yaw) dalam kondisi free floating. Orientasi gerak FB mengacu pada sumbu x, y dan z (Gbr. 5.20). Analisis pengaruh arah datang gelombang terhadap RAO struktur dilakukan pada arah 0° dan 45° . Skenario model FB pada slope 60° dengan porositas 5% dan 10% (Tabel 5.4). Hasil simulasi RAO gerak translasi dan rotasi pada model 1 dengan arah gelombang 0° dan 45° dinyatakan pada Gbr. 5.21 – 5.26.



Gambar5.20 Orientasi sumbu x, y dan z pada FB

Tabel 5.4 Data dimensi geometri model FB

Geometri Model FB					
Model FB	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)	Slope (°)	Porositas (%)
Model 1	100	15	15	-	-
Model 2	100	23.75	15	60	0
Model 3	100	23.75	15	60	5
Model 4	100	23.75	15	60	10

Dapat dilihat bahwa gerak surge maksimum terjadi saat frekuensi terendah dan semakin bertambahnya frekuensi akan semakin menurun gerak surge pada struktur. RAO gerak surge sendiri memiliki karakteristik semakin tinggi frekuensi gelombang maka akan semakin kecil amplitude gerakan surge yang terjadi pada struktur. Analisis RAO dilakukan gerakan surge terbesar terjadi pada arah gelombang datang 0° . Karakteristik RAO gerak sway sama dengan gerak surge, gerak sway maksimum terjadi pada frekuensi terendah dan amplitude gerak sway akan mengecil seiring bertambahnya frekuensi gelombang. Untuk pengaruh arah datang pada gerakan sway yaitu pada arah gelombang 45° mempunyai pengaruh yang signifikan, dan pada arah 0° gerakan sway yang terjadi cukup kecil.

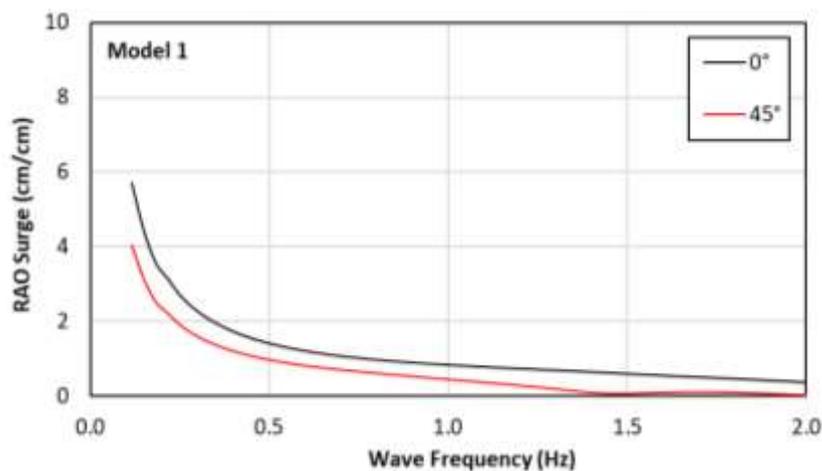
Respons dinamis gerakan heave yang terbesar terjadi pada arah 0° pada frekuensi 1.33 Hz dengan besar 3.28 cm/cm, sehingga pada amplitude gelombang 1 cm dengan frekuensi 1.33 Hz struktur akan mengalami gerakan heave sebesar 3.28 cm. Semakin rendah frekuensi gelombang maka panjang gelombang akan semakin panjang dan gerakan heave akan semakin konstan mendekati 1 cm/cm. Hal ini terjadi karena pada frekuensi gelombang rendah, amplitudo gerakan heave struktur cenderung sebanding dengan amplitudo gelombang.

RAO gerak roll maksimum terjadi pada gelombang dengan frekuensi 1.29 Hz akan menghasilkan amplitude gerak roll sebesar 4.18 cm/cm. Pada frekuensi gelombang rendah, RAO gerak roll akan meningkat secara bertahap dan mencapai puncaknya pada frekuensi tertentu. Namun, pada frekuensi gelombang yang lebih tinggi, RAO gerak roll cenderung menurun. Dari 2 arah datang gelombang, gerakan roll yang signifikan terjadi saat arah 45° , sedangkan pada arah 0° struktur cenderung tidak mengalami gerakan roll. Hal ini dapat terjadi karena saat sudut datang

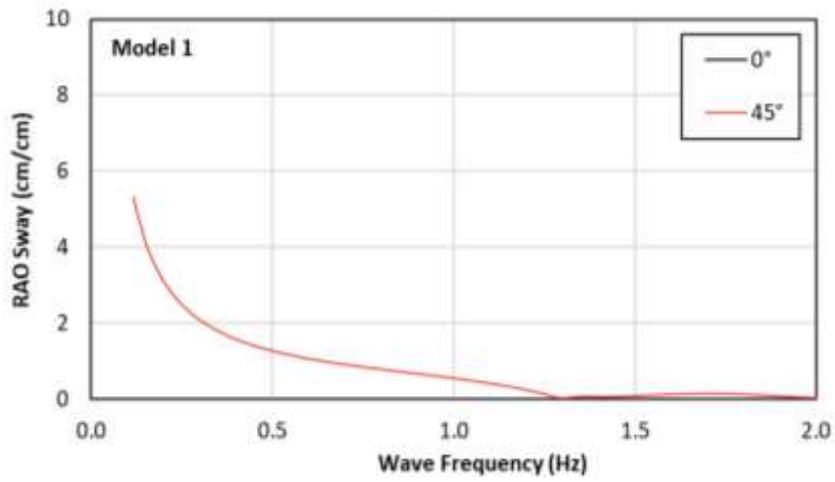
gelombang 45° , interaksi antara gerakan lateral dan gerakan heave dapat menyebabkan gerakan roll maksimum pada struktur.

Untuk gerakan pitch, pada frekuensi 0.18 Hz, struktur mengalami lonjakan gerakan pitch, pada arah 0° terjadi gerak pitch sebesar 15.5 cm/cm. Hal ini berarti saat gelombang datang dengan tinggi 1 cm, arah 0° dan frekuensi rendah 0.18 Hz, gerak pitch yang terjadi pada struktur sebesar 15.5 cm. Lonjakan ini disebabkan karena besar frekuensi alami struktur sama atau mendekati frekuensi gelombang, sehingga menyebabkan resonansi yang berdampak pada kenaikan amplitude gerak yang signifikan. RAO pitch yang paling signifikan terjadi pada arah gelombang 0° dan pada arah gelombang 45° juga terjadi lonjakan pada frekuensi yang sama namun tidak sebesar pada arah 0° .

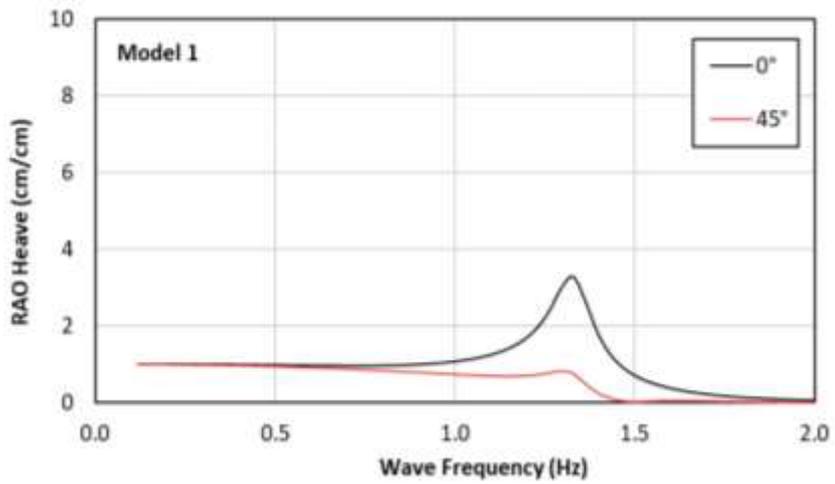
Karakteristik RAO yaw hampir sama dengan gerak roll yaitu pada frekuensi gelombang rendah, RAO yaw meningkat secara bertahap dan mencapai puncaknya pada frekuensi tertentu. Namun, pada frekuensi gelombang yang lebih tinggi, RAO gerak yaw cenderung menurun. Namun amplitude gerak yaw tidak sebesar pada gerak roll.



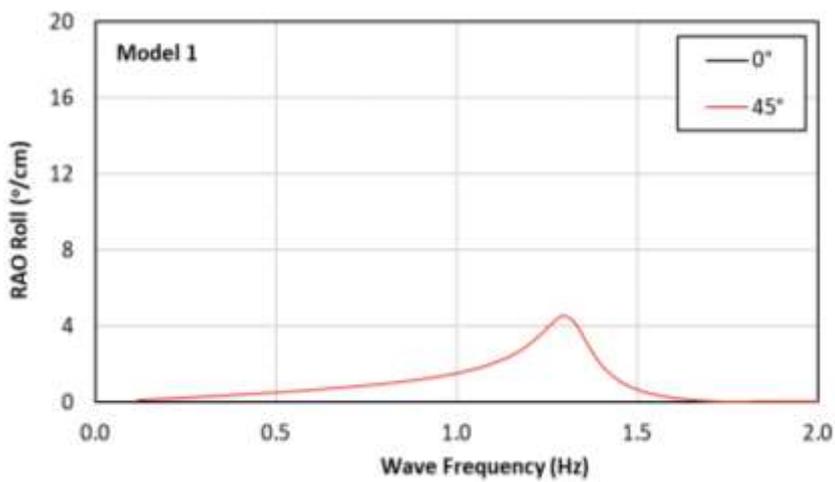
Gambar 5.21 RAO gerakan surge pada model 1 FB



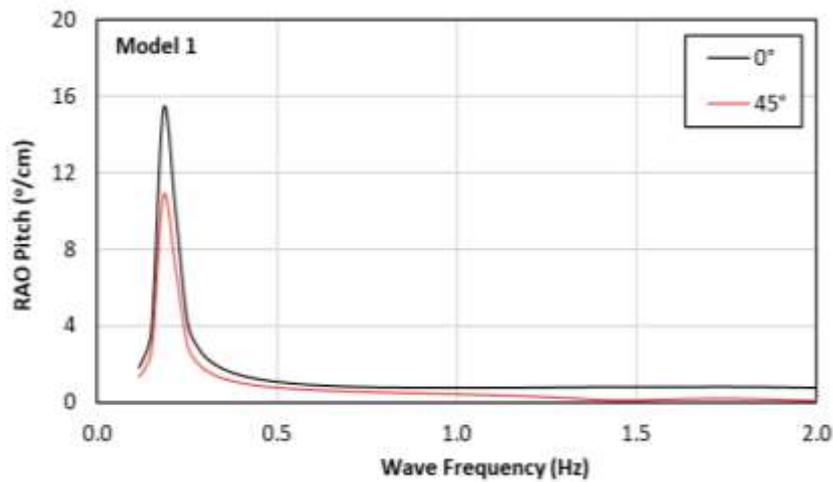
Gambar 5.22 RAO gerakan sway pada model 1 FB



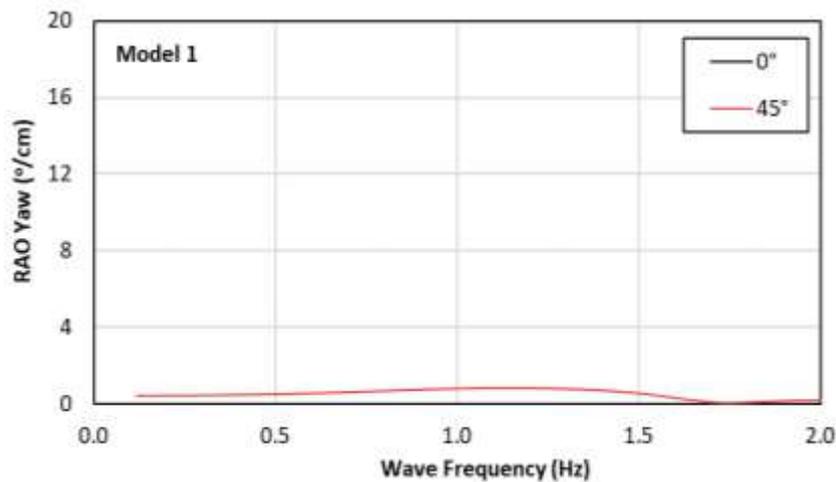
Gambar 5.23 RAO gerakan heave pada model 1 FB



Gambar 5.24 RAO gerakan roll pada model 1 FB



Gambar 5.25 RAO gerakan pitch pada model 1 FB

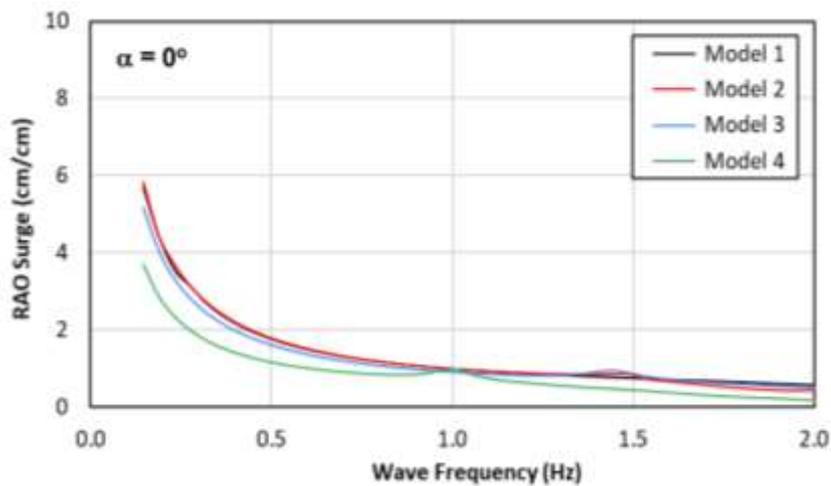


Gambar 5.26 RAO gerakan yaw pada model 1 FB

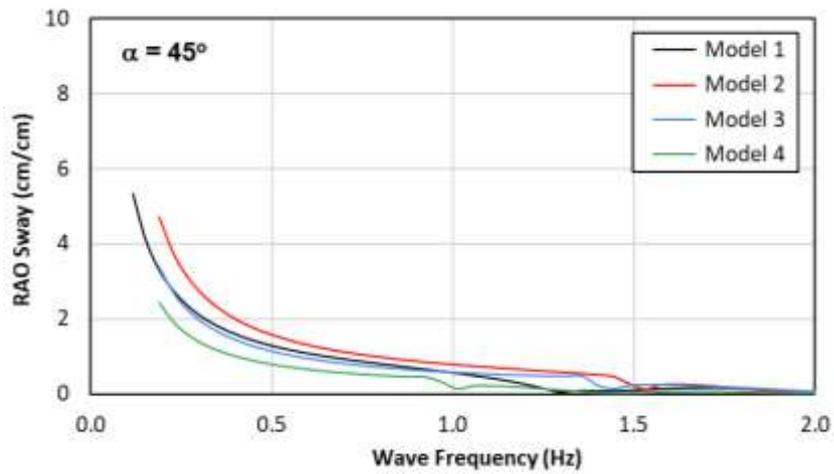
Selanjutnya RAO dari semua model dibandingkan untuk mengetahui pengaruh porositas dan slope terhadap respons gerakan (Gbr. 7.27 - 7.31). Perbandingan dilakukan pada respons gerakan yang terbesar pada arah gelombang datang 0° (surge, heave dan pitch), dan gerakan yaw pada arah gelombang datang 45° . Hasil analisis menunjukkan, bahwa karakteristik RAO surge yaitu amplitud gerak di semua model FB akan meningkat seiring bertambahnya periode gelombang atau pada frekuensi rendah. Gerakan surge terbesar terjadi pada model 1 dan 2, lalu diikuti oleh model 3 dan yang terkecil pada model 4. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar pori maka semakin rendah amplitud gerak surge yang terjadi. RAO sway pada semua model FB akan meningkat seiring

bertambahnya periode gelombang atau pada frekuensi rendah. Gerakan sway terbesar terjadi pada model 1 (pontoon), diikuti dengan model 2, model 3, dan gerak sway terkecil terjadi pada model 4 dengan porositas 10%.

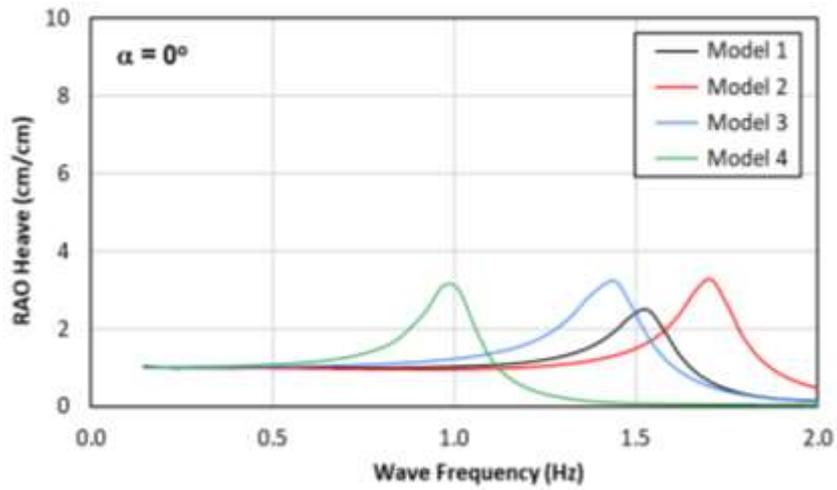
RAO gerakan heave terbesar terjadi pada model 2, lalu model 3, model 4 dan yang terkecil pada model 1. Perbedaan sudut fase yang terjadi pada struktur dapat dipengaruhi oleh karakteristik struktur, seperti kekakuan, peredaman, dan massa, dapat mempengaruhi perubahan fase respons struktur terhadap gelombang insiden. Karakteristik gerak heave di semua model floating breakwater akan konstan mendekati 1 cm/cm pada frekuensi rendah. Sehingga model dengan pori lebih besar memiliki gerak heave lebih kecil dan gerak heave pada model berslope lebih besar dari pada model tanpa slope (pontoon). Fenomena yang sama terjadi pada RAO roll dan pitch, dan pada RAO yaw tidak terlalu signifikan terjadi.



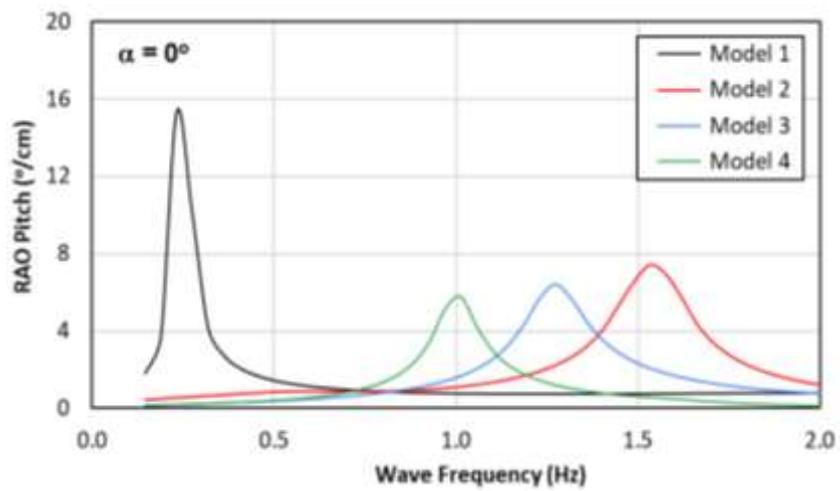
Gambar 5.27 RAO gerakan surge pada berbagai model FB



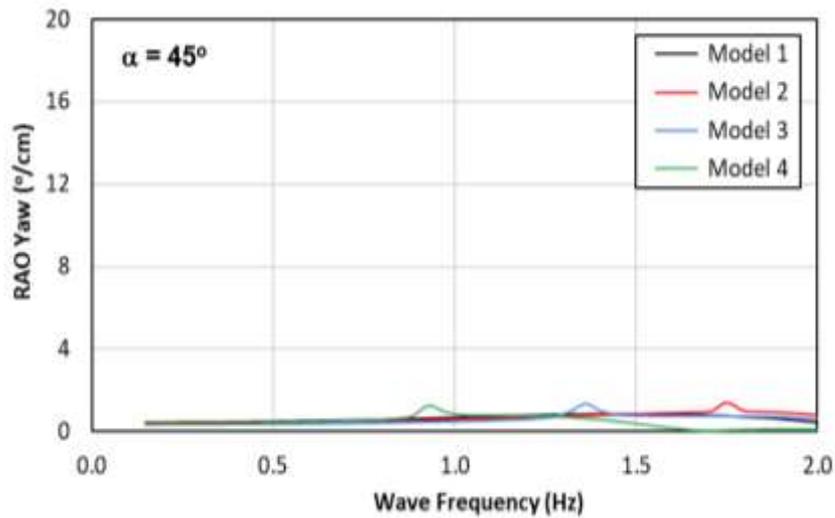
Gambar 5.28 RAO gerakan sway pada berbagai model FB



Gambar 5.29 RAO gerakan heave pada berbagai model FB



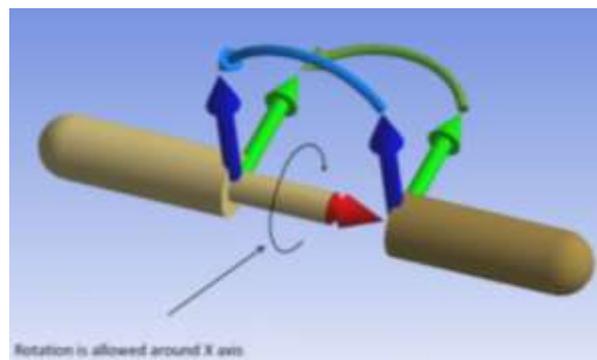
Gambar 5.30 RAO gerakan pitch pada berbagai model FB



Gambar 5.31 RAO gerakan yaw pada berbagai model FB

5.2.2 Pemodelan Floating Breakwater Array

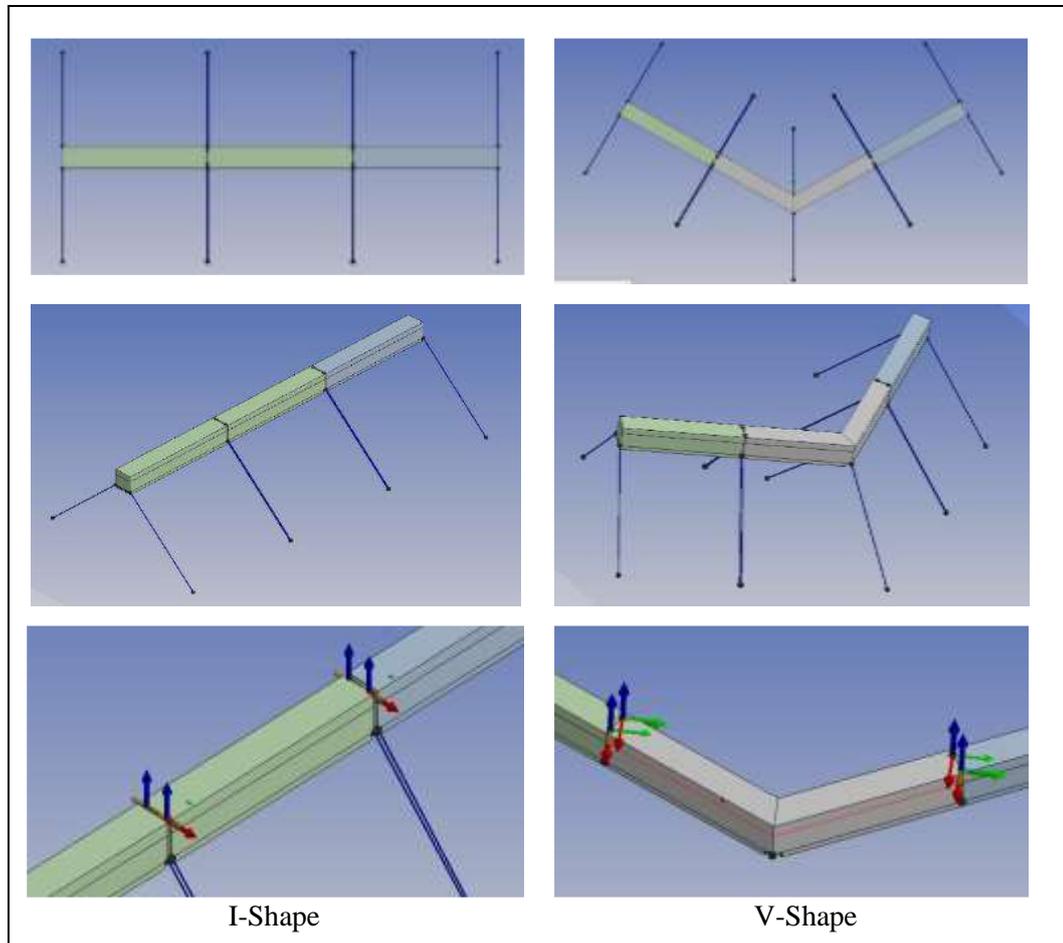
Pada simulasi ini struktur Floating Breakwater Array tersusun dari tiga single-model-1 yang disusun dengan space / jarak tiap body sebesar 1 cm (riil 20cm). Modul FB (model 1) disambungkan oleh connector yang dimodelkan dalam Ansys Aqwa sebagai joint [116]. Pada penelitian ini, tipe dan properties connector mengikuti penelitian Cebada-Relea, et al. [117], yaitu menggunakan hinged joint (Gbr. 5.32). Dengan memiliki dua joint tiap sambungan floating breakwater. Variasi layout array yaitu I-shaped dan V-shaped (Gbr. 5.33).



Gambar 5.32 Hinged joint dalam Ansys Aqwa [116]

Pemodelan Array dengan layout I-shaped dan V-shaped dilakukan pada design modeler pada Ansys Aqwa dengan menggunakan tools “Translate” pada

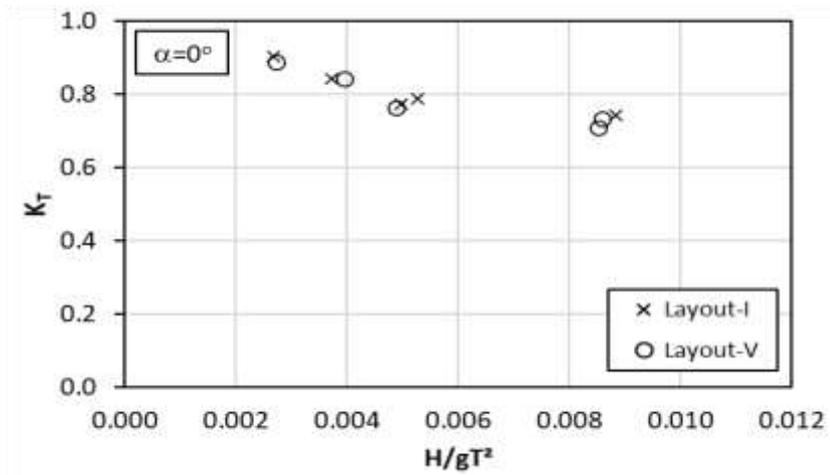
single model FB untuk men-generate model struktur FB kedua dan ketiga. Jarak offset disesuaikan untuk mendapat layout yang sesuai.



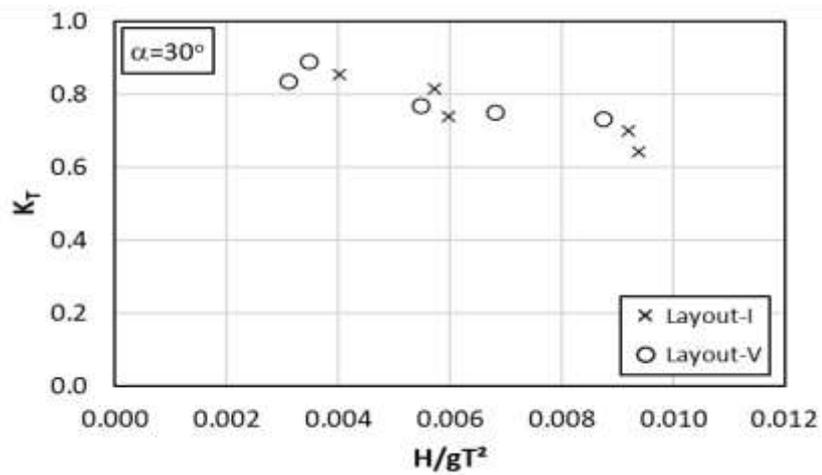
Gambar 5.33 Model connector jenis hinge joint pada I-shape dan V-shape FB

a) Pengaruh FB array layout I-shape dan V-shape pada K_T dan K_R

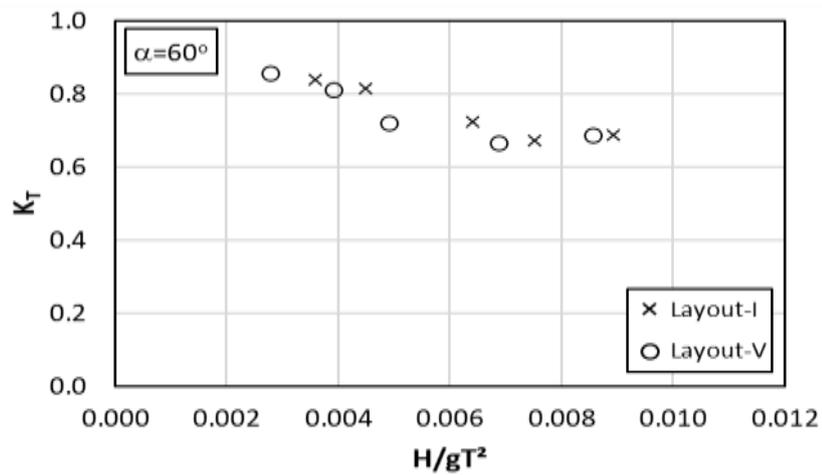
Transmisi dan refleksi gelombang FB array layout I-shape dan V-shape ditunjukkan pada Gbr. 5.34- 5.39. Pengukuran gelombang di lakukan tepat ditengah rangkaian FB array sejauh 150 cm dibelakang struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada arah gelombang datang tegak lurus struktur FB (0°), rata-rata K_T layout V-shape (0.79) dapat meredam gelombang lebih baik dari I-shape (0.81), sebaliknya pada arah gelombang 30° I-shape lebih baik dari V-shape, dan arah gelombang 60° kedua layout I-shape dan V-shape mempunyai kemampuan mereduksi yang sama ($K_T=0.75$). Sedangkan kemampuan struktur dalam merefleksikan gelombang I-shape lebih baik dari V-shape pada semua arah gelombang.



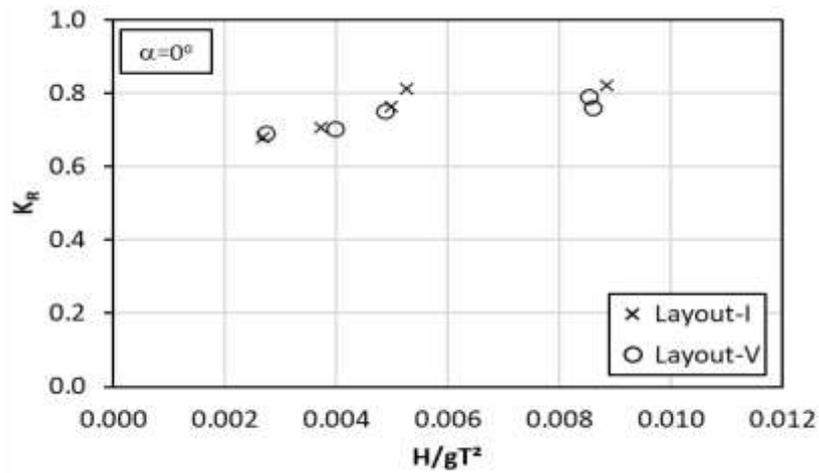
Gambar 5.34 K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 0°



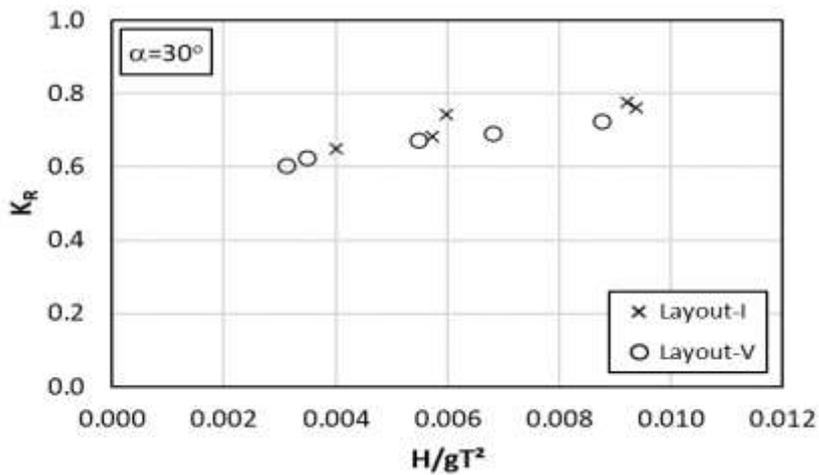
Gambar 5.35 K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 30°



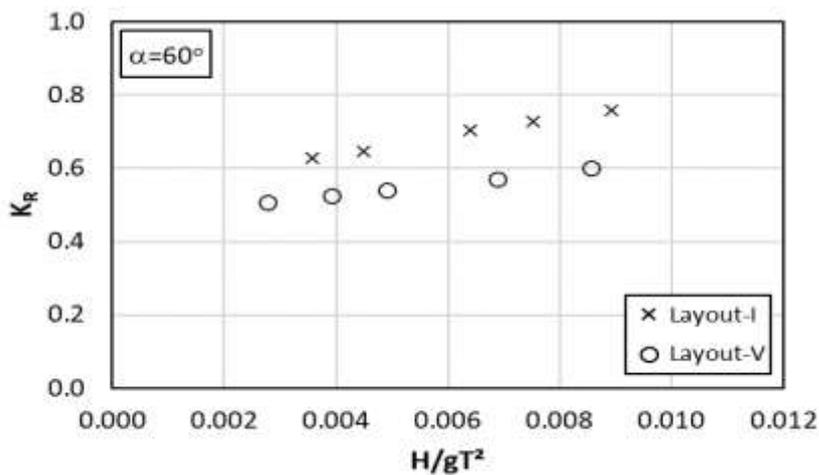
Gambar 5.36 K_T pada FB array dengan arah gelombang datang 60°



Gambar 5.37 K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 0°



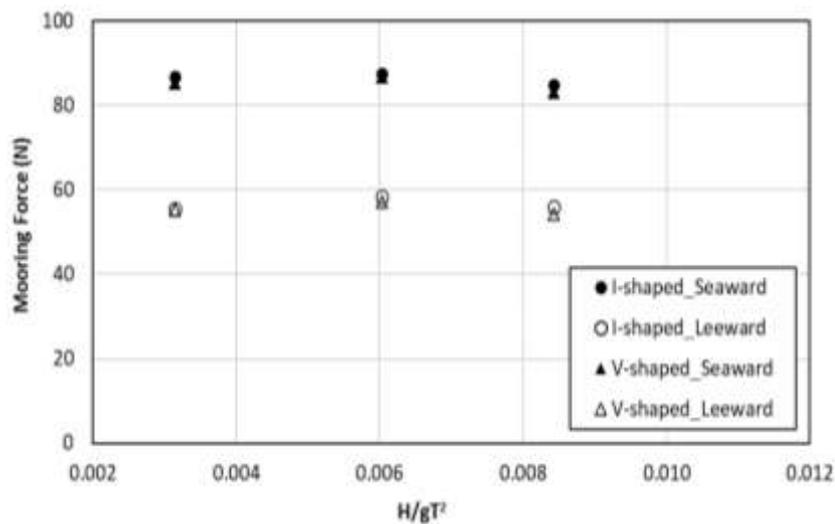
Gambar 5.38 K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 30°



Gambar 5.39 K_R pada FB array dengan arah gelombang datang 60°

b) Analisa Gaya Mooring pada FB array

Simulasi model gaya mooring pada FB array dilakukan pada tinggi gelombang 10 cm dan periode gelombang 1.1, 1.3 dan 1.8 detik. Hasil model numerik ditunjukkan pada Gbr. 5.40. Gaya mooring pada layout I-shaped dan V-shaped cenderung mirip, namun pada layout V-shaped sedikit lebih kecil daripada layout I-shaped. Secara berturut-turut, tegangan maksimum mooring pada layout I-shaped yaitu 87.5 N pada sisi laut (*seaward*) dan 58.5 N pada sisi pantai (*leeward*). Pada V-shaped maksimum sebesar 86.8 N *seaward* dan 57.3 N *leeward* pada gelombang periode 1.3 s. Sehingga model V-shaped akan mengurangi gaya mooring sebesar 0.82% pada *seaward* dan 2.13% pada *leeward* dari pada model I-shaped.



Gambar 5.40 Perbandingan gaya mooring pada layout I-shape dan V-shape

5.3 Kontribusi Keilmuan

Studi ini bermaksud mengusulkan disain pemecah gelombang terapung berpori atau porous floating breakwater (PFB) untuk meredam energi gelombang, yaitu dengan cara merefleksikan gelombang dan mengganggu gerakan partikel gelombang. Fungsi PFB sangat tergantung pada bentuk, dimensi, kondisi permukaan dan konfigurasi disain. Beberapa kontribusi keilmuan berdasarkan disain ini adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi respons dinamis

Proses kerja floating breakwater akan melibatkan difraksi gelombang dimana gelombang yang datang dari semua arah akan pecah ketika menabrak struktur PFB, sehingga struktur akan menyerap energi gelombang difraksi tersebut. Semakin besar energi gelombang yang terserap, akan semakin tinggi pula intensitas olah-gerak struktur tersebut nantinya, karena sebagian besar energi gelombang tersebut akan dikonversi menjadi energi gerak. Besarnya energi yang terserap sangat ditentukan oleh besarnya luasan penampang struktur relatif terhadap arah tegaklurus gelombang datang. Oleh karena itu, desain PFB yang mempunyai penampang dan efek interaksi minimum akan menghasilkan desain dengan respons olah-gerak minimum pula.

2. Menurunkan tegangan mooring.

FB dengan porositas dapat memberikan tegangan mooring yang lebih rendah dibandingkan tanpa porositas —semakin besar porositas, semakin kecil tegangan mooring.

3. Meningkatnya koefisien transmisi dan refleksi

Struktur floating breakwater bentuk slope berpori dapat meningkatkan KT dan KR. Sehingga dalam perencanaan perlu menjadi perhatian yang utama.

4. Mengurangi biaya konstruksi

Struktur PFB dapat diaplikasikan dilingkungan laut yang sesuai, sehingga efektif dan efisien dan dapat menurunkan biaya konstruksi dibandingkan dengan struktur konvensional (fixed). Namun dalam realitanya struktur ini juga memerlukan perawatan rutin agar dapat berfungsi meredam gelombang dengan baik.

4. Meningkatnya pemahaman tentang hidrodinamika struktur terapung

Kemampuan untuk secara akurat memprediksi respons dinamis, transmisi gelombang dan tegangan mooring dapat membantu meningkatkan pemahaman tentang struktur pelindung pantai, dan berdampak penting bagi inovasi lainnya dalam aplikasi praktis di masa mendatang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Desain pemecah gelombang apung berpori atau porous floating breakwater (PFB) telah berhasil dirancang dan dilakukan uji model fisik dan numerik dalam penelitian ini. Hasil utama dari penelitian ini dirangkum sebagai berikut.

6.1.1 Kinerja Hidrodinamika FB

a) Secara umum, K_T secara bertahap menurun dengan meningkatnya parameter gelombang. Hal ini mengindikasikan bahwa redaman gelombang pada FB bekerja sedikit lebih baik saat bekerja pada gelombang yang lebih curam. Pada kondisi parameter gelombang rendah, K_T lebih tinggi dibandingkan dengan parameter gelombang tinggi. Selain itu, nilai K_T terbaik ditemukan pada slope 60° dan porositas 5%, karena struktur berbentuk pori telah menyebabkan disipasi gelombang yang besar.

b) Slope menyebabkan peningkatan nilai K_T dan K_R rata-rata sebesar 3.85% dan 21.67% untuk FB tanpa porositas. Pada porositas 5%, terjadi peningkatan K_T sebesar 4.25% dan K_R sebesar 27.22% untuk perubahan slope dari 45° ke 60° . Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar slope maka semakin besar nilai kedua koefisien hidrodinamika tersebut. Di sisi lain, slope juga berpengaruh pada K_T dan K_R . FB dengan porositas 5% menyebabkan peningkatan K_T sebesar 2.38% pada slope 45° dan 2.78% pada slope 60° dan menurunkan K_R masing-masing sebesar 9.5% dan 13.4% untuk slope 45° dan 60° .

c) Perubahan sudut mooring menyebabkan perubahan K_T dan K_R , semakin tegak suatu sudut mooring maka K_T dan K_R akan semakin tinggi. Hal tersebut dapat terjadi karena floating breakwater lebih leluasa bergerak, dan adanya efek tarikan dari mooring line pada sudut 90° yang menyebabkan K_T menjadi lebih tinggi.

d) Perubahan elevasi muka air akibat pasang surut, K_T akan mampu meredam gelombang baik pada saat pasang, sebaliknya K_R akan semakin tinggi. Pada saat

surut kemampuan struktur meredam gelombang menjadi berkurang, karena posisi tali tambat akan kendur dan menyebabkan FB lebih bebas bergerak. Fenomena pasang surut harus menjadi perhatian ketika merancang struktur ini.

6.1.2 Tegangan Mooring FB

a) Semakin curam kecuraman gelombang, semakin besar tegangan maksimum yang diterima sistem tambat untuk setiap model. Tegangan mooring pada posisi *seaward* selalu lebih besar daripada pada posisi *leeward*. Karena sisi arah laut akan menerima gaya gelombang terlebih dahulu, dan mooring line sisi *seaward* akan meredam gaya gelombang terlebih dahulu, sehingga pada sisi *leeward* menjadi lebih kecil tegangan mooring nya.

b) Ponton (model 1) memiliki tegangan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan keempat model lainnya. Karena dalam bentuk ponton, struktur akan menerima gaya gelombang pada permukaan yang tegak lurus dengan arah datangnya gelombang sehingga tegangan mooring yang diterima tali tambat akan cukup besar. Pada model 2 - 5, permukaan FB mempunyai slope (45° dan 60°) dan porous (model 3 dan 5) untuk mengurangi beban gelombang yang diterima struktur. Terjadi penurunan tegangan mooring sebesar 19.4% pada model 2, 31.3% pada model 3, 25.7% pada model 4, dan 34% pada model 5 terhadap model 1. Demikian pula, FB pada sisi *leeward* memiliki perilaku yang sama dengan *seaward*. Pada sisi *leeward*, terjadi penurunan tegangan mooring pada model 2 sebesar 15.4%, model 3 sebesar 38.5%, model 4 sebesar 32.3%, dan model 5 sebesar 47.7% terhadap model 1.

c) FB dengan porositas 5% dapat memberikan tegangan mooring yang lebih rendah dibandingkan tanpa porositas (0%)—semakin besar porositas, semakin kecil tegangan mooring. FB dengan porositas 5% mampu mereduksi tegangan mooring sebesar 16.8% (45°) dan 13.4% (60°). Sedangkan pada slope 45 deg, tegangan mooring yang diterima oleh FB akan meningkat masing-masing sebesar 8.5% dan 5.3% pada porositas 0% dan 5%.

6.1.3 Kinerja Hidrodinamika pada Berbagai Layout FB

a) Respons dinamis gerak FB

- Arah gelombang datang sangat berpengaruh terhadap respons gerak FB. Pada arah gelombang tegak lurus struktur (0°), RAO FB akan yang berpengaruh adalah gerakan surge, heave dan pitch, sedangkan gerakan yang lain tidak cukup signifikan berpengaruh terhadap kinerja FB. Pada arah gelombang datang 45° , RAO gerakan yaw harus diperhatikan.

- Porositas pada FB dapat menurunkan respons gerak translasi dan rotasi.

b) K_T dan K_R pada layout I-shape dan V-shape

Pada arah gelombang datang tegak lurus struktur FB (0°), rata-rata K_T layout V-shape (0.79) dapat meredam gelombang lebih baik dari I-shape (0.81), sebaliknya pada arah gelombang 30° lebih baik dari V-shape, dan arah gelombang 60° kedua layout I-shape dan V-shape mempunyai kemampuan mereduksi yang sama ($K_T=0.75$). Sedangkan kemampuan struktur dalam merefleksi gelombang I-shape lebih baik dari V-shape pada semua arah gelombang.

c) Mooring tension pada FB array

- Tegangan mooring pada layout V-shaped sedikit lebih kecil daripada layout I-shaped.

- Layout V-shaped akan mengurangi tegangan mooring sebesar 0.82% pada seaward dan 2.13% pada leeward dari model I-shaped.

6.2 Saran

a). Untuk mendapat hasil uji model fisik yang baik, pengukuran refleksi gelombang pada metode Goda dan Suzuki, jarak antar probe gelombang yang merekam data elevasi muka air akibat pantulan dari struktur harus diubah setiap periode yang berbeda, sehingga dapat menghasilkan koefisien refleksi yang baik.

b). Uji model fisik pada penelitian ini, perlu dilakukan uji model fisik tentang respons gerak struktur floating breakwater, variasi arah gelombang datang, dan variasi kedalaman wave flume.

- c). Dampak *marine growth* perlu dipertimbangkan dalam penelitian, karena akan mengurangi fungsi porositas dan menambah beban tegangan mooring.
- d). Efektitas lebar floating breakwater perlu dilakukan kajian, terutama untuk mengantisipasi gelombang panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Roose, J., 2016. *Development of an Excel-based calculation tool to assess the hydraulic performance of rubble mound breakwaters and vertical seawalls*. Master Thesis. Ghent University.
- [2] Fousert, M. W., 2006. *Floating breakwater: A theoretical study of a dynamic wave attenuating system*. Master thesis. The Delft University of Technology.
- [3] Morey, B. J., 1998. *Floating breakwaters predicting their performance*. Master thesis. Memorial University of Newfoundland, Canada.
- [4] McCartney, B. L., 1985. Floating breakwater design. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111 (2), pp. 304-318.
- [5] Hales, L. Z. (1981), *Floating Breakwater: State of the art Literature Review*. Technical Report No. 81-1. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir.
- [6] Falbr, J., 2016. Floating breakwater in Monaco. Accessed October 19, 2023. Available: <https://www.fdn-engineering.nl/floating-breakwater-in-monaco>.
- [7] Falbr, J., 2016. Floating breakwater in Messolonghi, Greece. Accessed October 19, 2023. Available: <https://www.fdn-engineering.nl/floating-breakwater-in-messolonghi>.
- [8] Nece, R. E. and Richey, E. P., 1972. *Wave transmission tests of floating breakwater for Oak harbour*. Water Resources Series Tech. Report 32, Dep. of Civil and Environment Engineering, Univ. of Washington.
- [9] Ruol, P., 1984. Floating breakwaters in small basins. *International Symposium. on Maritime Structures in the Mediterranean Sea*.
- [10] Blumberg, G., and Cox, R., 1988. *Floating breakwater physical model testing for marina applications*. Bulletin 63, PIANC – AIPCN.
- [11] Neelamani, S. and Rajendran, R., 2002. Wave interaction with t-type breakwaters. *Ocean Engineering*, 29 (2), pp. 151–175.
- [12] Dong, G. H., Zheng, Y. N., Li, Y. C., Teng, B., Guan, C. T. dan Lin, D. F., 2008. Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 35, pp. 931-938.

- [13] Koutandos, E., Prinos, P., and Gironella, X., 2005. Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43 (2), pp. 174–188.
- [14] Fugazza, M. and Natale, L., 1988. Energy losses and floating breakwater response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 114 (2), pp. 191–205.
- [15] Sannasiraj, S., Sundar, V. and Sundaravadivelu, R. 1998. Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 25 (1), pp. 27–48.
- [16] Rahman, M. A., Mizutani, N. and Kawasaki, K., 2006. Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater. *Coastal Engineering*, 53 (10), pp. 799-815.
- [17] Gesraha, M. R., 2006. Analysis of II-shaped floating breakwater in oblique waves. *Appl. Ocean Res*, 28 (5), pp. 327-338.
- [18] Cox, R., Coghlan, I. and Kerry, C., 2007. Floating breakwater performance in irregular waves with particular emphasis on wave transmission and reflection, energy dissipation, motion, and restraining forces. *International Conference on Coastal Structures*, 1, pp. 351–362.
- [19] Ruol, P. and Martinelli, L., 2007. Wave flume investigation on different mooring systems for floating breakwaters. *International Conference on Coastal Structures*, 1, pp. 327–33.
- [20] Martinelli, L., Ruol, P. and Zanuttigh, B., 2008. Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. *Applied Ocean Research*, 30 (3), pp. 199–207.
- [21] Jung, K. H., Chang, K. A. and Huang, E., 2004. Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a fixed rectangular structure. *Ocean Engineering*, 31, pp. 975–998.
- [22] Jung, K. H., Chang, K. A. and Huang, E., 2005. Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a free-rolling rectangular structure. *Ocean Engineering*, 32, pp. 1–20.

- [23] Koftis, T. and Prinos, P., 2011. Floating breakwaters: Parametric analysis and functional design. *Proceedings 5th Pan-Hellenic Conference for Coastal Zone Management and Improvement NTUA*.
- [24] Ruol, P., Martinelli, L. and Pezzutto, P., 2012. Experimental and numerical investigation of the effect of mooring stiffness on the behaviour of π -type floating breakwaters. *The Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*. pp. 1301–1308.
- [25] Abdolali, A., Franco, L. Bellotti, G. and Kolahdoozan, M., 2012. Hydraulic and numerical modeling of the performance of Π -type floating breakwaters. *The 10th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2012) Tehran, Iran, 19-21 Nov*.
- [26] Ruol, P., Martinelli, L. and Pezzutto, P., 2013. A formula to predict transmission for π -type floating breakwaters. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-Asce*, 139 (1), pp. 1–8.
- [27] Lee, C. P. and Ker, W. K., 1997. Interaction of waves and a porous tension leg platform with an impermeable top layer. *Proceedings Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA*, pp. 207-214.
- [28] Williams, A. N. and Li, W., 1998. Wave interaction with a semi-porous cylindrical breakwater mounted on a storage tank. *Ocean Engineering*, 25, pp.195-219.
- [29] Wang, H. Y. and Sun, Z. C., 2010. Experimental study on the influence of geometrical configuration of the porous floating breakwater on performance. *Journal of Marine Science and Technology*, 18 (4), pp. 574-579.
- [30] Wang, H. Y. and Sun, Z. C., 2010. Experimental study of a porous floating breakwater. *Ocean Engineering*, 37, pp. 520-527.
- [31] Stiassnie, M. and Drimer, N., 2003. On a freely floating porous box in shallow water waves. *Applied of Ocean Research*, 25, pp. 263-268.
- [32] Koutandos, E. V. and Prinos, P.E., 2011. Hydrodynamic characteristics of semi-immersed breakwater with an attached porous plate. *Ocean Engineering*, 38, pp. 34-48.

- [33] Zheng, Y. N., Liu, X. M., Chen, C. P., Jiang, Y. P. and Zhang, C. W., 2018. Experimental study on the wave dissipation performance and mooring force of porous floating breakwater. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 189.
- [34] Chwang, A. T., 1983. A porous wavemaker theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 132, pp. 395-406.
- [35] Chwang, A. T. and Li, W., 1983. A piston-type porous wavemaker theory. *Journal of Engineering Mathematics*, 17, pp. 301-313.
- [36] Chwang, A. T. and Dong, Z. N., 1984. Wave-trapping due to a porous plate. *Proceedings Fifteenth ONR Symposium of Naval Hydrodynamics*, pp. 407-414.
- [37] Twu, S. W. and Lin, D. T., 1991. On a highly effective wave absorber. *Coastal Engineering*, 15, 389-405.
- [38] Wang, K. H. and Ren, X., 1993. Water waves on flexible and porous breakwaters. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 119, pp.1025-1047.
- [39] Cho, I-H., 2016. Transmission coefficients of a floating rectangular breakwater with porous side plates. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8, pp. 53-65.
- [40] Fang, Z., Xiao, L., Kou, Y. and Li, J., 2018. Experimental study of the wave-dissipating performance of a four-layer horizontal porous-plate breakwater. *Ocean Engineering*, 151, pp. 222-233.
- [41] Williams, A. N, Li, W. and Wang, K. H., 2000. Water wave interaction with a floating porous cylinder. *Ocean Engineering*, 27, pp. 1-28.
- [42] Zhao, F., Bao, W. ,Kinoshita, T.. and Itakura, H., 2010. Interaction of waves and a porous cylinder with an inner horizontal porous plate. *Applied Ocean Research*, 32, pp. 252-259.
- [43] Shih, R-S., 2012. Experimental study on the performance characteristics of porous perpendicular pipe breakwaters. *Ocean Engineering*, 50, pp. 53-62.
- [44] Jones, D. B., 1971. *Transportable breakwaters - a survey of concepts*. Technical Report R- 727. U.S. Navy Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme.

- [45] Richey, E. P. and Nece, R. E., 1974. Floating breakwaters: state of the art. *Proceedings of the Floating Breakwaters Conference. University of Rhode Island, Kingston*, pp. 1-20.
- [46] Adee, B. H., Richey, E. P. and Christensen, D. R., 1976. *Floating breakwater field assessment program, Friday Harbor, Washington*. Technical Report 76-17. U.S. Army, Corps of Engineers, CERC, Fort Belvoir.
- [47] PIANC, 1994. *Floating Breakwaters: a practical guide for design and construction*. Report of working group no.13 of the permanent technical committee II. Bulletin no.85.
- [48] Sawaragi, T., 1995. *Coastal engineering: waves, beaches, wave-structure interactions*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- [49] Dai, J., Wang, C. M., Utsunomiya, T. and Duan, W., 2018. Review of recent research and developments on floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 158, pp.132–151.
- [50] Ofuya, A. O., 1968. *On floating breakwaters*. Research Report No. CE-60. Queen's University, Kingston.
- [51] Carver, R. D., 1979. *Floating breakwater wave attenuation test for East Bay Marina Olympia Harbour, Washington. Hydraulics model investigation*. Technical Report HL-79-13, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Miss. 39180.
- [52] Bottin, R. R. and Turner, K. A., 1980. *Seabrook Lock Complex. Lake Pontchartrain, La. Design for wave protection at Lock Entrance. Hydraulic model investigation*. Technical Report HL-80-7. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station Hydraulic Laboratory. New Orleans.
- [53] Adee, B. H., 1976. Floating breakwater performance. *Proceedings of the 15th Conference on Coastal Engineering, ASCE*, 3, pp. 2777-2791.
- [54] Drimer, N., Agnon, Y. and Stiassnie, M., 1992. A simplified analytical model for a floating breakwater in water of finite depth. *Applied Ocean Research*, 14, pp. 33-41.
- [55] Davidson, D. D., 1971. *Wave transmission and mooring force tests of floating breakwater, Oak Harbor, Washington*. Technical Report H-71-73. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

- [56] Diamantoulaki, I. and Angelides, D. C., 2010. Analysis of performance of hinged floating breakwaters. *Engineering Structure*, 32, pp. 2407-2423.
- [57] Elchahal, G., Younes, R. and Lafon, P., 2009. Parametrical and motion analysis of a moored rectangular floating breakwater. *Journal of Offshore Mech. Arch. Engineering*, 131, pp.031303.
- [58] Diamantoulaki, I., Angelides, D. C. and Manolis, G. D., 2008. Performance of pile-restrained flexible floating breakwaters. *Applied Ocean Research*, 30, pp. 243-255.
- [59] Tay, Z. Y., Wang, C. M. and Utsunomiya, T., 2009. Hydroelastic responses and interactions of floating fuel storage modules placed side-by-side with floating breakwaters. *Marine Structure*, 22, pp. 633-658.
- [60] Hong, S. Y., Choi, Y. R. and Hong, S. W., 2002. Analysis of hydro-elastic response of pontoon type VLFS coupled with floating breakwaters using a higher-order boundary element method. *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu*, pp. 313-318.
- [61] Wang, C. M., Tay, Z. Y., Takagi, K. and Utsunomiya, T., 2010. Literature review of methods for mitigating hydroelastic response of VLFS under wave action. *Applied Mechanical*, 63, 030802.
- [62] Williams, A.N., Lee, H.S. and Huang, Z., 2000. Floating pontoon breakwaters. *Ocean Engineering*, 27, pp. 221-240.
- [63] Loukogeorgaki, E., Yagci, O. and Kabdasli, M. S., 2014. 3D experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules. *Coastal Engineering*, 91, pp. 164-180.
- [64] Williams, A. N. and Abul-Azm, A. G., 1997. Dual pontoon floating breakwater. *Ocean Engineering*, 24 (5), pp. 465-478.
- [65] Ikeno, M., Shimoda, N. dan Iwata, K., 1988. A new type of breakwater utilizing air compressibility. *Proceedings of the 21st Coastal Engineering Conference, ASCE*, pp. 2426-2339.
- [66] Weng, W. K. and Chou, C. R., 2007. Analysis of responses of floating dual pontoon structure. *China Ocean. Engineering*, 21 (1), pp. 91-104.

- [67] Koo, W., 2009. Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater. *Ocean Engineering*, 36, pp.723–731.
- [68] Ji, C. Y., Chen, X., Cui, J., Yuan, Z. M. and Ma, X. J., 2016. 3D experimental study on a cylindrical floating breakwater system. *Ocean. Engineering*, 125, pp. 38-50.
- [69] Ji, C. Y., Chen, X., Cui, J., Yuan, Z. M. and Incecik, A., 2015. Experimental study of a new type of floating breakwater. *Ocean Engineering*, 105, pp. 295-303.
- [70] Merlevede, K., 2012. *Study of the functional design of a floating offshore breakwater*. Master Thesis. Ghent University.
- [71] Allyn, N., Watchorn, N., Jamieson, W. W. and Yang, G., 2001. Port of Brownsville floating breakwater. *Ports Conference April 29 - May 2, Norfolk, Virginia, United States*.
- [72] Mani, J. S., 2014. Design of Y-frame floating breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117 (2), pp.105-119.
- [73] Murali, K. and Mani, J. S., 1997. Performance of cage floating breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 123 (4), pp. 172-179.
- [74] Uzaki, K.-I., Ikehata, Y. and Matsunaga, N., 2011. Performance of the wave energy dissipation of a floating breakwater with truss structures and the quantification of transmission coefficients. *Journal Coastal Research*, 27 (4), pp. 687-697.
- [75] Kamel, A. M. and Davidson, D. D., 1968. *Hydraulic characteristics of mobile breakwaters composed of tires or spheres*. Technical Report H-68-2. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- [76] Hegde, A. V., Kamath, K. and Magadum, A. S., 2007. Performance characteristics of horizontal interlaced multilayer moored floating pipe breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133 (4), pp. 275-285.
- [77] Patil, S. G., Mandal, S., Hedge, A. V. and Alavandar, S., 2011. Neuro-fuzzy-based approach for wave transmission prediction of horizontally interlaced

multilayer moored floating pipe breakwater. *Ocean Engineering*, 38, pp.186-196.

- [78] Patil, S. G., Mandal, S. and Hedge, A. V., 2012. Genetic algorithm-based support vector machine regression in predicting wave transmission of horizontally interlaced multilayer moored floating pipe breakwater. *Advanced Engineering Software*, 45, 203-212.
- [79] Loukogeorgaki, E., Michailides, C. and Angelides, D. C., 2012. Hydroelastic analysis of a flexible mat-shaped floating breakwater under oblique wave action. *Journal of Fluid-Structure*, 31, pp. 103-124.
- [80] Jones, D. B., 1978. *An Assessment of transportable breakwaters with reference to the container off-loading and transfer system (COTS)*. Technical Note No. N-1529, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center.
- [81] Seymour, R. J. and Hanes, D. M., 1979. Performance analysis of tethered float breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 105, pp. 265-280.
- [82] Liu, F. C., 1973. *Snap loads in lifting and mooring cable systems induced by surface wave conditions*. Report number TN-1288, Naval Civil Engineering Laboratory Port Hueneme, CA 93043
- [83] Papazoglou, V. J., Mavrakos, S. A. and Triantafyllou, M. S., 1990. Nonlinear cable response and model testing in water. *Journal Sound Vibration*, 140, pp. 103–115.
- [84] Shugan, I. V., Hwung, H.-H., Yang, R.-Y. and Hsu, W.-Y., 2012. Elastic plate as floating wave breaker in a beach zone. *Phys. Wave Phenom*, 20 (3), pp. 199–203.
- [85] Koley, S. and Sahoo, T., 2017. Oblique wave scattering by a horizontal floating flexible porous membrane. *Meccanica*, 52, pp. 125–138.
- [86] Cheong, H. F. and Patarapanich, M., 1992. Reflection and transmission of random waves by a horizontal double-plate breakwater. *Coastal Engineering*, 18, pp. 63–82.

- [87] Wang, K. H. and Shen, Q., 1999. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. *International Journal of Engineering Science*, 27, pp. 703-715.
- [88] Usha, R. and Gayathri, T., 2005. Wave motion over a twin-plate breakwater. *Ocean Engineering*, 32, pp. 1054-1072.
- [89] Liu, Y., Li, Y. C. and Teng, B., 2009. Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates. *Journal of Hydrodynamics*, 21 (4), pp. 453-462.
- [90] Lo, H. -Y. and Liu, P. L. F., 2014. Solitary waves incident on a submerged horizontal plate. *Journal of Waterway, Port, Coastal Ocean Engineering*, 140 (3), 04014009.
- [91] Williams, A. N., Geiger, P. T. and McDougal, W. G., 1991. Flexible floating breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 117 (5), pp. 429-450.
- [92] Wang, K. H. and Ren, 1993. An effective wave-trapping system. *Ocean Engineering*, 21, pp. 155-178.
- [93] Ren, X. and Wang, K. H., 1994. Mooring lines connected to floating porous breakwaters. *International Journal Eng Science*, 32 (10), pp. 1511-1530.
- [94] Yu, X. and Chwang, A. T., 1994. Water waves above a submerged porous plate. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 120, pp. 1270-1282.
- [95] Darwiche, M. K. D., Williams, A. N. and Wang, K. H., 1994. Wave interaction with a semi-porous cylindrical breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 120, pp. 382-403.
- [96] Ippen, A. T., 1966. *Estuary and coastline hydrodynamics*, McGraw-Hill Book Company.
- [97] CERC, 2006. *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- [98] Dean, G. D. and Dalrymple, R. A., 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific.
- [99] Ozeren, Y., 2009. *Experimental and numerical investigations of floating breakwater performance*. Thesis Doctor of Philosophy, The University of Mississippi.

- [100] Goda, Y. and Suzuki, Y., 1976. Estimation of the incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 828-845.
- [101] Das, S. N and Das, S. K., 2005. Mathematical model for coupled roll and yaw motions of a floating body in regular waves under resonant and non-resonant conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 29, pp. 19–34.
- [102] Faltinsen, O. M., 1990, *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge, University of Cambridge.
- [103] Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981. *Mechanics of wave forces on offshore structures*. New York: Cambridge University Press.
- [104] Chakrabarti, S. K., 1994. *Hydrodynamics of offshore structure*. Dorchester, Computational Mechanics Publications
- [105] Djatmiko, E. B., 2012. *Perilaku dan operabilitas bangunan laut di atas gelombang acak*. Surabaya: ITS Press.
- [106] Shanying, L., Liping, S., Shiguang, Z., Heming, J., and Yunlong, G., 2013. The comparison and analysis between catenary mooring system and taut mooring system of FPSO. *Advances in information Sciences and Service Sciences(AISS)*, 4 (4), pp. 728-736.
- [107] Hughes, S. A., 2008. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, Advance Series on Ocean Engineering 7, World Scientific, Singapore.
- [108] Briggs, M. J., 2013. *Basics of physical modeling in coastal and hydraulic engineering*. Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-XIII-3.
- [109] Munson, B. R., Young, D. F and Okiishi, H. T., 1990. *Fundamentals of fluid mechanics*, John Wiley & Son, Inc.
- [110] Warnock, J. E., 1950. Hydraulic similitude, *engineering hydraulics*. H. Rouse, ed, 136-176. New York: John Wiley & Sons.
- [111] Chakrabarti, S. K., 1994. *Offshore structure modelling*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd
- [112] Flow Science, 2014. *Flow-3D Documentation Release 11.0.0*. Flow Science, inc. <https://www.flow3d.com>.

- [113] Faltinsen, O. M., 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. United Kingdom, Cambridge University Press
- [114] Ji, C.-y., Chen, X., Ma, X.-j. & Yuan, Z., 2018. The influence of perforated plates on wave transmission and hydrodynamic performance of pontoon floating breakwater. *Journal of Hydrodynamics*, pp. 522-530.
- [115] Mansard, E. P. D. and Funke, E. R., 1980. The Measurement of Incident and Reflected Spectra using a Least Squares Method. *Coastal Engineering*, 154-172.
- [116] Ansys, 2016. *Aqwa Users Manual Release 16.0*. Ansys. Inc. USA
- [117] Cebada-Relea, A., Lopez, M. & Aenlle, M., 2022. Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves. *Journal of Ocean Engineering*, Issue 243, pp. 1-12.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Analisis Statistik Koefisien Transmisi (K_T)

Model Numerik dan Eksperimen

Model 1

Pengolahan data untuk kepentingan analisis statistic dilakukan dengan software Minitab, meliputi beberapa analisis sebagai berikut:

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen,

didapatkan koefisien korelasi dengan hasil sbb :

```
Correlations: Numeric, Experiment
Pearson correlation of Numeric and Experiment = 0.860
P-Value = 0.000
```

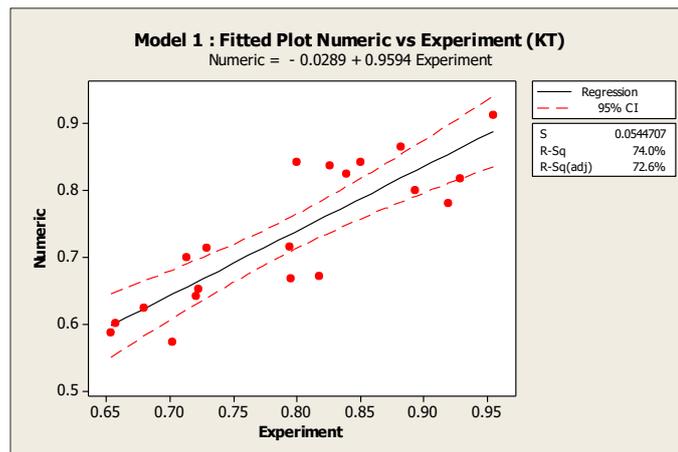
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eskperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi sebesar + 0.86, artinya model Numerik menghasilkan nilai yang sejalan dengan Eksperimen. Ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Scatterplot Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi :

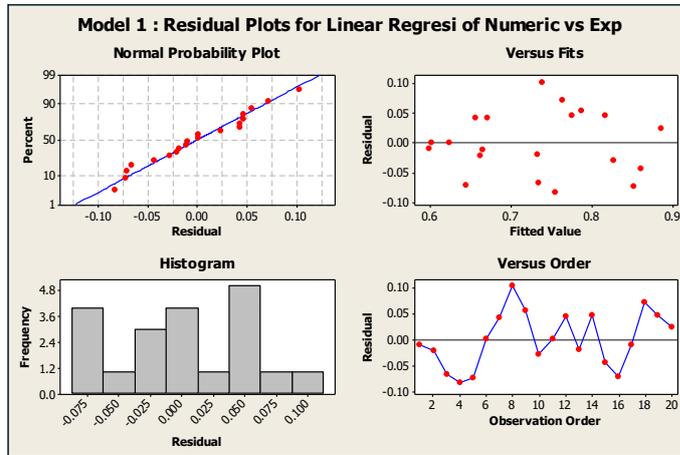
```
Regression Analysis: Numeric versus Experiment
The regression equation is
Numeric = - 0.0289 + 0.9594 Experiment
S = 0.0544707  R-Sq = 74.0%  R-Sq(adj) = 72.6%
```

Adapun gambar garis regresi adalah :



Dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 72,6%, artinya kemampuan garis regresi untuk mewakili variansi data dan memprediksi data sebesar 72,6%. Hal ini juga menunjukkan kemampuan model Numerik untuk memodelkan eksperimen.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi adalah :



Dapat dilihat bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik.

3. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen :

Two-Sample T-Test and CI: N, F

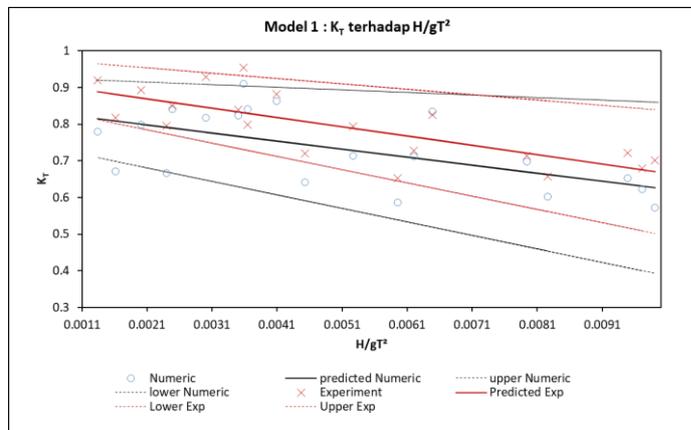
Two-sample T for N vs F

	N	Mean	StDev	SE Mean
N	20	0.733	0.104	0.023
F	20	0.7938	0.0933	0.021

Difference = $\mu(N) - \mu(F)$
 Estimate for difference: -0.0611
 95% CI for difference: (-0.1244, 0.0022)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.95 P-Value = 0.058 DF = 37

Nilai p-value = 0,058 (atau 5,8%) jika dibandingkan dengan significance level 0.05 (atau 5%), maka Terima H_0 ($\mu_N - \mu_E=0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa model Numerik dan Eksperimen **tidak berbeda secara statistik**.

4. **Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing dengan model Linear dan Eksperimen**



Berikut beberapa keterangan terkait garis regresi Numerik dan Eksperimen :

SUMMARY OUTPUT		
<i>Regression Statistics</i>	<i>Numeric</i>	<i>Experiment</i>
Multiple R	0.631205231	0.759225764
R Square	0.398420044	0.57642376
Adjusted R Square	0.364998935	0.552891747
Standard Error	0.067078356	0.062400985
Observations	20	20

<i>Numeric</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.843854728	0.040862941	20.6508566	5.54E-14	0.758004876	0.929704581
X Variable	-21.91258355	7.097566799	-3.087337417	0.006353	-36.82401807	-7.00114903

<i>Experiment</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.92242688	0.029498621	31.27016907	3.85E-17	0.860452576	0.984401184
X Variable	-25.35846646	5.123675208	-4.94927282	0.000104	-36.12290863	-14.59402428

Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numerik (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

Untuk Model 2, 3, 4, dan 5 dilakukan analisis yang sama dengan Model 1.

Model 2

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen,

```
Correlations: Numeric, Experiment  
Pearson correlation of Numeric and Experiment = 0.739  
P-Value = 0.000
```

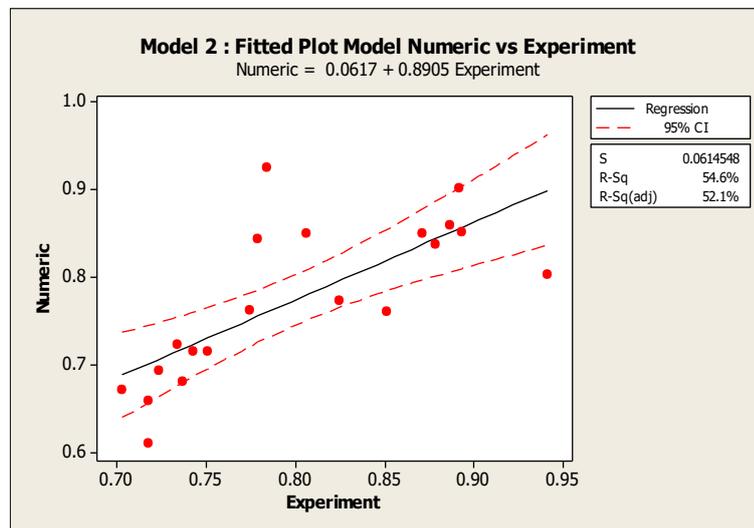
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eksperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi sebesar + 0.73, artinya model Numerik menghasilkan nilai yang sejalan dengan Eksperimen. Ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Scatterplot Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi :

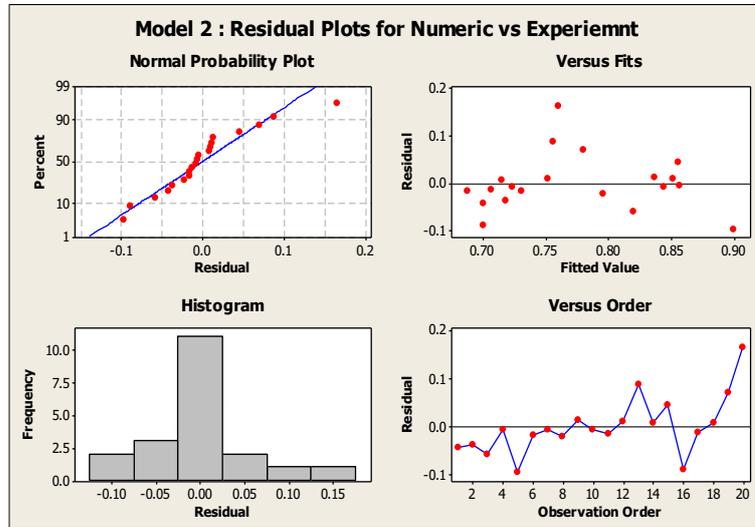
```
Regression Analysis: Numeric versus Experiment  
The regression equation is  
Numeric = 0.0617 + 0.8905 Experiment  
  
S = 0.0614548   R-Sq = 54.6%   R-Sq(adj) = 52.1%
```

Adapun gambar garis regresi adalah :



Dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 52,1%, artinya kemampuan garis regresi untuk mewakili variansi data dan memprediksi data sebesar 52,1%. Hal ini juga menunjukkan kemampuan model Numerik untuk memodelkan eksperimen.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi adalah :



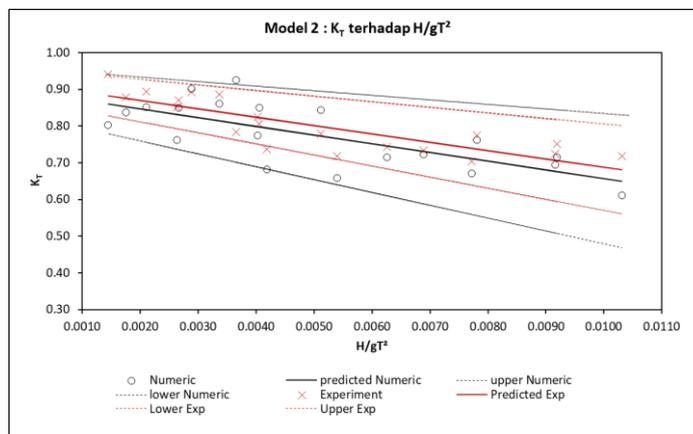
Dapat dilihat bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik.

3. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen

Two-Sample T-Test and CI: Numeric, Experiment				
Two-sample T for Numeric vs Experiment				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Numeric	20	0.7745	0.0888	0.020
Experiment	20	0.8004	0.0736	0.016
Difference = mu (Numeric) - mu (Experiment)				
Estimate for difference: -0.0259				
95% CI for difference: (-0.0782, 0.0263)				
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.01 P-Value = 0.321 DF = 38				
Both use Pooled StDev = 0.0816				

Nilai p-value = 0,321 (atau 32,1%) jika dibandingkan dengan significance level 0.05 (atau 5%), maka Terima H_0 ($\mu_N - \mu_E=0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa model Numerik dan Eksperimen **tidak berbeda secara statistik**.

4. Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing dengan model Linear dan Eksperimen



Berikut beberapa keterangan terkait garis regresi Numerik dan Eksperimen :

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	<i>Numeric</i>	<i>Experiment</i>
Multiple R	0.71844524	0.831892478
R Square	0.516163562	0.692045096
Adjusted R Square	0.48928376	0.67493649
Standard Error	0.063430644	0.00153456
Observations	20	20

<i>Numeric</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.893664311	0.030672723	29.13547366	1.34E-16	0.829223312	0.958105311
X Variable	-23.69207371	5.406577555	-4.382083391	0.000359	-35.05087165	-12.33327576

<i>Experiment</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.029367286	0.003841909	7.6439302	4.66E-07	0.021295735	0.037438838
X Variable	-0.030404916	0.004780617	-6.3600406	5.44E-06	-0.040448619	-0.020361213

Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numerik (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

Model 3

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen,

```
Correlations: Numeric, Experiment  
Pearson correlation of Numeric and Experiment = 0.523  
P-Value = 0.018
```

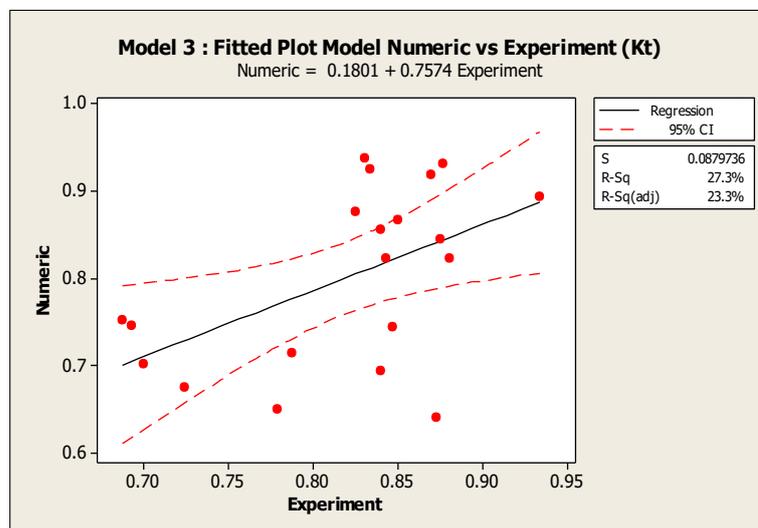
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eksperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi sebesar + 0.52, artinya model Numerik menghasilkan nilai yang sejalan dengan Eksperimen. Ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Scatterplot Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi :

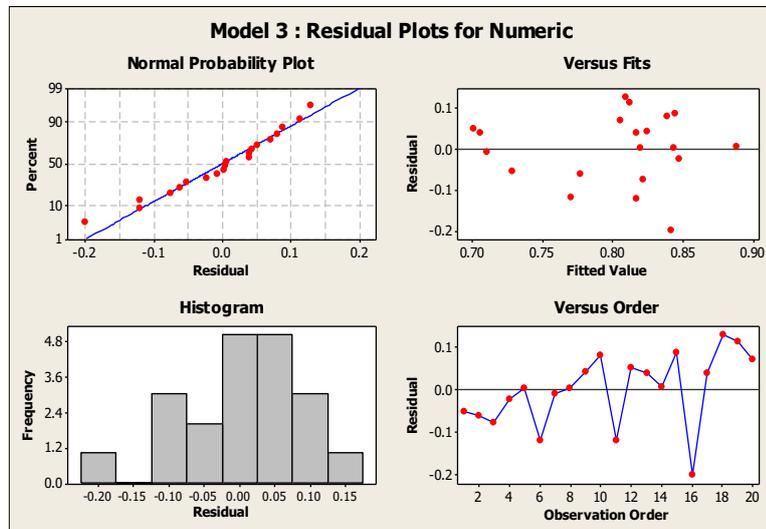
```
Regression Analysis: Numeric versus Experiment  
The regression equation is  
Numeric = 0.1801 + 0.7574 Experiment  
S = 0.0879736 R-Sq = 27.3% R-Sq(adj) = 23.3%
```

Adapun gambar garis regresi adalah :



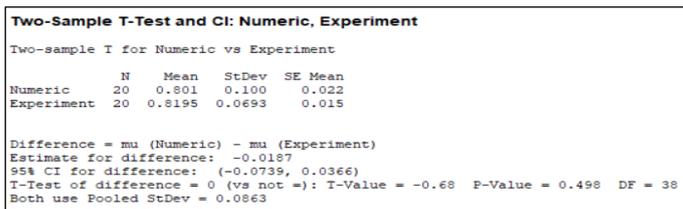
Koefisien determinasi (R^2) model adalah 23,3%, artinya garis regresi mampu mewakili variansi data dan kemampuan garis regresi untuk memprediksi data sebesar 23,3%.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi adalah :



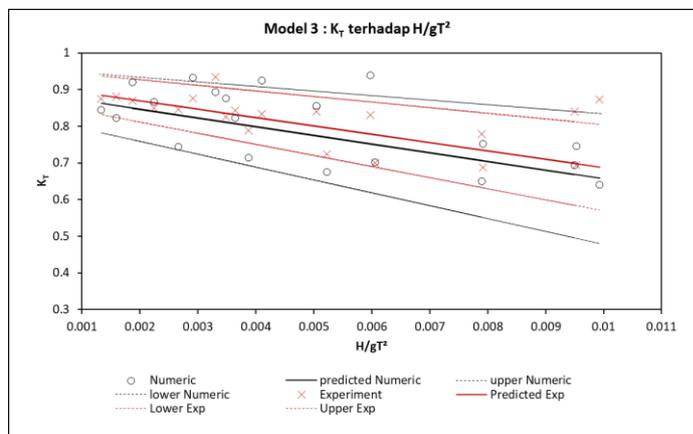
Dapat dilihat bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik.

3. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen



Nilai p-value = 0,498 (atau 49,8%) jika dibandingkan dengan significance level 0.05 (atau 5%), maka Terima H_0 ($\mu_N - \mu_E=0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa model Numerik dan Eksperimen **tidak berbeda secara statistik**.

4. Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing dengan model Linear dan Eksperimen



Berikut beberapa keterangan terkait garis regresi Numerik dan Eksperimen :

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	<i>Numeric</i>	<i>Experiment</i>
Multiple R	0.634139278	0.522407693
R Square	0.402132623	0.272909797
Adjusted R Square	0.368917769	0.232515897
Standard Error	0.002196516	0.00242229
Observations	20	20

<i>Numeric</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.018885708	0.004047904	4.665552145	0.000192	0.010381377	0.027390039
X Variable	-0.017457705	0.005017284	-3.479513116	0.002676	-0.027998628	-0.006916783

<i>Experiment</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.021985788	0.006593645	3.334390712	0.00369	0.008133054	0.035838522
X Variable	-0.020842473	0.008018582	-2.59927165	0.018127	-0.037688889	-0.003996057

Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numerik (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

Model 4

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen,

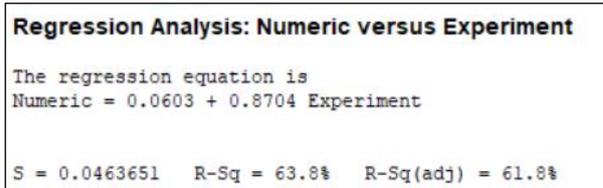
Correlations: Numeric, Experiment

Pearson correlation of Numeric and Experiment = 0.799
P-Value = 0.000

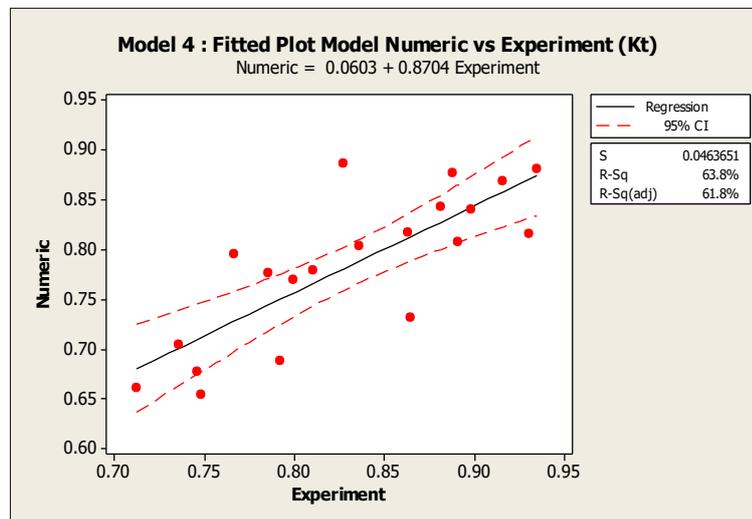
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eksperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi sebesar + 0.799, artinya model Numerik menghasilkan nilai yang sejalan dengan Eksperimen. Ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Scatterplot Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi :

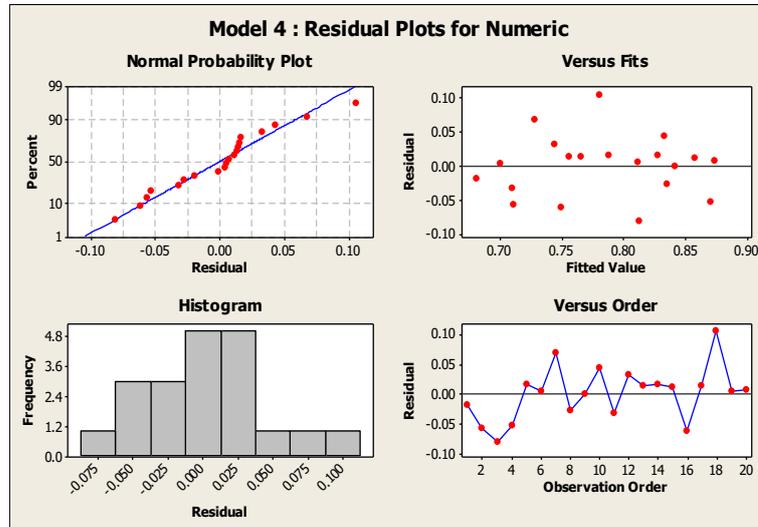


Adapun gambar garis regresi adalah :



Koefisien determinasi (R^2) model adalah 61,8%, artinya garis regresi mampu mewakili variansi data dan kemampuan garis regresi untuk memprediksi data sebesar 61,8%.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi adalah :



Dapat dilihat bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik.

5. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen

Two-Sample T-Test and CI: Numeric, Experiment

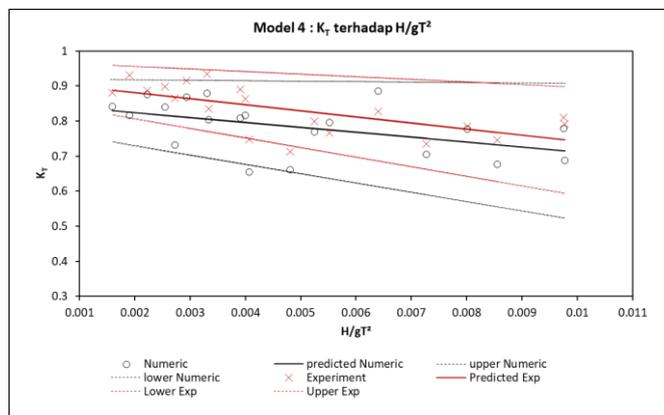
Two-sample T for Numeric vs Experiment

	N	Mean	StDev	SE Mean
Numeric	20	0.7838	0.0750	0.017
Experiment	20	0.8313	0.0688	0.015

Difference = μ (Numeric) - μ (Experiment)
 Estimate for difference: -0.0475
 95% CI for difference: (-0.0936, -0.0014)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -2.09 P-Value = 0.044 DF = 38
 Both use Pooled StDev = 0.0720

Nilai p-value = 0,044 (atau 4,8%) jika dibandingkan dengan significance level 0.05 (atau 5%), maka Tolak H_0 ($\mu_N - \mu_E = 0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa model Numerik dan Eksperimen **berbeda secara statistik**.

6. Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing dengan model Linear dan Eksperimen



Berikut beberapa keterangan terkait garis regresi Numerik dan Eksperimen :

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	<i>Numeric</i>	<i>Experiment</i>
Multiple R	0.481253899	0.654038
R Square	0.231605315	0.427766
Adjusted R Square	0.188916722	0.395976
Standard Error	0.002331607	0.002012
Observations	20	20

<i>Numeric</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.017915165	0.005613503	3.191441454	0.005057	0.006121633	0.029708696
X Variable	-0.016609361	0.00713074	-2.329261979	0.03169	-0.031590489	-0.001628233

<i>Experiment</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.025343	0.005592043	4.531901328	0.000258188	0.013594142	0.037091
X Variable	-0.0246	0.006705079	-3.668198746	0.00175891	-0.03868241	-0.01051

Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numerik (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

Model 5

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen,

```
Correlations: Numeric, Experiment  
Pearson correlation of Numeric and Experiment = 0.349  
P-Value = 0.131
```

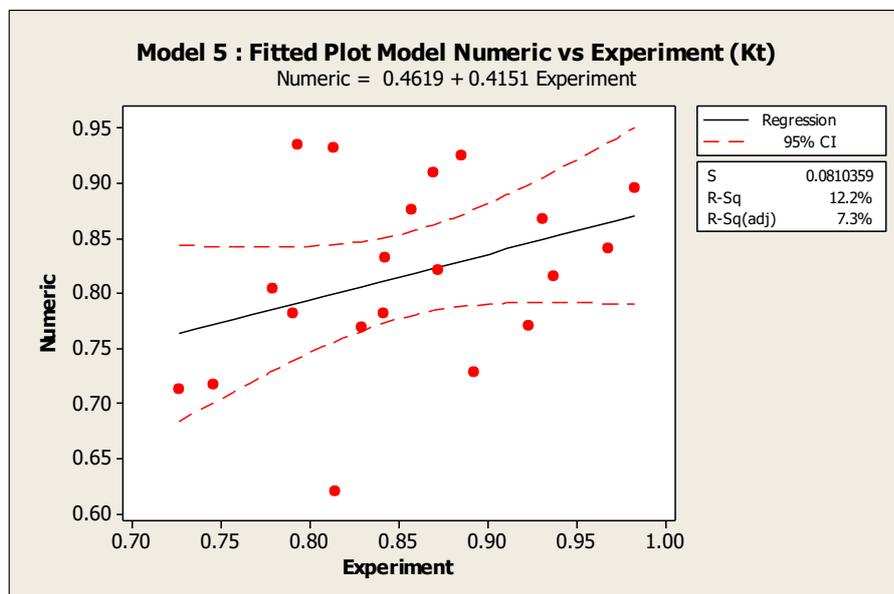
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eskperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi sebesar +0.349, artinya model Numerik menghasilkan nilai yang sejalan dengan Eksperimen. Ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Scatterplot Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi :

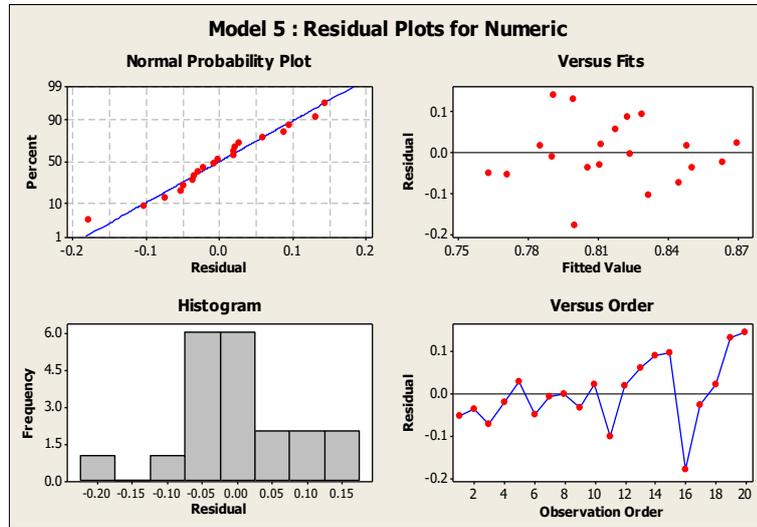
```
Regression Analysis: Numeric versus Experiment  
The regression equation is  
Numeric = 0.4619 + 0.4151 Experiment  
  
S = 0.0788746 R-Sq = 12.2% R-Sq(adj) = 9.9%
```

Adapun gambar garis regresi adalah :



Koefisien determinasi (R^2) model adalah 12,2%, artinya garis regresi mampu mewakili variansi data dan kemampuan garis regresi untuk memprediksi data sebesar 12,2%.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi adalah :



Dapat dilihat bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik.

3. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen

Two-Sample T-Test and CI: Numeric, Experiment

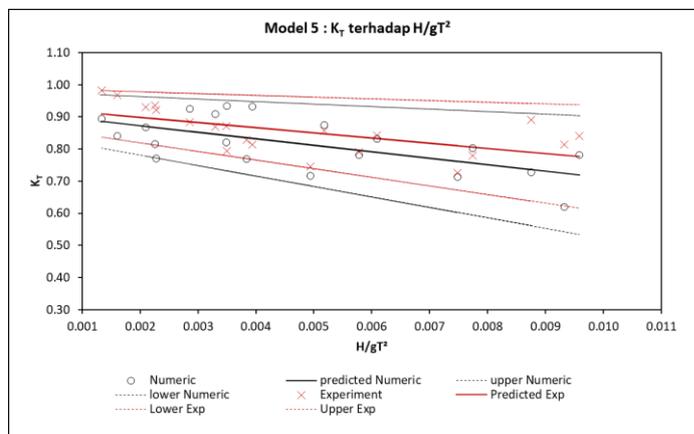
Two-sample T for Numeric vs Experiment

	N	Mean	StDev	SE Mean
Numeric	20	0.8166	0.0842	0.019
Experiment	20	0.8544	0.0708	0.016

Difference = μ (Numeric) - μ (Experiment)
 Estimate for difference: -0.0378
 95% CI for difference: (-0.0876, 0.0120)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.54 P-Value = 0.133 DF = 38
 Both use Pooled StDev = 0.0778

Nilai p-value = 0,133 (atau 13,3%) jika dibandingkan dengan significance level 0.05 (atau 5%), maka Terima H_0 ($\mu_N - \mu_E=0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa model Numerik dan Eksperimen **tidak berbeda secara statistik**.

4. Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing dengan model Linear dan Eksperimen



Berikut beberapa keterangan terkait garis regresi Numerik dan Eksperimen :

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	<i>Numeric</i>	<i>Experiment</i>
Multiple R	0.631205231	0.598059506
R Square	0.398420044	0.357675173
Adjusted R Square	0.364998935	0.32199046
Standard Error	0.067078356	0.058322049
Observations	20	20

<i>Numeric</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.913053516	0.031710196	28.79368841	1.65431E-16	0.846432866	0.979674167
X Variable	-20.22902647	5.858882921	-3.45271048	0.002839621	-32.53808273	-7.919970205

<i>Experiment</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.931271631	0.027570796	33.77746656	9.82E-18	0.873347538	0.989195723
X Variable	-16.12755321	5.09407327	-3.16594449	0.005348	-26.82980402	-5.425302407

Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numerik (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Analisis Statistik Koefisien Refraksi (K_R)

Model Numerik dan Eksperimen

Pengolahan data untuk kepentingan analisis statistic dilakukan dengan software Minitab, mirip dengan yang dilakukan pada Koefisien Transmisi (KT), Rangkuman beberapa analisis sebagai berikut:

1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen

Model	Koefisien korelasi
Model 1	0.265
Model 2	0.361
Model 3	0.220
Model 4	0.404
Model 5	0.663

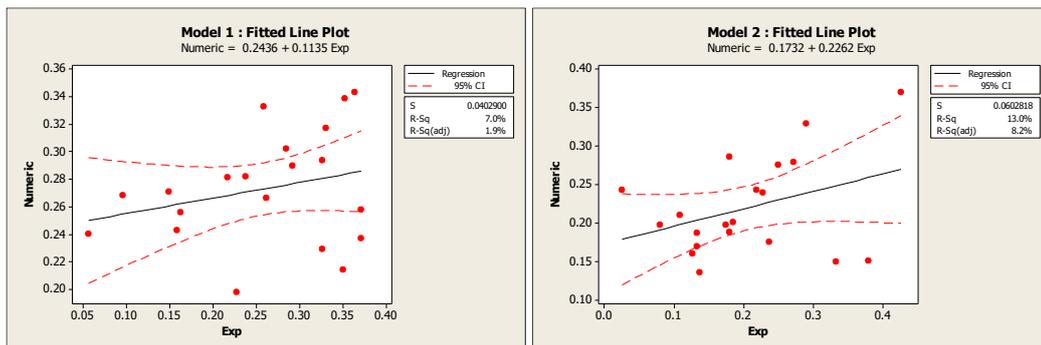
Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eksperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi bernilai positif artinya keduanya mempunyai nilai yang sejalan meningkat yaitu ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar. Jika dilihat dari nilainya hubungan meningkat tersebut tidak terlalu kuat (nilainya < 0.5)

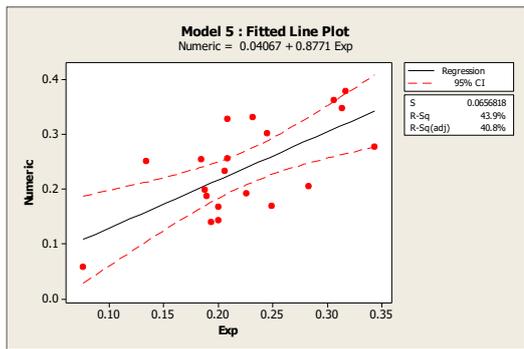
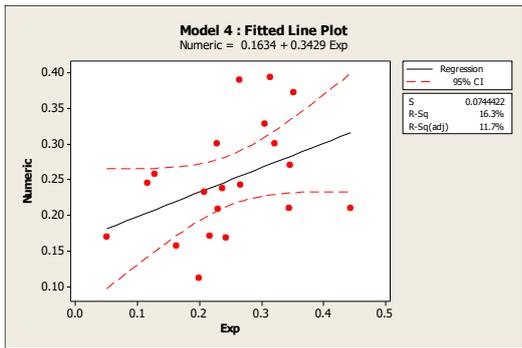
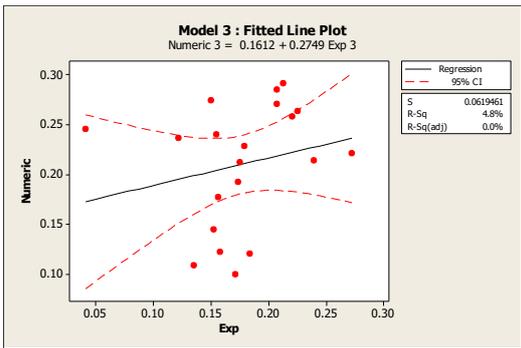
2. Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Bentuk hubungan antara model Numerik dan Eksperimen ditunjukkan dengan persamaan regresi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel

Model	Persamaan Regresi	R ²
Model 1	Numeric = 0.2436 + 0.1135 Exp	1.9%
Model 2	Numeric = 0.1732 + 0.2262 Exp	8.2%
Model 3	Numeric = 0.1612 + 0.2749 Exp	4.8%
Model 4	Numeric = 0.1634 + 0.3429 Exp	11,7%
Model 5	Numeric = 0.04067 + 0.8771 Exp	40.8%

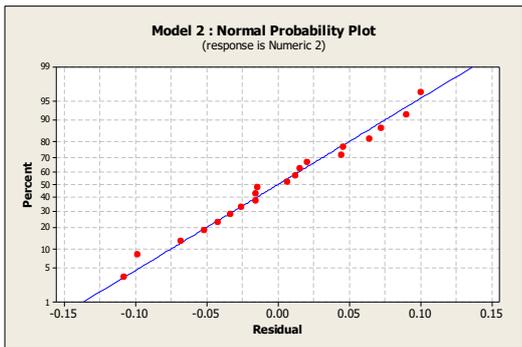
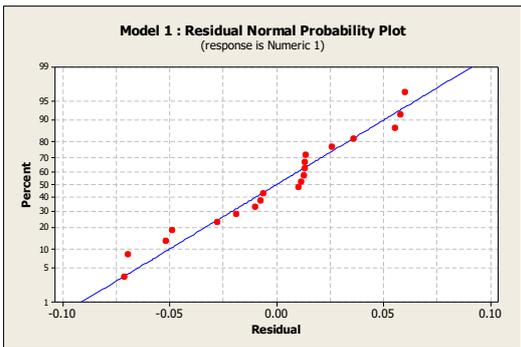
Adapun Gambar garis regresi untuk masing-masing model adalah :

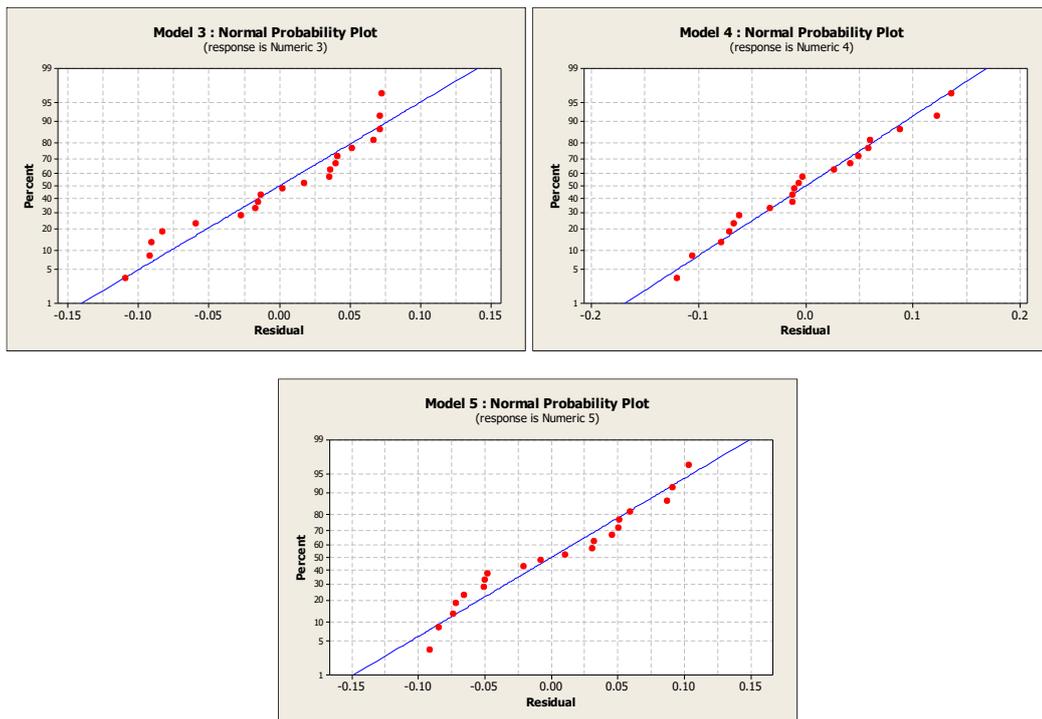




Dengan koefisien determinasi (R^2) untuk semua model lebih kecil dari 50%, artinya kemampuan garis regresi untuk mewakili variansi data dan memprediksi data tergolong rendah.

Dengan uji terhadap residual dari model regresi menunjukkan bahwa residual fit dengan distribusi normal, hal ini sesuai dengan kriteria persamaan regresi yang baik. Residual normal probability plot dapat dilihat pada Grafik berikut ini.



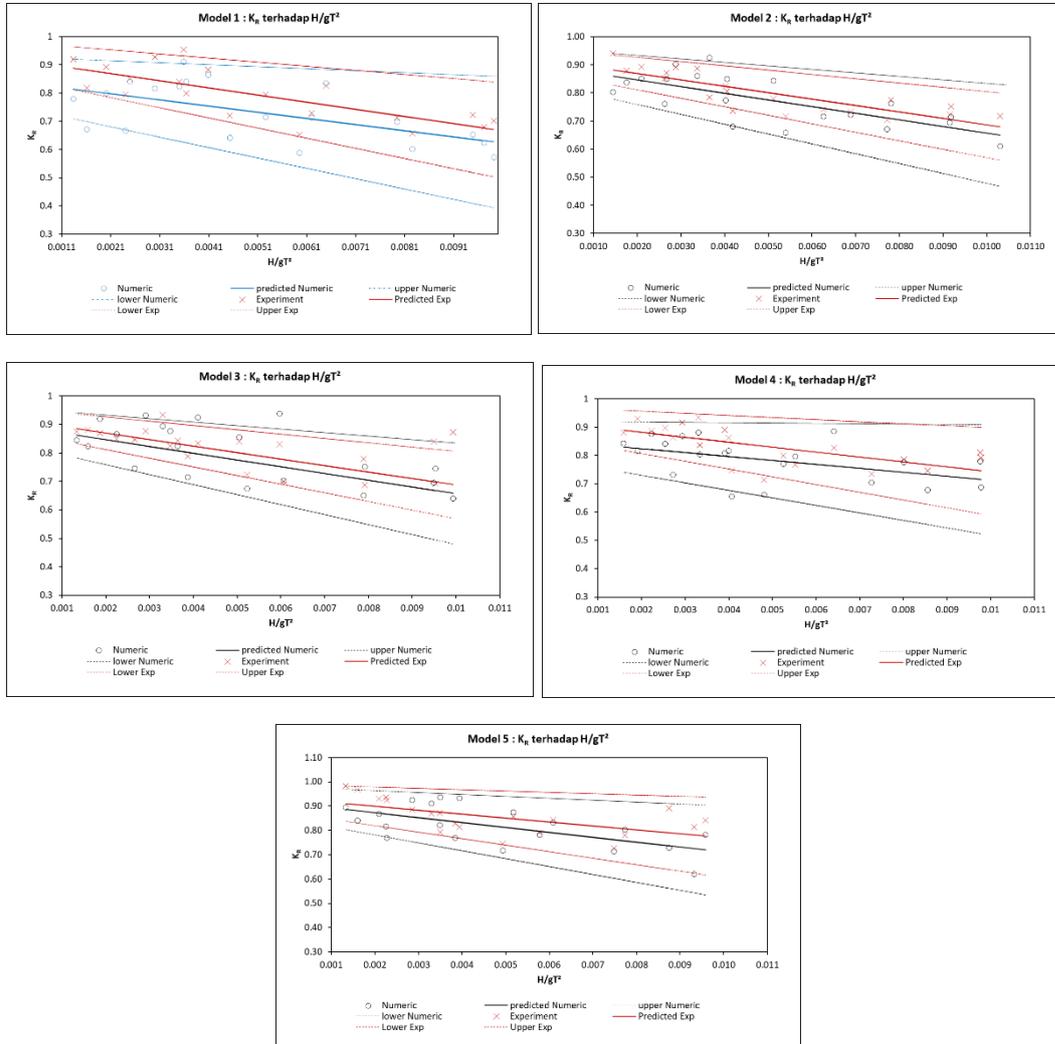


3. Uji t untuk model Numerik dan Eksperimen

Uji t antara nilai model Numerik dan Eksperimen mengevaluasi apakah kedua model berbeda atau sama secara statistic. Kesimpulan ditarik dengan membandingkan antara p-value dengan $\alpha = 0.05$, Jika $p\text{-value} > 0.05$ maka terima H_0 bahwa kedua model dapat dikatakan sama (tidak berbeda) secara statistic, dapat dilihat pada Tabel berikut:

Model	P value	Kesimpulan
Model 1	0.559	Terima H_0 , kedua model sama (tidak berbeda) secara statistic
Model 2	0.578	Terima H_0 , kedua model sama (tidak berbeda) secara statistic
Model 3	0.072	Terima H_0 , kedua model sama (tidak berbeda) secara statistic
Model 4	0.997	Terima H_0 , kedua model sama (tidak berbeda) secara statistic
Model 5	0.591	Terima H_0 , kedua model sama (tidak berbeda) secara statistic

4. 95% Confidence Interval Persamaan Regresi antara H/gT^2 masing-masing model Linear dan Eksperimen.



Dengan menggunakan 95% Confidence Interval (CI), dapat dilihat bahwa garis regresi Numeric (solid line berwarna oranye) tidak berimpit dengan garis regresi Eksperimen, namun masih berada dalam rentang 95% CI garis Eksperimen, maka hal ini semakin menunjang analisis statistik sebelumnya bahwa model Numerik telah berhasil memodelkan Eksperimen yang telah dilakukan, sehingga persamaan numerik dapat digunakan untuk melakukan prediksi berikutnya.

LAMPIRAN

**Analisis Statistik Mooring
Model Numerik dan Eksperimen**

Halaman ini sengaja dikosongkan

Pengolahan data untuk kepentingan analisis statistik dilakukan dengan software Minitab, mirip dengan yang dilakukan pada Mooring, Rangkuman beberapa analisis sebagai berikut:

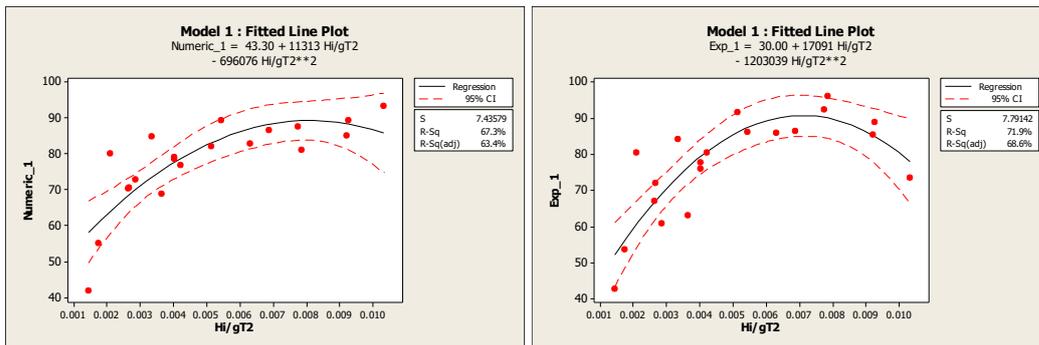
1. Korelasi antara hasil Numerik dan Eksperimen

Model	Koefisien korelasi
Model 1	0.860
Model 2	0.886
Model 3	0.958
Model 4	0.836
Model 5	0.917

Kekuatan hubungan antara model Numerik dan eksperimen ditunjukkan dengan koefisien korelasi bernilai positif artinya keduanya mempunyai nilai yang sejalan meningkat yaitu ketika hasil Eksperimen semakin besar maka model Numerik juga semakin besar.

2. Persamaan regresi linear untuk Numerik dan Eksperimen

Adapun Gambar garis regresi untuk model 1 Numeric dan Eksperimen adalah :



Masing-masing persamaan regresi menghasilkan nilai fitted. Uji t pada kedua nilai fitted untuk variabel H/gT2 yang sama adalah :

Two-Sample T-Test and CI: FITS1, FITS2

Two-sample T for FITS1 vs FITS2

	N	Mean	StDev	SE Mean
FITS1	20	77.8	10.1	2.3
FITS2	20	77.2	11.8	2.6

Difference = mu (FITS1) - mu (FITS2)
 Estimate for difference: 0.60
 95% CI for difference: (-6.43, 7.63)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.17 P-Value = 0.864 DF = 37

Dengan cara yang sama Berikut adalah nilai p-value hasil uji t model numerik dan eksperimen dari masing-masing model :

Model	Koefisien korelasi
Model 1	0.864
Model 2	0.740
Model 3	0.649
Model 4	0.632
Model 5	0.631

Karena p-value $> 0,05$ maka Terima H_0 bahwa fitted value kedua model tidak berbeda secara statistic. Artinya model numerik dapat digunakan untuk mewakili eksperimen dan dapat digunakan untuk melakukan prediksi.

BIODATA PENULIS



Sujantoko was born in Bojonegoro, Indonesia, in 1970. The author graduated with a bachelor of engineering from the ocean engineering department, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, 1995. Furthermore, the author was awarded a master of engineering degree in 2003, specializing in water resources engineering, from the civil engineering department, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia. Finally, the author completed a doctoral program in the ocean engineering department, ITS, in 2024.

The author's field of research is coastal processes, numerical models of wave-current interactions in shallow waters, and hydrodynamics of coastal and ocean structures. The author is a lecturer at the Department of Ocean Engineering. The author is also a member of the Indonesian Coastal Experts Association (HAPPI) and the Indonesian Engineers Association (PII). The author has published papers in various international journals and conferences as follows:

International Journal Publication

- 1) Sujantoko, E. B. Djatmiko, and W. Wardhana, 2022. Experimental investigation of the performance of porous-slope floating breakwater. *International Journal on Engineering and Applications*, 10(2), 149-157. <https://doi.org/10.15866/irea.v10i2.21350>.
- 2) Sujantoko, E. B. Djatmiko, and W. Wardhana, 2022. Experimental study on mooring tension of porous-slope floating breakwater. *International Journal on Engineering and Applications*, 10(5), 345-352. <https://doi.org/10.15866/irea.v10i5.22233>.
- 3) Sujantoko, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, and I. G. Firmansyah, 2023. Numerical modelling of hydrodynamic performance on porous slope type floating breakwater. *Nasemore*, 70(2), pp. 149-157. <https://doi.org/10.17818/NM/2023/2.1>.
- 4) Sujantoko, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, and M. Mustain, 2023. Analysis of wave spectrum change of porous-saw floating breakwater, *International Journal on Engineering and Applications*, 11(5), 298-307. <https://doi.org/10.15866/irea.v11i5.22792>
- 5) Sujantoko, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, M. Mustain, and D. R. Ahidah, 2024. Numerical modeling of wave hydrodynamic performance with various layouts of single-slope floating breakwater arrays, *International Journal on Engineering and Applications*, 12(1), pp.44-53. <https://doi.org/10.15866/irea.v12i1.24265>.

International Seminar Publication

- 1) Sujantoko, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, H. D. Armono, Sholihin, and M. F. Ali, 2019. Experimental study on the effect of mooring angle on mooring tension of porous saw type floating breakwater. <https://doi.org/10.5220/0010057000940099>.
- 2) Sujantoko, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, H. D. Armono, and Wahyudi, 2019. Dynamic behavior analysis of porous saw floating breakwater under regular waves. <https://doi.org/10.5220/0010119102120217>.
- 3) Sujantoko, D. R. Ahidah, W. Wardhana, E. B. Djatmiko, and M. Mustain, 2024. Numerical modelling of wave reflection and transmission in I-shaped floating breakwater series, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1321 (2024) 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012010>
- 4) Sujantoko, B. V Tito, E. B. Djatmiko, W. Wardhana, 2024. Analysis of hydrodynamic motion behaviour at various porosities on porous single-slope floating breakwaters, (*in printing*).
- 5) Sujantoko, A. H. Aurellia, W. Wardhana, and E. B. Djatmiko, 2024. Computational fluid dynamics wave reflection on porous double-slope floating breakwater, (*in printing*).