

Skripsi Geofisika

**Analisis Penjalaran Gelombang Melewati *Breakwater*
Menggunakan Model SWASH (*Simulating Wave till Shore*)**



OLEH:

MUTMAINNAH MIRANTI

H221 14 306

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

Analisis Penjalaran Gelombang Melewati *Breakwater* Menggunakan Model SWASH (*Simulating Wave till Shore*)

Skripsi untuk melengkapi tugas-tugas dan memenuhi syarat untuk mencapai gelar sarjana



MUTMAINNAH MIRANTI

H221 14 306

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

“Analisis Penjalaran Gelombang Melewati *Breakwater* Menggunakan Model SWASH (*Simulating Wave till Shore*)”

Oleh

Mutmainnah Miranti

H221 14 306

Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Ujian Guna Memperoleh Gelar Sarjana
Sains Program Pendidikan Sarjana Departemen Geofisika ini
Telah Disetujui Oleh Tim Pembimbing Pada Tanggal Seperti Tertera Dibawah
Ini

Makassar, November 2020

Disetujui Oleh :

Pembimbing Utama,

Prof. Dr. Dadang Ahmad S, M.Eng
NIP. 195609301980031004

Pembimbing Pertama,

Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

Mengetahui,
Ketua Departemen Geofisika

Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi ini merupakan karya orisinal saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk memperoleh gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan lainnya, dimanapun, kecuali yang telah dikutip sesuai kaidah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri dan dibantu oleh pihak pembimbing.

Makassar, 27 November 2020

Penulis

Mutmainnah Miranti
H22114306

PRAKATA

وَقَالَ لَهُمْ نَبِيُّهُمْ إِنَّ اللَّهَ قَدْ بَعَثَ لَكُمْ طَالُوتَ مَلِكًا قَالُوا أَنَّى يَكُونُ لَهُ الْمَلِكُ عَلَيْنَا
وَنَحْنُ أَحَقُّ بِالْمَلِكِ مِنْهُ وَلَمْ يُؤْتِ سَعَةً مِّنَ الْمَالِ قَالَ إِنَّ اللَّهَ اصْطَفَاهُ عَلَيْكُمْ وَزَادَهُ
بَسْطَةً فِي الْعِلْمِ وَالْجِسْمِ وَاللَّهُ يُؤْتِي مَلَكَهُ مَن يَشَاءُ وَاللَّهُ وَاسِعٌ عَلِيمٌ ﴿٢٤٧﴾

“Nabi mereka mengatakan kepada mereka: "Sesungguhnya Allah telah mengangkat Thalut menjadi rajamu." mereka menjawab: "Bagaimana Thalut memerintah Kami, Padahal Kami lebih berhak mengendalikan pemerintahan daripadanya, sedang diapun tidak diberi kekayaan yang cukup banyak?" Nabi (mereka) berkata: "Sesungguhnya Allah telah memilih rajamu dan menganugerahinya ilmu yang Luas dan tubuh yang perkasa." Allah memberikan pemerintahan kepada siapa yang dikehendaki-Nya. dan Allah Maha Luas pemberian-Nya lagi Maha mengetahui.” (QS. Al-Baqarah :247)

Alhamdulillah Rabbil ‘alamin sesungguhnya segala puji bagi Allah *Subhanahu wa Ta’ala*, kami memuji-Nya, memohon pertolongan dan meminta ampunan kepada-Nya. Kami berlindung kepada Allah dari kejahatan diri kami serta keburukan amal perbuatan kami. Barang siapa yang diberikan petunjuk oleh Allah, tak seorangpun yang dapat menyesatkannya. Dan barang siapa yang disesatkan oleh Allah, tak ada seorangpun yang dapat memberinya petunjuk. Aku bersaksi bahwa tiada illah yang berhak disembah secara benar selain Allah yang tiada sekutu bagi-Nya, dan aku bersaksi bahwa Muhammad *Shallallahu ‘Alaihi*

wa Sallam adalah hamba dan utusan-Nya. Shalawat dan salam senantiasa kita haturkan kepada Rasulullah *Shallallahu 'Alaihi wa Sallam*, kepada para keluarga beliau, para shahabat, istri-istri beliau serta orang-orang yang senantiasa menjalankan sunnah-sunnah beliau.

Alhamdulillahirabbil'alamiin. Penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul "Analisis Penjalaran Gelombang Melewati *Breakwater* Menggunakan Model SWASH (*Simulating Wave till Shore*)". Untaian terima kasih tak terkira kepada kedua orangtua tercinta, Ibunda **Sunarti** dan ayahanda **Amir** atas dukungan moriil, materiil, kasih sayang, pengorbanan dan do'a yang tak henti mengalir disetiap sujudnya.

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, bimbingan, motivasi dalam menyelesaikan studi. Rampungnya skripsi ini adalah sumbangsih dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan se gala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. Dadang Ahmad Sumiarihardja, M.Eng.**, selaku pembimbing utama dan Bapak **Dr. Muhammad Alimuddin Hamzah, M.Eng.**, selaku pembimbing pertama di kampus yang telah meluangkan waktu dalam membimbing, memberi nasihat, motivasi dan masukan-masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi.

2. Bapak **Dr. Sakka, M.Si.**, dan Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si.,M.Si.**, selaku tim enguji yang telah memberikan koreksi dan masukan dalam penulisan skripsi.
3. Keluarga besar H.Mina-Saide atas semua dukungan dan doanya selama ini.
4. Rekan seperjuangan tugas akhir, Nur, Rusmi, Nunu, dan Ifa.

Serta kepada orang-orang luar biasa yang telah mengisi dan membuat hari-hari penulis menjadi lebih berwarna selama 6 tahun terakhir. Terima kasih dan permohonan maaf yang sebesar-besarnya bila ada nama yang terlewat. Hanya Allah pemilik catatan yang lebih lengkap dan sebaik-baik pemberi balasan atas semua kebaikan.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan. Sehingga dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat konstruktif guna perbaikan kekurangan yang ada. Walau demikian, penulis berharap agar skripsi ini sedikitnya dapat bermanfaat bagi siapapun yang membuka dan membacanya.

Makassar, 27 November 2020

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
PRAKATA.....	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
ABSTRACT.....	1
ABSTRAK.....	2
BAB I PENDAHULUAN.....	3
I.1 Latar Belakang.....	3
I.2 Rumusan Masalah.....	6
I.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	6
I.4 Tujuan Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
II.1 Teori Gelombang.....	7
II.1.1 Klasifikasi Teori Gelombang.....	7
II.1.1 Transformasi Gelombang.....	9
II.2.1 Persamaan Pengatur (<i>Governing Equation</i>).....	10
II.2.2 Model Numerik.....	21
II.2 Breakwater.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
III.1 Alat.....	27
III.2 Tahap Penelitian.....	27
III.2.1 Tahap persiapan.....	27
III.2.2 Tahap Pengolahan Data.....	28

III.2.3	Tahap Analisis Data	28
III.3	Skema Penelitian.....	29
III.4	Kerangka Berpikir	30
III.5	Bagan Alir Penelitian	31
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
IV.1	Parameter Setting.....	32
IV.2	Expremental Setup.....	32
IV.3	Penjalaran Gelombang Monokromatik	35
IV.4	Penjalaran Gelombang Acak	42
IV.5	Parameter Analisis	46
BAB V	PENUTUP	48
V.1	Kesimpulan.....	48
V.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Partikel Air dalam Gelombang	8
Gambar 2. 2 Transformasi Gelombang	9
Gambar 2. 3 Sistem koordinat vertikal.....	11
Gambar 2. 4 Model Tiruan <i>Breakwater</i>	24
Gambar 3. 1 Variasi <i>breakwater</i> gelombang monokromatik	29
Gambar 3. 2 Variasi <i>breakwater</i> gelombang acak	29
Gambar 4. 1 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.2 m.....	33
Gambar 4. 2 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.24 m.....	33
Gambar 4. 3 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.28 m.....	33
Gambar 4. 4 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.32 m.....	33
Gambar 4. 5 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.2 m gelombang acak.....	34
Gambar 4. 6 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.24 m gelombang acak.....	34
Gambar 4. 7 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.28 m gelombang acak.....	35
Gambar 4. 8 Variasi tinggi <i>breakwater</i> 0.32 m gelombang acak.....	35
Gambar 4. 9 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada periode 1s	36
Gambar 4. 10 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada periode 1.5s	37
Gambar 4. 11 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada periode 2s	37
Gambar 4. 12 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada tinggi <i>breakwater</i> 0.24 m.....	38

Gambar 4. 13 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada tinggi <i>breakwater</i> 0.28 m.....	39
Gambar 4. 14 Time series Gelombang Monokromatik yang Menjalar pada tinggi <i>breakwater</i> 0.32m.....	39
Gambar 4. 15 Koefisien transmisi pada b/h 0.6	41
Gambar 4. 16 Koefisien transmisi pada b/h 0.7	41
Gambar 4. 17 Koefisien transmisi pada b/h 0.8	42
Gambar 4. 18 Realisasi Spektrum Gelombang Acak pada kedalaman 0.2 m	43
Gambar 4. 19 Realisasi Spektrum Gelombang Acak pada kedalaman 0.16m	44
Gambar 4. 20 Realisasi Spektrum Gelombang Acak pada kedalaman 0.12m	45
Gambar 4. 21 Realisasi Spektrum Gelombang Acak pada kedalaman 0.08m	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Batasan Gelombang Air Dangkal, Air Transisi, dan Air Dalam	8
Tabel 4. 1 Rangkuman Parameter Gelombang pada setiap kedalaman dengan Analisis Spektrum pada Titik 5 m.....	47
Tabel 4. 2 Rangkuman Parameter Gelombang pada setiap kedalaman dengan Analisis Spektrum pada Titik 14 m.....	47
Tabel 4. 3 Rangkuman Parameter Gelombang pada setiap kedalaman dengan Analisis Spektrum pada Titik 22 m.....	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Batimetri.....	52
Lampiran 2. Script Model Input SWASH (Gelombang Monokromatik).....	53
Lampiran 3. Script Model Input SWASH (Gelombang Acak)	55
Lampiran 4. Script plot time series gelombang monokromatik	56
Lampiran 5. Script plot spektrum gelombang acak.....	57
Lampiran 6. Kartu Kontrol Seminar	59
Lampiran 7. Kartu Kontrol Bimbingan Tugas Akhir	60

ABSTRACT

Modeling of the propagation of waves passing through the breakwater is carried out to analyze the process of waves propagating to the shore. This research aims at simulating monochromatic and random wave transformations. This research begins by examining the application of breakwaters with several height variations, by placing sponge-layers on the model. Simulate a monochromatic and random wave model using SWASH, then analyze the wave transformation and spectrum evolution.

Key words : Waves, breakwater, transformation, SWASH, spectrum

ABSTRAK

Pemodelan penjalaran gelombang yang melewati breakwater dilakukan untuk menganalisis proses gelombang menjalar sampai tepi pantai. Penelitian ini mengarah pada mensimulasi transformasi gelombang monokromatik dan acak. Penelitian ini dimulai dengan mengkaji penerapan breakwater dengan beberapa variasi tinggi, dengan menempatkan sponge-layer pada model. Mensimulasikan model gelombang monokromatik dan acak dengan menggunakan SWASH, kemudian menganalisis transformasi gelombang dan evolusi spektrum.

Kata kunci : Gelombang, *breakwater*, transformasi, SWASH, spektrum

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Negara Kepulauan Republik Indonesia adalah negara yang tiga perempat dari wilayahnya adalah laut (5,8 juta km²). Dari data yang dirilis Kemerintah Kelautan dan Perikanan (KKP) Agustus 2017, Indonesia kini terdiri dari 16.056 pulau yang sudah diberi nama dan terverifikasi. Sebelum jumlah mutakhir tersebut dirilis, pada awal 2017 lalu Direktorat Jenderal Pengelolaan Ruang Laut KKP lebih dulu merilis jumlah pulau yang sudah terverifikasi. Saat itu, dilaporkan bahwa Indonesia sudah terdiri dari 14.572 pulau atau lebih banyak 1.106 pulau dari data resmi sebelumnya.

Data di atas menunjukkan bahwa Indonesia merupakan negara kepulauan yang sebagian besar wilayahnya adalah lautan, oleh karena itu segala aktivitas di laut merupakan bagian penting bagi masyarakat Indonesia, segala aktifitas yang berkaitan dengan kelautan tentu sangat sensitif terhadap setiap perubahan yang terjadi di laut. Besarnya energi gelombang yang terjadi pada suatu daerah mengikuti siklus alam. Gelombang laut merupakan fenomena alam yang sangat mempengaruhi efisiensi dan keselamatan bagi kegiatan kelautan, sehingga informasi terhadap variasi dan karakteristik gelombang laut tentu sangat diperlukan (Kurniawan, 2011). Gelombang yang tiba di pantai tergantung pada arah atau besarnya tiupan angin. Rambat gelombang yang menuju pantai dari laut dalam akan mengalami perubahan bentuk struktur gelombang, akibatnya akan

terbentuk tinggi gelombang yang besar dan akhirnya menjadi pecah (Triatmodjo, 1999).

Konteks simulasi yang layak dan efisien dari evolusi gelombang berskala besar dan aliran air dangkal di lautan dan lautan pantai, pendekatan diadopsi di mana gerakan permukaan bebas dilacak menggunakan fungsi bernilai tunggal dari bidang horizontal. Model yang paling sering digunakan menggunakan teknik ini sering non-hidrostatik alam. Model non-hidrostatik terdiri dari persamaan nonlinier air dangkal (NLSW) dengan penambahan persamaan momentum vertikal dan tekanan non-hidrostatik dalam persamaan momentum horisontal.

Pemodelan non-hidrostatik dinamika gelombang air bukanlah hal baru; lebih dari 10 tahun telah berlalu sejak kontribusi pionir Casulli dan Stelling (1998) dan Stansby dan Zhou (1998). Sejak itu, beberapa makalah tentang topik ini dalam konteks kegiatan pemodelan pesisir telah diterbitkan; seperti Yamazaki dkk. (2009), Young dan Wu (2010) dan Ai et al. (2010). Tujuan yang dikejar dalam penelitian ini sangat bervariasi. Namun, penekanan umumnya adalah pada pengembangan prosedur komputasi yang akurat dan efisien yang mampu mensimulasikan perambatan gelombang yang relatif singkat, di mana baik efek dispersi frekuensi dan nonlinier memainkan peran penting.

Delft University mengembangkan teknologi dalam menganalisis gelombang laut, fokus pada perkembangan dan validasi gelombang spektral Model SWAN dan yang lebih baru adalah Model SWASH (*Simulating Waves till Shore*). Perkembangan SWASH untuk gelombang permukaan dan arus cepat bervariasi.

Pada awalnya hanya berkembang pada model satu dimensi sederhana. SWASH sangat fleksibel, mudah diakses dan mudah diperpanjang mengenai beberapa fungsi dari model.

SWASH mengambil titik awal yang mampat pada persamaan Navier-Stokes atau persamaan Euler untuk perhitungan elevasi permukaan dan arus. Bahkan, persamaan ini dapat dianggap sebagai persamaan nonlinear air dangkal (NLSW) termasuk efek percepatan vertikal. Untuk tujuan sekarang menguraikan prinsip-prinsip yang diadopsi, bentuk yang tepat dari persamaan yang mengatur tidak relevan.

Mengacu pada studi ekperimental (Stelling dan Zijlema, 2003), yang mengimplementasikan skema kompak mengenai gradien tekanan vertikal untuk menyelesaikan dispersi frekuensi dengan hubungannya dengan gelombang nonlinear. Menurut (Assegaf dan Samad 2017) ketika gelombang laut menepi ke pantai, maka berbagai proses refraksi, difraksi, refleksi dan pendangkalan dapat terjadi. Dalam satu dimensi, amplitudo akan meningkat kemudian pecah dan membentuk gelombang baru.

Penelitian ini menyajikan uraian tentang kode SWASH dan hasil utamanya pada gelombang acak yang mejalar sampai ke tepi pantai dengan tambahan hambatan (*breakwater*).

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana gelombang yang menjalar melintasi *breakwater*?
2. Bagaimana perilaku gelombang yang menjalar melewati *breakwater*?

I.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini terbatas pada analisis penjalaran gelombang yang melewati *breakwater* 1 dimensi vertikal yang bersifat monokromatik dan acak untuk mengetahui penjalaran gelombang dengan kedalaman berbeda.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memodelkan penjalaran gelombang yang melewati *breakwater*.
2. Menganalisis perilaku gelombang yang menjalar melewati *breakwater*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Teori Gelombang

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

Terdapat beberapa teori untuk menjelaskan fenomena gelombang yang terjadi di alam, antara lain sebagai berikut (Triatmodjo, 1999):

1. Teori gelombang linier (*Airy Wave, Small Amplitude Wave Theory*).
2. Teori gelombang non linier (*Finite-Amplitude Wave Theories*), diantaranya :
 - a. Gelombang Stokes orde 2, orde 3, orde 4 dan seterusnya.
 - b. Gelombang Cnoidal.
 - c. Gelombang Solitary.

Masing-masing teori tersebut mempunyai batasan keberlakuan yang berbeda. Teori gelombang Airy merupakan gelombang amplitude kecil, teori yang lain adalah gelombang amplitude terbatas (*finite amplitude waves*).

II.1.1 Klasifikasi Teori Gelombang

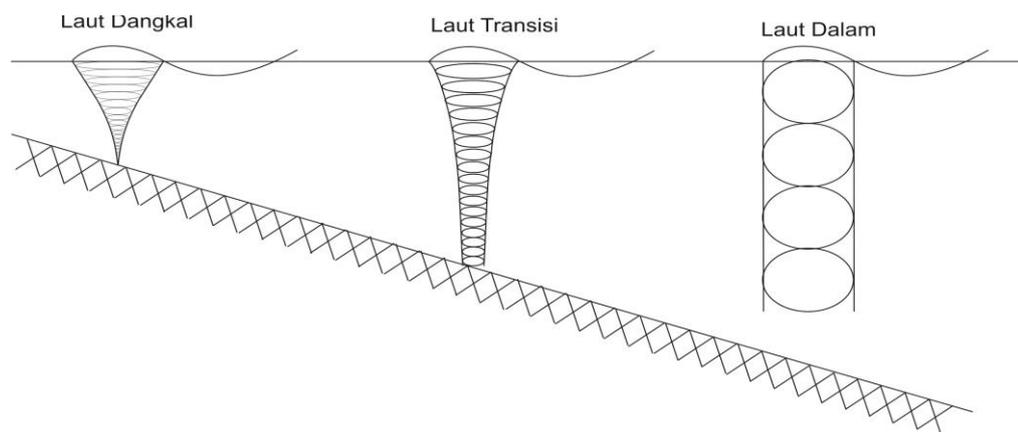
Jika ditinjau dari kedalaman relatif dimana gelombang menjalar, maka gelombang dikelompokkan dalam 3 kategori yaitu, gelombang laut dangkal,

gelombang laut transisi, dan gelombang laut dalam. Batasan dari ketiga kategori tersebut didasarkan pada rasio antara kedalaman dan panjang gelombang (d/L). Batasan penggunaannya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Batasan Gelombang Air Dangkal, Air Transisi, dan Air Dalam (Triatmodjo, 1999)

Kategori Gelombang	d/L	$2\pi d/L$	$\tanh(2\pi d/L)$
Laut Dalam	$> 0,5$	$> \pi$	≈ 1
Laut Transisi	$0,05 - 0,5$	$0,25 - \pi$	$\tanh(2\pi d/L)$
Laut Dangkal	$< 0,05$	$< 0,25$	$2\pi d/L$

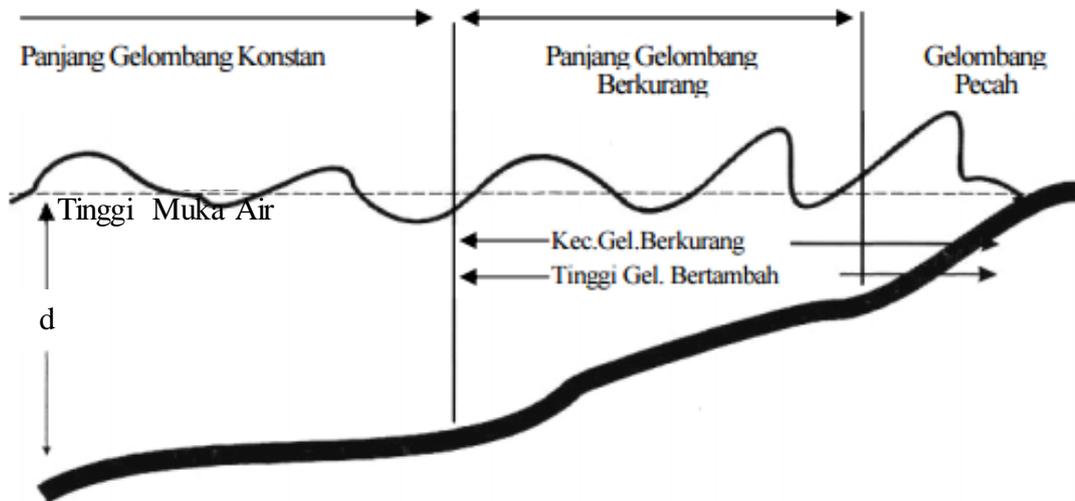
Dalam gelombang terdapat partikel-partikel air yang berubah selama penjalaran gelombang dari laut dalam sampai laut dangkal. Bentuk partikel yang terdapat dalam gelombang yang bergerak menuju laut dangkal digambarkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Partikel Air dalam Gelombang (Triatmodjo, 1999)

II.1.1 Transformasi Gelombang

Menurut Aziz (2006), gelombang di perairan dalam yang bergerak memasuki perairan pantai mengalami transformasi yakni : kecepatannya berkurang, panjang gelombang menjadi lebih pendek dan tingginya bertambah. Transformasi gelombang ini diperlihatkan pada gambar



Gambar 2. 2 Transformasi Gelombang (Triatmodjo, 1999)

Perubahan kecepatan yang dialami gelombang ketika memasuki perairan dangkal (daerah pantai) mengakibatkan gelombang mengalami refraksi atau terjadi pembelokan dari arah penjalaran gelombang. Refraksi ini membuat 'muka gelombang' sejajar garis pantai. Adakalanya gerakan gelombang menuju pantai terhambat oleh adanya bangunan seperti pemecah gelombang (*breakwater*). Gelombang yang membentur pemecah gelombang ini mengalami difraksi yang mengakibatkan tinggi gelombang menjadi berkurang.

Disamping dapat mengalami refraksi dan difraksi, gelombang laut juga mengalami refleksi (pemantulan), seperti yang dialami oleh gelombang yang

memasuki pelabuhan atau suatu teluk. Gelombang yang datang dipantulkan kembali ke arah gelombang berdiri.

Menurut Danial (2008), Sejak keluar dari daerah pembentukannya, gelombang yang masih berada di laut dalam menjalani transformasi lebih teratur dibanding pada saat pembentukannya. Tetapi selama penjarannya, angin dan durasi serta arah hembusannya masih tetap memberikan pengaruh sehingga menyebabkan terjadi perubahan baik tinggi, periode dan arah.

Transformasi gelombang di zona hampasan memainkan peran penting dalam teknik pantai karena, gelombang di dekat pantai adalah kekuatan pendorong untuk banyak fenomena di dekat pantai, seperti arus sejajar pantai, pengaturan ketinggian air, sedimentasi, erosi, dan pembebanan pesisir. Zona hampasan dicirikan oleh transformasi ireversibel dari gerakan gelombang terorganisir dari insiden pendek, gelombang yang dihasilkan oleh angin menjadi gerakan dari berbagai jenis dan skala, misalnya, turbulensi dan gerakan frekuensi rendah. Fitur utama yang terkait dengan transformasi gelombang pantai di zona ombak diilustrasikan pada Gambar. 2.2. (SWL menunjukkan tingkat air diam.) Di daerah pra-pecah, transformasi gelombang dijelaskan oleh efek dari kecuraman gelombang karena nonlinieritas (atau amplitudo dispersi) dan gelombang pendek karena dispersi frekuensi. Pemodelan SWASH

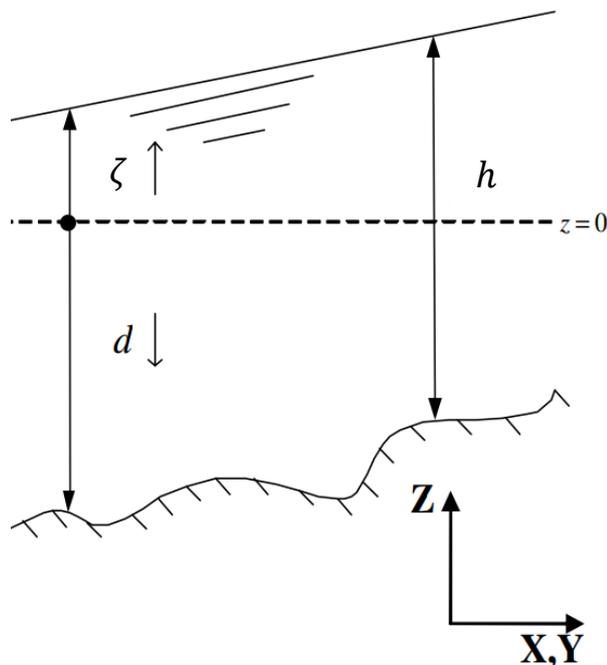
II.2.1 Persamaan Pengatur (*Governing Equation*)

Persamaan yang paling umum digunakan dalam SWASH adalah ortogonal melengkung, dan persamaan yang mengatur pada prinsipnya dapat ditulis dalam

bentuk koordinat ini. Namun, bentuk seperti itu tidak perlu dipersulit untuk tujuan sekarang yaitu menguraikan prinsip-prinsip yang diadopsi. Sebaliknya, persamaan diperkenalkan dalam hal notasi Cartesian. Untuk menyederhanakan pernyataan tanpa memperkenalkan kehilangan umum yang signifikan, perhatian difokuskan pada aliran rata-rata dalam domain fisik horizontal dua dimensi. Perluasan ke kerangka tiga dimensi diuraikan dalam Zijlema dan Stelling (2005, 2008).

Aliran kedalaman-rata, non-hidrostatik, permukaan bebas dapat dijelaskan oleh persamaan-persamaan air dangkal nonlinier yang, pada gilirannya, dapat diturunkan dari persamaan Navier-Stokes yang tidak dapat mampat yang terdiri dari konservasi massa dan momentum.

a. Persamaan Massa



Gambar 2. 3 Sistem koordinat vertikal

Untuk fluida yang tidak dapat dimampatkan, konservasi massa mereduksi menjadi konservasi volume

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

Karena aliran permukaan bebas dianggap sebagai persamaan terpisah untuk menentukan lokasi permukaan bebas ζ diperlukan. Untuk mendapatkan persamaan permukaan bebas, persamaan massa terintegrasi ke kedalaman:

$$\int_{-d}^{\zeta} \nabla \cdot \mathbf{u} \, dz = \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} \, dz + \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} \, dz + w|_{z=\zeta} - w|_{z=-d} \quad (2.2)$$

Sekarang diasumsikan bahwa permukaan air selalu terdiri dari partikel yang sama. Ini dibenarkan karena mengesampingkan penggulingan gelombang. Kecepatan vertikal dari sebuah partikel yang terletak di permukaan bebas sama dengan turunan material dari permukaan bebas dan ini menghasilkan kondisi batas kinematik pada permukaan bebas:

$$w(x, y, \zeta, t) = \frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (2.3)$$

Kondisi serupa dikenakan di bagian bawah dan ini mengarah ke kondisi batas kinematik di bagian bawah

$$w(x, y, -d, t) = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} - u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (2.4)$$

Ketika persamaan (2.3) dan (2.4) diganti menjadi persamaan (2.1) dan menggunakan aturan Leibniz tentang integrasi, persamaan massa terintegrasi menjadi

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

dimana u dan v adalah kecepatan rata-rata kedalaman

Menggunakan aturan Leibniz tentang integral, maka diperoleh

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \int_{-d}^{\zeta} \left(\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} \right) dz \\ = \frac{1}{h} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz - (u|_{z=\zeta}) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - (u|_{z=-d}) \frac{\partial d}{\partial x} \\ + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v dz - (v|_{z=\zeta}) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - (v|_{z=-d}) \frac{\partial d}{\partial y} \end{aligned}$$

Karena ζ dan d bebas dari z maka persamaan tersebut menjadi

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \int_{-d}^{\zeta} \left(\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} \right) dz \\ = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v dz \\ + \left[-(u|_{z=\zeta}) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - (v|_{z=\zeta}) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] - \left[(u|_{z=-d}) \frac{\partial d}{\partial x} - (v|_{z=-d}) \frac{\partial d}{\partial y} \right] \end{aligned}$$

Selanjutnya,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v dz = 0 \quad (2.6)$$

Berikutnya,

$$u = \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} u dz, \quad v = \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} v dz$$

kita tuliskan dalam bentuk aproksimasi sebagai

$$\int_{-d}^{\zeta} u dz \approx u(\zeta + d) \quad \text{dan} \quad \int_{-d}^{\zeta} v dz \approx v(\zeta + d)$$

dengan asumsi bahwa kedalaman air, $z = \zeta + d$ sangat kecil yang diperoleh dari asumsi air dangkal yang mana sebagai akibatnya u dan v dapat dianggap konstan terhadap z . Selanjutnya persamaan (2.6) menjadi (Jamhuri,2014):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} [u(\zeta + d)] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} [v(\zeta + d)] = 0 \quad (2.7)$$

a. Persamaan Momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

di mana t adalah waktu, x dan y berada pada tingkat air diam dan sumbu z menunjuk ke atas, $\zeta(x, y, t)$ adalah elevasi permukaan yang diukur dari level air diam, $d(x, y)$ adalah kedalaman air tetap, atau tingkat bawah yang diukur, $h = \zeta + d$ adalah kedalaman air, atau kedalaman total, $u(x, y, t)$ dan $v(x, y, t)$ adalah kecepatan aliran rata-rata dalam x - dan y - arah, masing-masing, $q(x, y, z, t)$ adalah tekanan non-hidrostatik (dinormalkan oleh densitas), g adalah percepatan gravitasi, c_f adalah koefisien friksi bawah tanpa dimensi, dan τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} dan τ_{yy} adalah istilah tegangan turbulen horisontal. Perhatikan bahwa persamaan momentum ditulis dalam bentuk non-konservatif. Integral dari gradien tekanan non-hidrostatik di atas kedalaman air dalam persamaan. (2.7) dapat dinyatakan sebagai berikut (Stelling dan Zijlema, 2003):

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta - d)}{\partial x} \quad (2.10)$$

dengan q_b tekanan non-hidrostatik di bagian bawah. Ekspresi serupa dapat ditemukan untuk integral dalam Persamaan. (2.8).

Karena kuantitas q_b disertakan, diperlukan beberapa persamaan ekstra. Sebagaimana ditunjukkan dalam Stelling dan Zijlema (2003) keakuratan penyebaran frekuensi untuk gelombang pendek relatif dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menerapkan metode Kellerbox (Lam dan Simpson, 1976):

$$\frac{q|_{z=\zeta} - q|_{z=-d}}{h} = -\frac{q_b}{h} = \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} + \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=-d} \quad (2.11)$$

Perhatikan bahwa tekanan non-hidrostatik pada permukaan bebas adalah nol. Selanjutnya, kami memperkenalkan kecepatan dalam arah z pada permukaan bebas, w_s , dan pada tingkat lapisan, w_b . Persamaan momentum untuk komponen vertikal ini

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \frac{\partial w_b}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=-d} = 0 \quad (2.12)$$

di mana kedua istilah advektif dan difusif telah diabaikan karena mereka umumnya kecil dibandingkan dengan percepatan vertikal yang diasumsikan secara instan ditentukan oleh gradien tekanan non-hidrostatik.

Kombinasi persamaan 2.11 dan 2.10 sebagai berikut

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (2.13)$$

Kecepatan vertikal di bagian bawah, w_b , dapat ditemukan melalui kondisi kinematik berikut:

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (2.14)$$

Akhirnya, konservasi hasil massa lokal

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (2.15)$$

Ketika gelombang bergerak di atas jarak yang relatif jauh dari beberapa kilometer, pengaruh gesekan bawah menjadi lebih jelas. Terlebih lagi, ini dapat mempengaruhi gelombang panjang yang dekat dengan garis pantai, misalnya

gelombang infragravitasi, dan sirkulasi di dekat pantai. Meskipun ada banyak ekspresi untuk koefisien gesekan bawah c_f , kami menggunakan yang didasarkan pada koefisien kekasaran Manning n , sebagai berikut,

$$c_f = \frac{n^2 g}{h^{1/3}} \quad (2.16)$$

Tekanan turbulen diberikan sebagai berikut

$$\tau_{xx} = 2v_t \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = v_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \tau_{yy} = 2v_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.17)$$

dengan $v_t(x, y, t)$ kekentalan pusaran horizontal karena gelombang pecah dan turbulensi subgrid. Dalam tulisan ini, kita membatasi diri pada deskripsi proses pemecahan. Dalam hal ini model turbulensi harus digunakan untuk memperkirakan pencampuran dan disipasi turbulen yang disebabkan oleh pemutusan. Meskipun disipasi tersirat dalam representasi jemu, viskositaslah yang menentukan skala di mana disipasi terjadi. Dengan demikian, gerakan turbulen berskala besar di permukaan roller dapat secara efektif dimodelkan melalui kekentalan pusaran v_t , dimana turbulensi diasumsikan berada dalam kesetimbangan lokal. Untuk alasan ini, hipotesis panjang pencampuran Prandtl digunakan dan diberikan oleh

$$v_t = l_m^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (2.18)$$

Dengan l_m panjang pencampuran yang diambil sebanding dengan tinggi gelombang yang khas; baik tinggi gelombang untuk gelombang biasa atau tinggi gelombang signifikan untuk gelombang tidak beraturan.

Untuk melengkapi sistem persamaan, kondisi batas yang tepat perlu diterapkan pada batas terbuka dari domain grid komputasi. Pada batas lepas pantai, gelombang biasa atau tidak teratur diperkenalkan dengan menentukan distribusi kecepatan lokal. Untuk mensimulasikan memasuki gelombang tanpa beberapa refleksi di batas ini, kondisi reflektif lemah memungkinkan gelombang keluar diadopsi (Blayo dan Debreu, 2005):

$$u_b = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} (2\zeta_b - \zeta) \quad (2.19)$$

dengan asumsi bahwa gelombang masuk dan keluar tegak lurus terhadap batas. Jenis kondisi radiasi ini telah terbukti mengarah pada hasil yang baik dengan kondisi gelombang dekat pantai. Di sini, u_b adalah kecepatan arus masuk pada batas dan ζ_b adalah sinyal elevasi permukaan gelombang datang. Tanda masuk (2.19) tergantung pada lokasi batas. Tanda tambah mengacu pada kecepatan arus masuk di batas barat dan selatan, dan tanda minus mengacu pada kecepatan arus masuk di batas timur dan utara. Untuk gelombang reguler, sinyal insiden dapat berupa deret waktu atau deret Fourier seperti yang diberikan oleh

$$\zeta_b = a_0 + \sum_{j=1}^N a_j \cos(\omega_j t - \varphi_j) \quad (2.20)$$

di mana N adalah jumlah komponen Fourier, a_0 adalah level air rata-rata, dan a_j , ω_j dan φ_j adalah amplitudo, frekuensi sudut dan fase lokal lag, masing-masing, dari komponen j^{th} .

Gelombang tidak beraturan biasanya diperlakukan sebagai realisasi stasioner, proses Gaussian yang dapat dengan mudah dijelaskan melalui deret Fourier (Holthuijsen, 2007). Kami akan membatasi diri di sini untuk gelombang searah, meskipun SWASH memungkinkan untuk menentukan gelombang multi arah juga. Dengan menggunakan teori gelombang linier, kecepatan pada kedalaman ditemukan oleh superposisi linier dari gelombang harmonik N yang amplitudonya ditentukan dengan sampling spektrum keragaman varians dan fase yang dipilih secara acak untuk setiap realisasi:

$$u_b(z, t) = \sum_{j=1}^N a_j \left[\omega_j \frac{\cosh k_j(z+d)}{\sinh k_j h} + \sqrt{\frac{g}{h}} \right] \cos(\omega_j t - \alpha_j) - \sqrt{\frac{g}{h}} \zeta \quad (2.21)$$

di mana k_j dan α_j adalah bilangan gelombang dan fase acak, masing-masing, dari masing-masing frekuensi ω_j . Selain itu, rentang frekuensi secara seragam diselesaikan dengan interval frekuensi $\Delta\omega$, yaitu $\omega_j = j\Delta\omega$. Nomor gelombang dan frekuensi terkait dengan hubungan dispersi, $\omega^2 = gk \tanh(kh)$, sedangkan fase acak pada setiap frekuensi terdistribusi secara merata antara 0 dan 2π . Perhatikan bahwa kondisi batas (2.20) ditambah dengan kondisi radiasi untuk meminimalkan pantulan di batas lepas pantai.

Untuk spektrum gelombang yang diberikan $E(\omega)$, deret waktu (2.21) dapat disintesis dengan menghitung amplitudo masing-masing harmonik, sebagai berikut

$$a_j = \sqrt{2E(\omega_j)\Delta\omega} \quad (2.22)$$

Spektrum dapat diperoleh dari pengamatan untuk keadaan laut yang diinginkan atau dengan menentukan bentuk parametrik dari spektrum, seperti spektrum Jonswap terkenal untuk kondisi fetch-terbatas di dalam air. Spektrum fetchlimited lainnya adalah apa yang disebut spektrum TMA yang dapat digunakan untuk menghasilkan karakteristik gelombang yang terjadi di perairan dangkal (Holthuijsen, 2007).

Akhirnya, kita dapat mempertimbangkan dua jenis kondisi darat. Garis pantai yang bergerak, dalam kasus penggenangan atau perhitungan *run-up*, membutuhkan perawatan naturikal yang akan diuraikan dalam Bagian 3. Jika batas darat berada di zona prebreaking, kondisi serap mungkin akan terjadi. Biasanya, kondisi radiasi Sommerfeld digunakan, yang memungkinkan (panjang) gelombang untuk menyeberangi batas keluar tanpa pantulan. Misalnya, untuk kasus batas paralel dengan sumbu y , kondisi ini diberikan oleh

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.23)$$

II.2.2 Model Numerik

Ada berbagai jenis model numerik yang tersedia untuk menyelesaikan perilaku gelombang di wilayah pesisir dan pelabuhan. Model numerik yang paling dikenal adalah model gelombang tipe Boussinesq (Madsen et al., 1991) dan model gelombang non-hidrostatik (misalnya Stelling dan Zijlema, 2003). Model Ini menyelesaikan bidang gelombang pada skala waktu dari masing-masing gelombang dan mampu melakukannya memodelkan evolusi non-linear dari bidang gelombang secara akurat.

Solusi komputasi untuk mengikuti telah diimplementasikan dalam kode SWASH, baru-baru ini dikembangkan di Delft University oleh penulis. Ini menggunakan metode beda hingga pada grid lengkung orthogonal yang terhuyung-huyung dari persamaan yang mengatur. Prinsip-prinsip dasar dari pendekatan ini, serta alasan yang mendasari untuk lokasi yang mengejutkan yang berkaitan dengan komponen konservasi dan kecepatan massal akan dikejar di sini. Demi kejelasan, prinsip-prinsip ini akan dijelaskan dengan menggunakan persamaan-persamaan air dangkal satu dimensi dan kedalaman dalam bentuk non-konservatif, sebagai berikut,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{q_b}{h} \frac{\partial (\zeta - d)}{\partial x} + c_f \frac{u|u|}{h} \\ = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t}, \quad w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (2.27)$$

Perpanjangan ke kerangka dua dimensi jemu tetapi sebaliknya langsung. Selanjutnya, diskritisasi dalam arah vertikal di mana domain komputasi dibagi menjadi sejumlah tetap-lapisan berikut-medan, yang disebut kasus multi-layered, secara luas dibahas dalam Zijlema dan Stelling (2005, 2008).

Kami menganggap jaringan 1D reguler $\{x_i + 1/2 \mid x_i + 1/2 = i\Delta x, i = 0, \dots, I\}$ dengan i jumlah sel grid dan Δx panjang sel grid. Lokasi pusat sel diberikan oleh $x_i = (x_{i-1/2} + x_{i+1/2}) / 2$. Sebuah konvensi grid terhuyung digunakan di mana komponen kecepatan u dan elevasi permukaan ζ terletak di $i + 1/2$ dan i , masing-masing. Grid terhuyung menghindari de-coupling dari yang tidak diketahui, yang sebaliknya dapat menyebabkan osilasi non-fisik dalam grid non-terhuyung (colocated). Variabel d , q_b , v_t , w_b dan w_s semuanya terletak di i . Sebagai aconsequence, kedalaman air diberikan pada poin i .

Untuk integrasi waktu skema leapfrog eksplisit dalam hubungannya dengan urutan kedua langkah waktu eksplisit untuk adveksi, langkah waktu eksplisit langkah pertama untuk istilah viskositas dan langkah waktu implisit urutan pertama untuk bagian non-hidrostatik digunakan. Skema ini seperti yang diusulkan oleh Hansen (1956) mempekerjakan mengejutkan dalam waktu. Kecepatan u dievaluasi pada setengah langkah waktu $(n + 1/2) \Delta t$, sedangkan

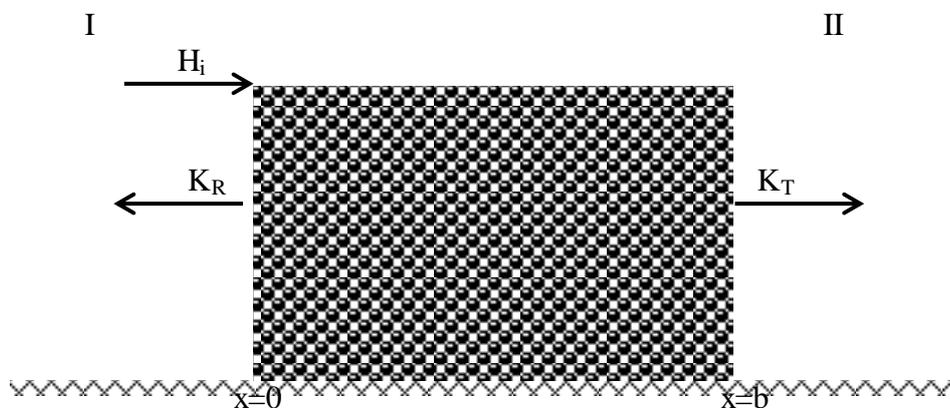
elevasi permukaan pada langkah sepanjang waktu $(n + 1)$ witht, dengan thet langkah waktu dan n menunjukkan tingkat waktu $t_n = n\Delta t$. Varian skema leapfrog ini berbagi dengan skema lompatan klasik keuntungan dari akurasi orde kedua dalam waktu dan tidak ada redaman gelombang. Selain itu, membutuhkan lebih sedikit penyimpanan dan membuat algoritma mudah diterapkan.

II.2 Breakwater

Interaksi gelombang permukaan laut dengan pemecah gelombang gundukan permeabel sangat kompleks. Secara umum, gelombang datang sebagian ditransmisikan melalui atau di atas struktur berpori, sebagian menghilang dengan mematahkan lereng kasar dan oleh gesekan turbulen di dalam pemecah gelombang, dan sebagian dipantulkan. Refleksi gelombang dari pemecah gelombang (seperti batangan pasir dan dinding laut) biasanya diukur dengan berbagai sensor tekanan atau pengukur ketinggian permukaan yang digunakan ke arah laut dari reflektor (misalnya, Thornton dan Calhoun 1972; Mansard dan Funke 1980; Yokoki et al. 1992). Interpretasi pengukuran ini rumit karena fakta bahwa gelombang yang dipantulkan dan fasa digabungkan (Dickson,1994).

Pemecah gelombang dibangun di sepanjang garis pantai untuk mengurangi energi gelombang datang sehingga mengurangi erosi garis pantai (Sidek et al,2007). Energi gelombang menghilang di tanggul pemecah gelombang yang terendam setelah transmisi dengan proses gesekan, pemecah gelombang atau refleksi gelombang dapat diukur dengan menentukan koefisien transmisi gelombang, KT .

Koefisien transmisi gelombang didefinisikan sebagai rasio dari tinggi gelombang yang ditransmisikan (H_t) ke arah breakwater terhadap tinggi gelombang yang terjadi (H_i) ke arah laut dari air hujan. Dalam pemodelan fisik, nilai KT adalah parameter untuk menggambarkan keefektifan pemecah gelombang yang terendam air rendah untuk melemahkan gelombang. Semakin besar nilai koefisien transmisi gelombang yang diperoleh, semakin kecil adalah redaman gelombang dan sebaliknya. Untuk rentang di mana $0 < KT < 1$, nilai nol akan menyiratkan bahwa tidak ada transmisi seperti dalam kasus pemecah gelombang tinggi atau impermeable. Sementara, nilai satu akan menyimpulkan bahwa ada transmisi lengkap seperti dalam kasus tidak adanya pemecah gelombang.



Gambar 2. 4 Model Tiruan *Breakwater* (Sollitt,1976)

Efek dari rangkaian gelombang datang terus menerus adalah untuk secara terus-menerus membangkitkan komponen-komponen baru dari masing-masing mode ketika komponen lama meluruh. Situasi kuasi-mapan tercapai sehingga tidak ada akumulasi energi bersih dalam breakwater. Kemudian semua komponen dari

setiap mode eigen yang merambat dalam satu arah dapat ditumpangkan untuk menghasilkan komponen tunggal untuk setiap mode. Prinsip superposisi ini berlaku juga untuk rangkaian gelombang yang dipantulkan dan ditransmisikan. Hasil bersih dari penempatan pemecah gelombang yang permeabel dalam rangkaian gelombang monokromatik dengan tinggi gelombang konstan adalah menghasilkan mode n pada masing-masing berikut ini; rangkaian gelombang yang dipantulkan, rangkaian gelombang yang ditransmisikan, dan dua rangkaian gelombang yang merambat dalam arah yang berlawanan di bagian dalam pemecah gelombang (Sollitt,1976).

Hasil ini menyimpulkan spesifikasi medan kecepatan dan tekanan di masing-masing dari dua wilayah yang diinginkan. Meskipun struktur ekspresi yang menggambarkan bidang-bidang ini telah ditentukan, setiap ekspresi mengandung amplitudo yang tidak diketahui yang masih harus dievaluasi. Sebelum melanjutkan dengan evaluasi ini. Sangat berguna untuk merangkum solusi di setiap wilayah (Sollitt,1976).

Wilayah I :

$$\Phi_I = \Phi_I + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{rn}$$

$$\Phi_i = i a_i e^{-ik_1 x} \frac{\sigma c h k_1 (h+z)}{k_1 \operatorname{sh} k_1 h} e^{i\sigma t}$$

$$\Phi_{rn} = i a_{rn} e^{ik_n x} \frac{\sigma c h k_n (h+z)}{k_n \operatorname{sh} k_n h} e^{i\sigma t}$$

$$\frac{P_I}{\rho} = -i\sigma\Phi_I - gz$$

$$\sigma^2 = gk_n thk_n h \quad (2.28)$$

Wilayah II

$$\Phi_{II} = \Phi_{II} + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{tn}$$

$$\Phi_{tn} = i a_{tn} e^{-ik_n(x-b)} \frac{\sigma}{k_n} \frac{ch k_n (h+z)}{sh k_n h} e^{i\sigma t}$$

$$\frac{P_{II}}{\rho} = -i\sigma\Phi_{II} - gz$$

$$\sigma^2 = gk_n thk_n h \quad (2.29)$$

Teori gelombang linier berlaku di wilayah I dan II. Seperti dalam derivasi, ekspresi untuk potensial kecepatan dan persamaan dispersi dalam media granular direduksi menjadi teori gelombang linear untuk kondisi batas $S = 1$, $f = 0$.