

*Skripsi Geofisika*

**PEMODELAN TRANSFORMASI GELOMBANG LAUT DI PANTAI  
DELTA MUARA SUNGAI SADDANG KABUPATEN PINRANG**

**Disusun dan diajukan oleh**

**MUHAMMAD NUR MUHAIMIN**

**H061181501**



**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2022**

**HALAMAN JUDUL**

**PEMODELAN TRANSFORMASI GELOMBANG LAUT DI PANTAI  
DELTA MUARA SUNGAI SADDANG KABUPATEN PINRANG**

**SKRIPSI**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
Pada Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin*

**OLEH:**

**MUHAMMAD NUR MUHAIMIN  
H0611813501**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PEMODELAN TRANSFORMASI GELOMBANG DI PANTAI DELTA  
MUARA SUNGAI SADDANG KABUPATEN PINRANG**

**Disusun dan diajukan oleh**

**MUHAMMAD NUR MUHAIMIN**

**H061181501**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas  
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin  
pada November 2022  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

**Menyetujui,**

**Pembimbing Utama**

Dr. Sakka, M.Si.  
NIP.196410251991031002

**Pembimbing Pertama**

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

**Mengetahui,**

**Ketua Departemen Geofisika**



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Nur Muhaimin

NIM : H061181501

Departemen : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya yang berjudul:

**“PEMODELAN TRANSFORMASI GELOMBANG LAUT DI PANTAI  
DELTA MUARA SUNGAI SADDANG KABUPATEN PINRANG”**

merupakan hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan penelitian saya sendiri, kecuali arahan Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, November 2022

Yang Menyatakan,



**Muhammad Nur Muhaimin**

## SARI BACAAN

Gelombang laut merupakan fenomena alam yang dapat dibangkitkan oleh gerakan angin, gempa, letusan gunung api, gerakan kapal, gaya tarik benda angkasa. Gelombang yang menjalar menuju pantai memiliki karakteristik tertentu yang dapat ditentukan dengan menggunakan metode pemodelan numerik. Pada penelitian ini metode yang digunakan yakni metode SWAN (Simulating Wave Nearshore) untuk menganalisis tinggi dan periode gelombang serta model penjarannya. Penelitian ini menggunakan input berupa kecepatan angin dengan nilai 8 m/s dan 11 m/s yang menjalar konstan dengan arah datang dari Barat, Barat Daya dan Barat Laut. Penelitian ini memodelkan penjaran gelombang dengan menggunakan perangkat lunak Delft3D. Gelombang yang terjadi ketika angin dari Barat Daya cenderung menjalar konvergen menuju Pantai Delta, namun ketika angin dari Barat cenderung divergen menuju Pantai Delta. Sedangkan untuk arah angin dari Barat Laut penjarannya Tegak Lurus menuju Pantai. Tinggi gelombang yang dibangkitkan oleh kedua nilai kecepatan angin tersebut berkisar antara 1-2 m dengan periode gelombang 3-5 detik. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi pemerintah dan warga setempat terkait pengelolaan ekosistem laut untuk mendukung pembangunan berkelanjutan di daerah penelitian.

Kata Kunci : Karakteristik Gelombang, SWAN, *Delft3D*.

## ABSTRACT

Ocean waves are natural phenomena that can be generated by wind movements, earthquakes, volcanic eruptions, ship movements, and the gravitational pull of celestial bodies. Waves that propagate toward the coast have certain characteristics that can be determined using numerical modeling methods. In this study, the method used is the SWAN (Simulating Wave Nearshore) method to analyze the height and period of the wave and its propagation model. This study uses input in the form of wind speed with a value of 8 m/s and 11 m/s which spreads constantly with the direction coming from the West, Southwest and Northwest. This research modeled wave propagation using Delft3D software. Waves that occur when the wind from the southwest tends to converge convergently towards the Delta Coast, but when the wind from the west tends to diverge towards the Delta Coast. As for the wind direction from the Northwest the propagation is perpendicular to the beach. The wave height generated by the two wind speed values ranges from 1-2 m with a wave period of 3-5 seconds. This research is expected to be an input for the government and local residents regarding the management of marine ecosystems to support sustainable development in the research area.

Keywords : Wave Characteristics, SWAN, *Delft3D*.

## Kata Pengantar



*Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh*

*Alhamdulillahirabbil'alamiin.* Puji Syukur penulis panjatkan kepada *الله* *Subhanahu Wa Ta'ala.* Tuhan semesta alam yang dengan segala Rahman dan Rahim-Nya, yang menciptakan alam semesta yang sangat luas ini dan dengan akal dan pikiran yang diberikan oleh Yang Maha Kuasa sehingga penulis dapat memikirkan untuk meneliti salah satu ciptaannya dan dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “**Pemodelan Transformasi Gelombang Laut Di Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kabupaten Pinrang**”. Shalawat dan Salam senantiasanya tercurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad *Shalallahu 'Alaihu Wassalam.* Nabi akhir zaman yang sudah menjadi teladan Umat, dalam berakhlak, berusaha dan berdoa. Dalam penulisan skripsi ini tentu tidak lepas dari hambatan dan kesulitan, namun berkat Ridho Sang Maha Kuasa, penyusunan skripsi ini dapat selesai walau memiliki kendala yang tiada hentinya datang menerpa. Pada kesempatan ini izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih kepada Orang Tua tercinta Bapak **Rahmun Gidin Nur** dan Ibu **Harni Kampunu**. Serta saudara-saudara penulis yakni **Imas Nur Tiarani, Muhammad Nur Khalil, Fatimah Nur Illiyina** dan **Muhammad Nur Munadhil** yang selalu memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang tulus tiada hentinya untuk penulis.

Dalam kesempatan ini pula penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada berbagai pihak atas bantuan, nasihat, didikan dan bimbingan yang diberikan kepada penulis selama ini. Untuk itu dengan tulus hati penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada orang tua saya. Bapak **Rahmun Gidin Nur** dan Ibu **Harni Kampunu** (Cinta Pertama dalam hidup dan akan tetap menjadi orang yang paling saya cintai) yang telah memberikan banyak pelajaran ilmu yang berharga dan memberikan bekal sebelum keluar dari rumah. Penulis juga ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada saudara-saudara penulis yakni : **Imas Nur Tiarani,**

**Muhammad Nur Khalil, Fatimah Nur Illiyina, dan Muhammad Nur Munadhil** yang selalu memberikan banyak masukan dan support dalam penyelesaian penulisan skripsi ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada nenek-nenek saya (**Nenek Hj. St. Aminah, Nenek Soleh, Nenek Jungayya, Nenek Ento, Nenek Mullis, Nenek** dan kakek-kakek saya (**Kakek Gidin Nur, Kakek La Huta, Kakek La Kampunu**) Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada om saya **Bakri Gidin Nur** yang selalu memberikan nasihat tentang agama dan pelajaran mengenai kehidupan agar tidak salah menapaki jalan. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada **Dr. Bahrhun Gidin Nur, Sp. Bd., Prof. Dr. Sjafaraenan Gidin Nur, M.Si., Kartini Gidin Nur, Syahrhun Gidin Nur, Alimin Gidin Nur, Nasrun Gidin Nur, Norma Gidin Nur, ...** yang telah memberikan masukan yang banyak kepada penulis dan senantiasa memberikan kasih sayang yang sangat banyak kepada penulis.

2. Bapak **Dr. Sakka, M.Si** selaku pembimbing utama dalam melakukan penelitian ini. Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih atas ilmu, bimbingan dan segala hal yang diberikan kepada penulis selama menjadi salah satu mahasiswa bimbingan.
3. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku pembimbing pertama dalam melakukan penelitian ini. Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih atas ilmu dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis.
4. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si.,M.Si.,** dan Bapak **Saaduddin, M.Sc.,** selaku dosen penguji. Terima kasih akan ilmu dan masukan yang telah diberikan kepada penulis.
5. Kepada saudara-saudara namun tak sedarah saya dari **Unit Kegiatan Pers Mahasiswa, Grel Markusisme, Reza Siddiq, Hendra, Kadri, Don Pammi, Suleman, Fajar, Eva, Terbul, Aspar, Iman, Edi** dan kepada yang telah lebih dahulu masuk kedalam jurang ilmu yang telah diselami yang membuat kita lupa dan takjub akan keindahan Ruang Tempo yang membuat kita muntah dan terngiang-ngiang dengan memar yang disebabkan oleh nyamuk-nyamuk yang tak berdosa.
6. Kepada kakak-kakak senior dan junior-junior saya dari **Society of**

**Petroleum Engineers** yang telah menjadi penyemangat dan memberi warna kepada masa perkuliahan saya.

7. Kepada rekan-rekan yang belum terlalu akrab dari **Liga Film Mahasiswa** yang kebanyakan dari Ilmu Komunikasi.
8. Kepada rekan-rekan ketua ukm yang ada di Universitas Hasanuddin.
9. Kepada teman-teman saya yang sering menghabiskan waktu bersama di pace yang sering memakan mie yang telah direbus terlalu lama dan butiran beras yang telah diolah. **Toraja, Sukamaju, Mabo Bau-Bau, Kemal kemem, Lago Gopal Janggo, Ipul, Andri, Yusuf, Wotu, Uccang, Limbat, Yahya, Yansen, Mas Dedi Sangihe** yang banyak menemani penulis selama di kampus.
10. Kepada teman-teman saya **Mbo Wil, Zefanya, Barru, Fya, Jihan, Marni Backtothe Bone, Irma, Cinu Langnga, Nenek Ayu, Dhea Luwu, Oca, Sri, Aini Wajo, Epe, Fira, Bu Press Fhaika, Nilam Labbu, Yeni Tobelco, Onding, Jojo, Fiskah, Dilla, Banne, Lekko, Mute, dan lain-lain**, yang sudah membantu selama di kampus.
11. Kepada rekan-rekan KKNT Pallangga Gowa 7 Gelombang 107 terkhusus **Acculu, Andika, Unni, Aco Briges sang Penguasa Sastra**, dan rekan-rekan lainnya.
12. Dan terkhusus seseorang yang selalu memberikan support dan senantiasa menemani penulis dalam melakukan berbagai hal, tempat penulis untuk menceritakan segala keluh kesah penulis serta salah seorang yang penulis cintai **Riska Kurniasari, S.Ip, Soon M.Ip.**, yang telah memberikan banyak pelajaran dan warna yang telah memenuhi kehidupan penulis. Semoga berkah dan gelarnya selalu diberkahi dan diberikan kelimpahan ilmu dan rahmat dari yang maha kuasa yang tiada hentinya.

Penulis telah mengerahkan segala pemahaman dan kemampuan penulis dalam proses penyusunan skripsi ini hingga selesai. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis.

## Daftar Isi

<b>Halaman Sampul</b> .....	<b>i</b>
<b>Lembar Pengesahan</b> .....	<b>iv</b>
<b>Daftar Isi</b> .....	<b>v</b>
<b>Daftar Gambar</b> .....	<b>vii</b>
<b>Daftar Tabel</b> .....	<b>ix</b>
<b>Bab I Pendahuluan</b> .....	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Ruang Lingkup.....	2
I.3 Rumusan Masalah .....	2
I.4 Tujuan Penelitian .....	2
<b>Bab II Tinjauan Pustaka</b> .....	<b>3</b>
II.1 Gelombang Laut .....	3
II.2 Gelombang Angin.....	4
II.3 Simulasi Gelombang Dekat Pantai .....	6
II.4 Deskripsi Spektral Gelombang Angin .....	10
II.5 Perambatan Energi Gelombang .....	13
II.5.1 Kinematika Gelombang .....	14
II.5.2 Persamaan Keseimbangan Aksi Spektral.....	14
II.6 Spektrum JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) .....	15
<b>Bab III Metodologi Penelitian</b> .....	<b>18</b>
III.1 Lokasi Penelitian .....	18
III.2 Tahapan Penlitian .....	18
III.3.1 Data Penelitian.....	18
III.3.2 Pengolahan Data .....	19
III.3 Diagram Alir.....	20
<b>Bab IV Hasil dan Pembahasan</b> .....	<b>21</b>
IV.1.1 Medan Angin Harian Dari Tahun 2016 – 2021.....	21
IV.1.2 Profil Kedalaman Laut .....	24
IV.1.3 Transformasi Gelombang dari Arah Barat Daya.....	24
IV.1.4 Transformasi Gelombang dari Arah Barat .....	28
IV.1.5 Transformasi Gelombang dari Arah Barat Laut.....	31

IV.1.6 Perubahan Tinggi Gelombang.....	31
<b>Bab V Kesimpulan dan Saran.....</b>	<b>35</b>
V.1 Kesimpulan.....	35
V.2 Saran .....	36
Daftar Pustaka .....	37

## Daftar Gambar

<b>Gambar 2.1</b> Definisi 'gelombang' dalam catatan waktu elevasi permukaan dengan <i>zero-crossing</i> ke bawah (panel atas) atau <i>zero-crossing</i> ke atas (panel bawah).....	4
<b>Gambar 2.2</b> Definisi tinggi gelombang dan periode gelombang dalam catatan waktu elevasi permukaan (gelombang didefinisikan dengan <i>zero-crossing</i> ke bawah).....	5
<b>Gambar 2.3.</b> Ilustrasi spektrum gelombang 1D dan 2D (Holthuijsen, 2007).....	11
<b>Gambar 2.4</b> Pengamatan spektrum gelombang selama <i>Joint North Sea Wave Project</i> (JONSWAP) (Houlthuijsen, 2007) .....	15
<b>Gambar 3.1</b> Lokasi Penelitian .....	16
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Alir Penelitian.....	19
<b>Gambar 4.1</b> Windrose data angin pada tahun 2016.....	20
<b>Gambar 4.2</b> Windrose data angin pada tahun 2017.....	20
<b>Gambar 4.3</b> Windrose data angin pada tahun 2018.....	21
<b>Gambar 4.4</b> Windrose data angin pada tahun 2019.....	21
<b>Gambar 4.5</b> Windrose data angin pada tahun 2020.....	21
<b>Gambar 4.6</b> Windrose data angin pada tahun 2021.....	22
<b>Gambar 4.7</b> Keterangan kecepatan angin pada <i>Windrose</i> .....	22
<b>Gambar 4.8</b> Histogram Distribusi Kecepatan Angin pada Tahun 2016-2021.....	23
<b>Gambar 4.9</b> <i>Windrose</i> Data Kecepatan Angin Maksimum dari Tahun 2016-2021 .....	24
<b>Gambar 4.10</b> Profil Kedalaman Laut.....	24
<b>Gambar 4.11</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 8 m/5 dengan arah angin 225° dari utara .....	25
<b>Gambar 4.12</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 8 m/s dengan arah angin 225° dari utara .....	25
<b>Gambar 4.13</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 225° dari utara .....	26
<b>Gambar 4.14</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 225° dari utara .....	26
<b>Gambar 4.15</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 8 m/s dengan arah rambat angin 225° dari utara.....	26
<b>Gambar 4.16</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 11 m/s dengan arah rambat angin 225° dari utara.....	27
<b>Gambar 4.17</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 8 m/s dengan arah angin 270° dari utara .....	28
<b>Gambar 4.18</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 8 m/s dengan arah angin 270° dari utara .....	28

<b>Gambar 4.19</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 270° dari utara .....	<b>29</b>
<b>Gambar 4.20</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 270° dari utara .....	<b>29</b>
<b>Gambar 4.21</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 8 m/s dengan arah rambat angin 270° dari utara.....	<b>29</b>
<b>Gambar 4.22</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 11 m/s dengan arah rambat angin 270° dari utara.....	<b>30</b>
<b>Gambar 4.23</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 8 m/s dengan arah angin 315° dari utara .....	<b>31</b>
<b>Gambar 4.24</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 8 m/s dengan arah angin 315° dari utara .....	<b>31</b>
<b>Gambar 4.25</b> Spektrum tinggi gelombang signifikan dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 315° dari utara .....	<b>31</b>
<b>Gambar 4.26</b> Spektrum periode gelombang dengan kecepatan angin 11 m/s dengan arah angin 315° dari utara .....	<b>32</b>
<b>Gambar 4.27</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 8 m/s dengan arah rambat angin 315° dari utara.....	<b>32</b>
<b>Gambar 4.28</b> Arah Perambatan Gelombang dengan input kecepatan angin 11 m/s dengan arah rambat angin 315° dari utara.....	<b>32</b>
<b>Gambar 4.29</b> Lokasi pengambilan grafik tinggi gelombang dari titik A-A' sepanjang 176 km .....	<b>33</b>
<b>Gambar 4.30</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 8 m/s dengan arah datang angin 225° dari utara.....	<b>34</b>
<b>Gambar 4.31</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 8 m/s dengan arah datang angin 270° dari utara.....	<b>34</b>
<b>Gambar 4.32</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 8 m/s dengan arah datang angin 315° dari utara.....	<b>34</b>
<b>Gambar 4.33</b> Profil kedalaman laut pada lokasi pengambilan grafik tinggi gelombang dari titik A-A' .....	<b>34</b>
<b>Gambar 4.34</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 11 m/s dengan arah datang angin 225° dari utara .....	<b>35</b>
<b>Gambar 4.35</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 11 m/s dengan arah datang angin 270° dari utara .....	<b>35</b>
<b>Gambar 4.36</b> Perubahan tinggi gelombang dari laut lepas, untuk input kecepatan angin 11 m/s dengan arah datang angin 315° dari utara .....	<b>35</b>
<b>Gambar 4.37</b> Profil kedalaman laut pada lokasi pengambilan grafik tinggi gelombang dari titik A-A' .....	<b>36</b>

## Daftar Tabel

<b>Tabel 4.1</b> Distribusi angin dari tahun 2016-2021 .....	<b>23</b>
<b>Tabel 4.2</b> Frekuensi Distribusi Angin Periode 2016 - 2021 .....	<b>23</b>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Gelombang laut adalah pergerakan naik turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva sinusoidal. Pada umumnya gelombang laut disebabkan oleh tiupan angin baik secara langsung atau pun tidak langsung. Pembentukan gelombang umumnya terjadi di daerah perairan lepas, saat gelombang terbentuk gelombang tersebut akan bergerak dalam jarak yang panjang melintasi laut, dengan hanya kehilangan sedikit energinya (Wakkary, Jasir, and Dundu 2017).

Metode penelitian yang telah digunakan untuk melihat karakteristik dari sebuah gelombang sudah banyak dilakukan seperti metode SMB (Sverdrup, Munk, dan Breitschneider), metode Wilson, metode Jonswap, metode Donelan, metode CEM (*Coastal Engineering Manual*), metode SWAN (*Simulating Wave Nearshore*) dan lain-lain. Kondo, Sakka, and Suriamihardja (2015) telah melakukan penelitian mengenai karakteristik gelombang laut pada Pantai Delta Muara Sungai Saddang menggunakan Metode CEM (*Coastal Engineering Manual*). Penelitian tersebut Metode CEM digunakan untuk menghitung tinggi dan arah ombak laut lepas dan transformasi ombak yang terjadi.

Penelitian yang dilakukan untuk melihat karakteristik gelombang menggunakan model numerik. Model numerik yang sudah banyak dikenal dan digunakan dalam rekayasa pantai diantaranya adalah SWAN. Metode ini adalah akronim dari *simulating wave nearshore* dan merupakan model gelombang untuk perairan dangkal. SWAN menggambarkan evolusi gelombang di daerah pantai dengan input angin, dissipasi energi, interaksi antar gelombang dan perubahan parameter gelombang ( $H$ ,  $T$ ,  $\alpha$ ) karena variasi kedalaman air dan pengaruh arus. Perubahan spektrum kerapatan aksi gelombang ini dinyatakan dalam persamaan kesetimbangan aksi gelombang dalam koordinat kartesian (Booij, Holthuijsen, and Hernandez, 1997).

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian untuk memeriksa kemampuan dan keakuratan SWAN dalam memodelkan gelombang diperairan dangkal. Hal ini ditunjukkan dengan beberapa hasil verifikasi perhitungan SWAN terhadap

pengukuran dilapangan, Booij et al. (2004) telah membandingkan hasil perhitungan parameter gelombang dengan hasil pengukuran menggunakan “*waverider buoy*” dan hasil perhitungan menggunakan model gelombang *MIKE 21* di pantai utara Frissian, Jerman. Berdasarkan penelitian ini ditunjukkan bahwa SWAN memberikan hasil yang akurat terhadap kedua pembanding tersebut.

Perangkat lunak *Delft3D* menggunakan metode SWAN dalam merumuskan dan mensimulasikan karakteristik gelombang. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Delft3D* guna mensimulasikan tinggi gelombang, periode gelombang dan arah rambat gelombang yang terjadi di Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kabupaten Pinrang.

## **I.2 Ruang Lingkup**

Penelitian ini dibatasi menggunakan data sekunder berupa data batimetri (Gebco08), data angin (NASA), data pasang surut (TPX0 7.2 Global Inverse Tide Model), dan data garis pantai (*World Vector Shoreline*). Pada penelitian ini menggunakan metode SWAN dengan bantuan perangkat lunak *Delft3D*. Penelitian ini difokuskan pada pemodelan transformasi gelombang untuk mengetahui tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, dan arah penjarangan gelombang.

## **I.3 Rumusan Masalah**

Adapun Rumusan Masalah penelitian yaitu:

1. Bagaimana tinggi gelombang dan periode yang terjadi di Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kab. Pinrang?
2. Bagaimana model penjarangan gelombang yang menuju ke Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kab. Pinrang?

## **I.4 Tujuan**

Adapun Tujuan penelitian yaitu:

1. Menentukan tinggi gelombang dan periode yang terjadi di Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kab. Pinrang.
2. Memodelkan penjarangan gelombang yang menuju Pantai Delta Muara Sungai Saddang Kab. Pinrang.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 Gelombang Laut**

Gelombang laut merupakan sebuah fenomena yang terjadi akibat adanya gerakan angin. Gelombang laut dibangkitkan oleh angin, walaupun faktor lain yang membangkitkan gelombang seperti aktifitas seismik di dasar laut (gempa), letusan gunung api, gerakan kapal, gaya tarik benda angkasa (bulan dan matahari). Gelombang juga dapat terjadi akibat perbedaan tingkat densitas pada dua lapisan di laut. Perbedaan tingkat densitas itupun disebut gelombang dalam (*internal waves*) (Mulyabakti, dkk., 2016), Azis 2006, dan Kurniawan, dkk., 2011).

Hakekatnya fenomena gelombang laut menggambarkan transmisi dari energi dan momentum. Gelombang laut selalu menimbulkan sebuah ayunan air yang bergerak tanpa henti-hentinya pada lapisan permukaan laut dan jarang dalam keadaan sama sekali diam. Hembusan angin sepoi-sepoi pada cuaca yang tenang sekalipun sudah cukup untuk dapat menimbulkan riak gelombang. Sebaliknya dalam keadaan di mana badai yang besar dapat menimbulkan suatu gelombang besar yang dapat mengakibatkan suatu kerusakan di daerah pantai.

Jenis-jenis gelombang ditinjau dari gaya pembangkitnya terdapat 3 jenis yaitu (Kurniawan, Habibie, and Suratno 2011):

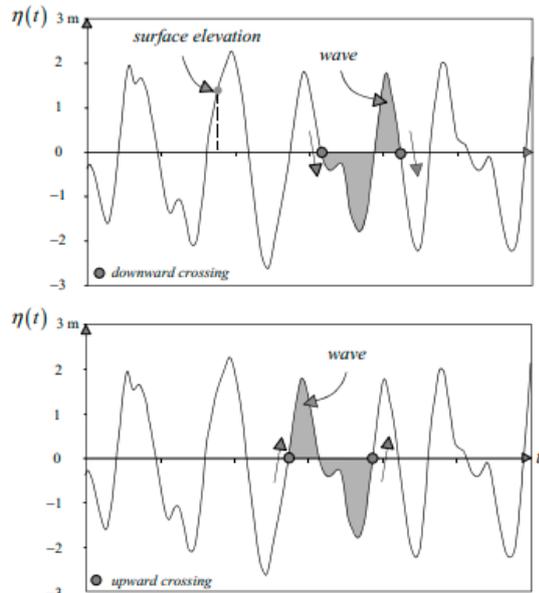
1. Gelombang angin, merupakan gelombang yang disebabkan oleh tiupan angin di permukaan laut. Gelombang ini mempunyai periode yang sangat bervariasi, ditinjau dari frekuensi kejadiannya, gelombang angin merupakan gelombang yang paling dominan terjadi di laut.
2. Gelombang pasang surut (Pasut), merupakan gelombang yang disebabkan oleh gaya tarik bumi terhadap benda-benda langit, benda langit yang paling besar pengaruhnya adalah Matahari dan Bulan, gelombang pasut lebih mudah diprediksi karena terjadi secara periodik mengikuti sesuai peredarannya.
3. Gelombang tsunami, gelombang yang diakibatkan oleh gempa bumi tektonik atau letusan gunung api di dasar laut, tsunami merupakan gelombang yang sangat besar dan tinggi gelombangnya dapat mencapai lebih dari 10 meter.

#### **II.2 Gelombang Angin**

Gelombang angin, merupakan gelombang yang disebabkan oleh tiupan angin di permukaan laut. Gelombang ini mempunyai periode yang sangat bervariasi,

ditinjau dari frekuensi kejadiannya, gelombang angin merupakan gelombang yang paling dominan terjadi di laut (Kurniawan, Habibie, and Suratno 2011). Tinggi gelombang ditentukan oleh kecepatan angin, durasi angin, dan panjang daerah dimana angin berhembus dengan kecepatan dan arah yang konstan (*fetch*). Tinggi gelombang semakin tinggi jika kecepatan angin semakin tinggi, durasi angin semakin lama dan panjang *fetch* semakin panjang.

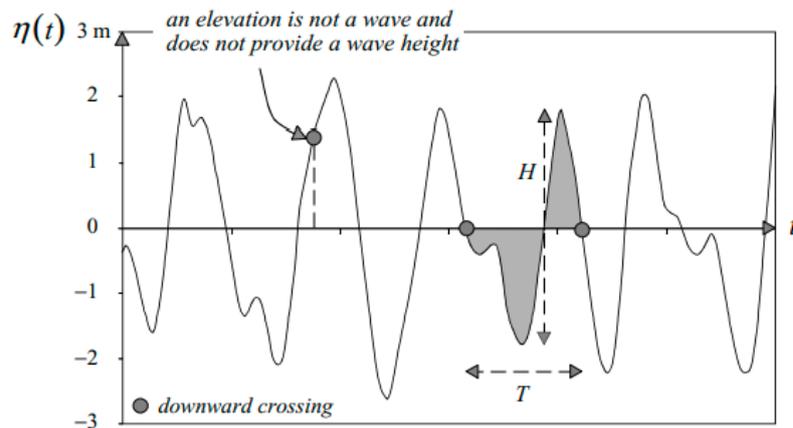
Elevasi permukaan laut adalah elevasi seketika dari permukaan laut relatif terhadap beberapa tingkat referensi. Sedangkan, gelombang adalah profil elevasi permukaan laut antara dua perlintasan nol elevasi yang berurutan ke bawah (nol = rata-rata elevasi permukaan laut, lihat Gambar 2.1). Alternatif untuk mendefinisikan gelombang dimungkinkan, misalnya, profil antara dua persimpangan nol ke atas yang berurutan (lihat Gambar 2.1) (Holthuijsen, 2007).



**Gambar 2.1** Definisi 'gelombang' dalam catatan waktu elevasi permukaan laut dengan *zero-crossing* ke bawah (panel atas) atau *zero-crossing* ke atas (panel bawah). Sumber : Holthuijsen (2007).

Elevasi permukaan laut, dilambangkan sebagai  $\eta(t)$ ,  $\eta(t)$  merupakan proses Gaussian, dikarenakan karakteristik gelombang bergerak dengan statistik yang simetris, pergerakan gelombang bergerak ke bawah atau pergerakan gelombang ke atas didefinisikan sebagai hal yang serupa. Dalam perkiraan visual ketinggian puncak relatif terhadap palung sebelumnya dianggap sebagai tinggi gelombang. Selain itu, dalam gelombang pecah, bagian depan (*curam*), yang paling relevan untuk proses pecahnya, termasuk dalam definisi dengan penyeberangan ke bawah (dalam kondisi seperti itu, gelombang tidak simetris dan perbedaan antara definisi

gelombang dengan penyeberangan *zero-up* atau *zero-down* menjadi relevan) (Gambar 2.2). Karakterisasi gelombang dalam rekaman gelombang didasarkan pada rata-rata semua tinggi gelombang dan periode yang terjadi dalam rekaman. Ini membutuhkan durasi rekaman yang cukup pendek untuk menjadi stasioner tetapi juga cukup lama untuk mendapatkan rata-rata yang cukup andal. Standar yang umum digunakan di laut adalah 15–30 menit (Holthuijsen, 2007).



**Gambar 2.2** Definisi tinggi gelombang dan periode gelombang dalam catatan waktu elevasi permukaan laut (gelombang didefinisikan dengan *zero-crossing* ke bawah).  
Sumber : Holthuijsen (2007).

### II.3 Simulasi Gelombang Dekat Pantai

Rekayasa pantai dan lepas pantai seringkali membutuhkan informasi yang detail mengenai kondisi gelombang pada suatu lokasi tertentu. Munculnya beragam model numerik untuk memprediksi gelombang dalam penjarannya menuju pantai diakibatkan pengambilan data yang sering kurang lengkap. Sejarah perkembangan model gelombang dimulai sejak tahun 1947 oleh Svedrup, Munk, dan Breitschneider dalam (Jin and Ji 2001) memperkenalkan formula empirik untuk memperkirakan tinggi gelombang signifikan di laut dan memperkenalkan konsep tinggi gelombang signifikan, selanjutnya model gelombang terus mengalami perkembangan dan semakin beragam. Model empirik yang cukup terkenal adalah *Revised Shore Protection Manual* (RSPM) model yang merupakan hasil pengembangan Hurdle dan Strive (1989) yang dijelaskan Andrew (1999) terhadap formula empiris dari *Shore Protection Manual* (SPM) (Sujantoko 2009).

Pendekatan yang lain adalah berdasarkan persamaan kerapatan energi gelombang. Pendekatan dengan spektrum kerapatan energi gelombang didasarkan pada persamaan Eulerian. Model spektrum ini telah banyak dikembangkan oleh

beberapa ahli, dan salah satunya telah dikembangkan untuk memperkirakan tinggi gelombang di perairan dangkal Jin and Ji (2001). Model spektra ini mampu mempertimbangkan pengaruh refraksi gelombang, pembangkitan gelombang, kehilangan energi gelombang, dan interaksi antar gelombang baik di perairan dalam maupun di perairan dangkal yang diteliti oleh Booij, Holthuijsen, and Hernandez (1997). Meskipun demikian model spektra ini tidak melibatkan pengaruh dari difraksi gelombang. Pengaruh dari difraksi gelombang biasanya dihitung menggunakan model mild-slope yang diteliti Holthuijsen, Herman, and Booij (2003) atau dengan model Boussinesq yang diteliti oleh A.Madsen and R.Sorensen (1992). Namun kelemahan dua model yang yang disebutkan terakhir ini adalah tidak bisa digunakan untuk menghitung pembangkitan gelombang, kehilangan energi gelombang, dan interaksi antar gelombang.

Pendekatan dengan spektrum kerapatan energi gelombang telah mengilhami lahirnya model numerik yang mampu memperkirakan tinggi gelombang pada suatu lokasi tertentu berdasarkan data angin, batimetri, dan data lingkungan yang diberikan. Model numerik yang sudah banyak dikenal dan digunakan dalam rekayasa pantai diantaranya adalah SWAN. Model SWAN dikembangkan pertama kali pada tahun 1970 dan digunakan untuk memperkirakan tinggi gelombang dan spektrum gelombang. Model ini pada awalnya tidak melibatkan perhitungan pengaruh interaksi antar gelombang. Kemudian dalam perkembangannya lahir generasi kedua dari model gelombang ini yang melibatkan pengaruh interaksi antar gelombang. Meskipun generasi kedua model gelombang ini mampu memperbaiki hasil simulasi, namun model ini hanya bisa diterapkan pada daerah dengan kondisi angin tertentu saja. Akhirnya sampai saat ini telah dikembangkan generasi ketiga dari model gelombang ini.

Model generasi ketiga ini mampu menyelesaikan masalah diatas dengan mengintegrasikan persamaan energi gelombang dalam model SWAN (The WAMDI Group 1988). Model generasi ketiga ini mampu memperhitungkan pengaruh refraksi (pembelokan), shoaling (pendangkalan), dan blocking (penghambatan) sepanjang penjalaran gelombang (Jin and Ji 2001). Pada awalnya model generasi ketiga ini belum bisa digunakan untuk memperhitungkan pengaruh difraksi gelombang (Booij et al. 2004), namun sampai saat ini telah dilakukan modifikasi, sehingga pada versi terbaru *SWAN cycle III version 40.41* telah

dilibatkan perhitungan difraksi dengan menggunakan persamaan “*mild slope*”.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian untuk memeriksa kemampuan dan keakuratan SWAN dalam memodelkan gelombang di perairan dangkal. Hal ini ditunjukkan dengan beberapa hasil verifikasi perhitungan SWAN terhadap pengukuran di lapangan yang dimuat dalam beberapa penelitian (Sujantoko 2009):

1. Booij et al. (2004) telah membandingkan hasil perhitungan parameter gelombang dengan hasil pengukuran menggunakan “waverider buoy” dan hasil perhitungan menggunakan model gelombang *MIKE 21* di pantai utara Frisian, Jerman. Berdasarkan penelitian ini ditunjukkan bahwa SWAN memberikan hasil yang akurat terhadap kedua pembanding tersebut
2. Ris, L. H. Holthuijsen, and Booij (1999) telah membandingkan parameter gelombang hasil perhitungan menggunakan SWAN dengan hasil pengukuran menggunakan “ACDP sensor buoy” di perairan pantai barat Portugal, di sebelah utara pelabuhan Shines. Hasilnya menunjukkan kesesuaian dan tingkat perbedaan yang bisa diterima.
3. Mai, Ohle, and Zimmermann (1999) menunjukkan bahwa model gelombang HISWA merupakan *steady state model* (Perhitungan gelombang yang menjalar dengan konstan) sedangkan SWAN bisa *steady state* maupun *time dependent* (Perhitungan gelombang yang menjalar sepanjang interval waktu tertentu).

SWAN menggambarkan evolusi gelombang di daerah pantai dengan input angin, dissipasi energi, interaksi antar gelombang dan perubahan parameter gelombang ( $H$ ,  $T$ ,  $\alpha$ ) karena variasi kedalaman air dan pengaruh arus. Perubahan spektrum kerapatan aksi gelombang ini dinyatakan dalam persamaan ketimbangan aksi gelombang yang dalam koordinat kartesian (Booij, Holthuijsen, and Hernandez ,1997) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana

$N = N(t,x,y,\sigma,\theta)$  adalah spektrum kerapatan aksi gelombang;

$t$  = waktu;

$C_x$  dan  $C_y$  = kecepatan penjalaran gelombang dalam arah  $x$  dan  $y$ ;

$C_\sigma$  dan  $C_\theta$  = kecepatan penjalaran gelombang dalam ruang  $\sigma$  dan  $\theta$ ;

$\sigma$  = frekuensi relatif;

$\theta$  = arah gelombang;

$S = S$  total ( $\sigma,\theta$ ) adalah spektral kerapatan energi gelombang.

Suku pertama mewakili perubahan rata-rata waktu kerapatan, suku kedua dan ketiga mewakili penjalaran kerapatan aksi dalam ruang. Suku keempat mewakili frekuensi relatif akibat variasi kedalaman air dan arus dan suku kelima mewakili refraksi gelombang. Suku keenam mewakili kombinasi input angin, efek disipasi gelombang, dan interaksi gelombang non-linear (Sujantoko 2009).

Prinsip dasar perhitungan model SWAN adalah mengintegrasikan persamaan kesetimbangan aksi gelombang dengan menggunakan metode selisih hingga (finite difference method) terhadap 5 variabel yang terkait. Variabel waktu didiskritisasi dengan simple time step  $\Delta t$  untuk proses integrasi. Variabel ruang horizontal didiskritisasi dengan grid rectangular  $\Delta x$  dan  $\Delta y$ , sedangkan variabel spektrum dalam model didiskritisasi dengan constant directional resolution  $\Delta\theta$  dan dengan resolusi frekuensi relatif konstan  $\Delta\sigma/\sigma$ . Skema numerik yang dipilih dalam SWAN didasarkan pada kestabilan, keakuratan dan efisiensi waktu perhitungan. Pada skema ini variable waktu dan ruang tidak saling tergantung satu dengan lainnya (Sujantoko 2009).

Dalam SWAN, gelombang digambarkan dengan spektrum kepadatan aksi gelombang dua dimensi, bahkan ketika fenomena non-linier mendominasi (misalnya, di zona selancar). Alasan penggunaan spektrum dalam kondisi yang sangat non-linier adalah bahwa, bahkan dalam kondisi seperti itu tampaknya mungkin untuk memprediksi dengan akurasi yang masuk akal distribusi spektral momen orde kedua gelombang (walaupun mungkin tidak cukup untuk menggambarkan sepenuhnya gelombang secara statistik). Spektrum yang dipertimbangkan dalam SWAN adalah spektrum kerapatan aksi  $N(\sigma, \theta)$  daripada spektrum kerapatan energi  $E(\sigma, \theta)$  karena dengan adanya arus, kerapatan aksi kekal sedangkan kerapatan energi tidak. Variabel bebas adalah frekuensi relatif (seperti yang diamati dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan arus) dan arah gelombang (arah normal terhadap puncak gelombang dari setiap komponen spektral). Kepadatan aksi sama dengan rapat energi dibagi dengan frekuensi relatif:  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ . Dalam SWAN spektrum ini dapat bervariasi dalam ruang dan waktu (Sujantoko, 2009).

#### **II.4 Deskripsi Spektral Gelombang Angin**

Gelombang yang dihasilkan angin memiliki tinggi dan periode gelombang yang tidak teratur, yang disebabkan oleh sifat angin yang tidak teratur. Karena

sifatnya yang tidak teratur ini, permukaan laut terus berubah, yang berarti pendekatan deterministik untuk menggambarkan permukaan laut tidak layak dilakukan. Di sisi lain, sifat statistik permukaan laut, seperti tinggi gelombang rata-rata, periode dan arah gelombang, tampak bervariasi lambat dalam ruang dan waktu, dibandingkan dengan periode gelombang dan panjang gelombang yang khas. Elevasi permukaan gelombang di laut, di setiap lokasi dan waktu, dapat dilihat sebagai jumlah dari sejumlah besar gelombang harmonik, yang masing-masing telah dihasilkan oleh angin yang bergolak di tempat dan waktu yang berbeda. Oleh karena itu mereka secara statistik independen dalam daerah asal mereka. Menurut teori gelombang linier, mereka tetap independen selama perjalanan mereka melintasi lautan. Di bawah kondisi ini, elevasi permukaan laut pada skala waktu seratus periode gelombang, karakteristik cukup baik digambarkan sebagai proses Gaussian stasioner. Ketinggian permukaan laut pada suatu titik sebagai fungsi waktu dapat digambarkan sebagai (Swan Team, 2017) :

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

$\eta$  = elevasi permukaan laut.

$a_i$  = amplitudo komponen gelombang ke-i

$\sigma_i$  = radian relative atau frekuensi melingkar komponen gelombang ke-i dengan adanya arus sekitar (sama dengan frekuensi radian absolut  $\omega$  apabila tidak ada arus sekitar)

$\alpha_i$  = fase acak dari komponen gelombang ke-i.

Diasumsikan bahwa arus ambien itu seragam terhadap koordinat vertikal dan perubahan aliran rata-rata dalam panjang gelombang sangat kecil sehingga hanya mempengaruhi hubungan dispersi yang dapat diabaikan. Frekuensi radian absolut  $\omega$  kemudian sama dengan jumlah frekuensi radian relatif  $\sigma$  dan perkalian bilangan gelombang dan vektor kecepatan arus sekitar:

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u} \dots \dots \dots (2.3)$$

Yang merupakan pergeseran Doppler biasa. Untuk gelombang linier, frekuensi relatif diberikan oleh :

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana  $g$  adalah percepatan gravitasi dan  $d$  adalah kedalaman air.

Gelombang laut dideskripsikan dalam keadaan acak dan deskripsi dalam domain waktu agak terbatas. Atau, banyak manipulasi lebih mudah dijelaskan dan dipahami dengan spektrum kerapatan varians, yang merupakan transformasi Fourier dari fungsi kovarians otomatis dari ketinggian permukaan laut:

$$E'(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan

$$C(\tau) = \langle \eta(t) \eta(t + \tau) \rangle \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana  $C(\tau)$  adalah fungsi auto-kovarians,  $\langle \rangle$  mewakili ekspektasi matematis dari variabel acak dan  $\eta(t)$ ,  $\eta(t + \tau)$  mewakili dua proses acak elevasi permukaan laut, mewakili jeda waktu.

Di bidang teori gelombang laut, definisi spektrum  $E(f)$  yang sedikit berbeda dari yang di atas adalah konvensional :

$$E(f) = 2E'(f) \text{ for } f \geq 0 \text{ and } E(f) = 0 \text{ for } f < 0 \dots \dots \dots (2.7)$$

Deskripsi gelombang air melalui spektrum kerapatan varians yang ditentukan  $E(f)$  disebut deskripsi spektral gelombang air. Dapat dibuktikan bahwa varians elevasi muka air laut diberikan oleh :

$$\langle \eta^2 \rangle = C(0) = \int_0^{+\infty} E(f) df \dots \dots \dots (2.8)$$

Yang menunjukkan bahwa spektrum mendistribusikan varians atas frekuensi. Oleh karena itu,  $E(f)$  harus ditafsirkan sebagai kerapatan varians. Dimensi  $E(f)$  adalah  $m^2/Hz$  jika elevasi diberikan dalam m dan frekuensi dalam Hz.

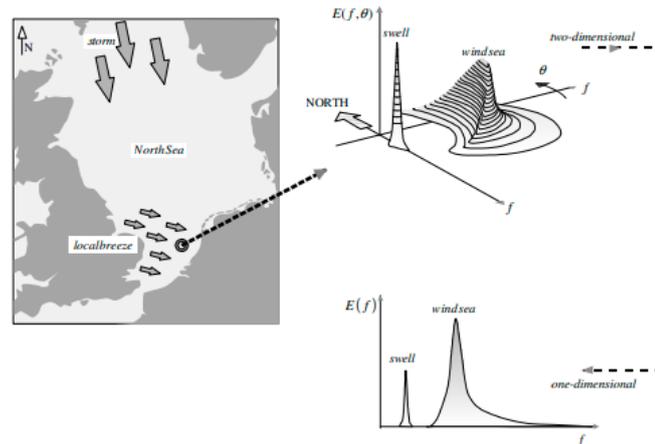
Varians  $\langle \eta^2 \rangle$  sama dengan energi total  $E_{tot}$  gelombang per satuan luas permukaan laut jika dikalikan dengan koefisien yang dipilih dengan tepat :

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho \omega g \langle \eta^2 \rangle \dots \dots \dots (2.9)$$

Oleh karena itu, istilah spektrum densitas varians dan spektrum densitas energi digunakan.

Dalam banyak masalah gelombang, tidak cukup untuk mendefinisikan kerapatan energi sebagai fungsi frekuensi saja. Hal ini sebagian besar diperlukan untuk mendistribusikan energi gelombang terhadap arah. Spektrum ini, yang mendistribusikan energi gelombang melalui frekuensi dan arah, akan dilambangkan dengan  $E(f, \theta)$ . Karena rapatan energi total pada frekuensi  $f$  didistribusikan ke arah dalam  $E(f, \theta)$ , maka:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \dots \dots \dots (2.10)$$



**Gambar 2.3.** Ilustrasi spektrum gelombang 1D dan 2D (Holthuijsen, 2007).

Spektrum densitas energi  $E(f)$  dan  $E(f, \theta)$  digambarkan pada Gambar 2.3. Berdasarkan spektrum kerapatan energi, parameter gelombang integral dapat diperoleh. Parameter ini dapat dinyatakan dalam momen ke- $n$  dari spektrum kerapatan energi :

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \dots\dots\dots(2.11)$$

Jadi, varians dari elevasi permukaan laut diberikan oleh  $m_0 = \langle \eta^2 \rangle$ . Parameter yang terkenal adalah tinggi gelombang signifikan :

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dan beberapa periode gelombang didefinisikan sebagai:

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}, T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}, T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dalam SWAN, spektrum kerapatan energi  $E(\sigma, \theta)$  umumnya digunakan. Pada skala yang lebih besar fungsi rapatan energi spektral  $E(\sigma, \theta)$  menjadi fungsi ruang dan waktu dan dinamika gelombang harus dipertimbangkan untuk menentukan evolusi spektrum dalam ruang dan waktu. Untuk singkatnya, notasi  $E(\sigma, \theta)$  akan tetap digunakan.

## II.5 Perambatan Energi Gelombang

Gelombang laut merupakan salah satu penyebab yang berperan dalam pembentukan maupun perubahan bentuk pantai (Loupatty, 2013). Jika gelombang menjalar dari tempat yang dalam menuju ke tempat yang makin lama makin dangkal, pada suatu tempat tertentu gelombang tersebut akan pecah dan dilepaskan ke pantai dalam bentuk hempasan ombak.

Panjang gelombang dapat dihitung dengan persamaan (Loupatty, 2013) :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2 \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana:

T = periode ombak (detik)

g = Percepatan gravitasi = 9,81 m/s<sup>2</sup>

L= Panjang gelombang (m)

Menurut (Loupatty 2013) mengatakan bahwa bentuk dan perambatan gelombang yang bervariasi serta tidak beraturan sangat mempengaruhi karakteristik gelombang yang terjadi pada perairan tersebut. Selain terjadi perubahan tinggi, panjang dan kecepatan gelombang juga terjadi fenomena lain seperti pendangkalan, refraksi, difraksi dan pantulan sebelum gelombang tersebut pecah. Pendangkalan gelombang adalah proses berkurangnya tinggi gelombang akibat perubahan kedalaman dimana kecepatan gelombangnya berkurang dan akibatnya juga terjadi refraksi karena arah gerak puncak gelombang mengikuti bentuk kontur kedalaman laut. Refraksi ditekankan pada perubahan tinggi gelombang karena pembelokan arah puncak gelombang. Sedangkan difraksi adalah proses pemindahan ke arah daerah yang terlindungi sehingga menyebabkan timbulnya gelombang.

Energi total gelombang adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial. Energi kinetik adalah energi yang disebabkan oleh kecepatan partikel air karena adanya gerak gelombang sedangkan energi potensial adalah energi yang dihasilkan oleh perpindahan muka air karena adanya gelombang (Loupatty, 2013). Energi gelombang berubah dari satu titik ke titik yang lain sepanjang satu panjang gelombang, L, dan energi rerata dihitung dengan persamaan :

$$E = \frac{1}{8} g \rho_0 H^2 L \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

$\rho_0$  = rapat massa, (kg/m<sup>2</sup> )

H= tinggi gelombang, (m)

L=panjang gelombang,(m)

E= energi, (J)

### **II.5.1 Kinematika Gelombang**

Menggunakan teori gelombang linier dan konversi puncak gelombang, kecepatan rambat gelombang dalam ruang spasial dalam kerangka Cartesian dan ruang spektral dapat diperoleh dari kinematika rangkaian gelombang ( SWAN Team 2017):

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2|\vec{k}|d}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + u$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial s}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right) \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

$(c_x, c_y)$  = Kecepatan rambat gelombang dalam ruang x,y

$c_\sigma$  dan  $c_\theta$  = Kecepatan rambat dalam ruang spektral  $\sigma$  dan  $\theta$

$d$  = kedalaman air

$s$  = koordinat ruang dalam arah rambat gelombang

$m$  = koordinat yang tegak lurus  $s$

Untuk  $c_\theta$  tanpa efek difraksi.

Untuk  $\vec{k}$ ,

$$\vec{k} = (k_x, k_y) = (|\vec{k}| \cos \theta, |\vec{k}| \sin \theta), \vec{u} = (u_x, u_y) \dots \dots (2.17)$$

Selain itu, operator  $d/dt$  menunjukkan turunan total sepanjang jalur spasial perambatan energi, dan didefinisikan sebagai :

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{c}_g + \vec{u}) \cdot \nabla_{\vec{x}} \dots \dots \dots (2.18)$$

### II.5.2 Persamaan Keseimbangan Aksi Spektral

Semua informasi tentang permukaan laut terkandung dalam spektrum varians gelombang atau kerapatan energi  $E(\sigma, \theta)$ , mendistribusikan energi gelombang melalui (radian) frekuensi  $\sigma$  (seperti yang diamati dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan arus) dan arah propagasi  $\theta$  (arah normal ke puncak gelombang setiap komponen spektral). Biasanya, model gelombang menentukan evolusi kerapatan aksi  $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$  dalam ruang  $\vec{x}$  dan waktu  $t$ . Kerapatan aksi didefinisikan sebagai  $N = E/\sigma$  dan dipertahankan selama propagasi sepanjang karakteristik gelombangnya dengan adanya arus sekitar sedangkan tidak pada densitas energi  $E$  (SWAN 2017). Aksi gelombang dikatakan invarian adiabatik. Diasumsikan bahwa arus sekitar seragam terhadap koordinat vertikal dan dilambangkan sebagai  $\vec{U}$ .

Evolusi densitas aksi  $N$  diatur oleh persamaan keseimbangan aksi, yang berbunyi (e.g., Mei, 1983; Komen et al., 1994) dalam (SWAN 2017):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{u})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_{\theta} N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \dots \dots \dots (2.19)$$

Ruas kiri adalah bagian kinematik dari persamaan ini. Suku kedua menunjukkan perambatan energi gelombang dalam dua dimensi geografis  $\vec{x}$ , dengan kecepatan kelompok  $\vec{c}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$  mengikuti dari hubungan dispersi  $\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$ , di mana  $\vec{k}$  adalah vektor bilangan gelombang dan  $d$  kedalaman air. Suku ketiga mewakili efek pergeseran frekuensi radian karena variasi kedalaman dan arus rata-rata. Suku keempat mewakili refraksi yang diinduksi kedalaman dan refraksi yang diinduksi arus. Besaran  $c_{\sigma}$  dan  $c_{\theta}$  adalah kecepatan rambat dalam ruang spektral  $(\sigma, \theta)$ . Sisi kanan berisi  $S_{tot}$ , yang merupakan istilah sumber/sink non-konservatif yang mewakili semua proses fisik yang menghasilkan, menghilangkan, atau mendistribusikan kembali energi gelombang. Mereka didefinisikan untuk kepadatan energi  $E(\sigma, \theta)$ .

Persamaan (2.19) dapat disusun kembali dalam koordinat Cartesian atau bola. Untuk aplikasi skala kecil persamaan keseimbangan aksi spektral dapat dinyatakan dalam koordinat Cartesian seperti yang diberikan oleh (SWAN 2017):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \dots \dots \dots (2.20)$$

## II.6 Spektrum JONSWAP (Joint North Sea Wave Project)

Dengan menggunakan pendekatan Kitaigorodskii dan hipotesis Philips, pendekatan yang sama digunakan oleh Pierson dan Moskowitz, Hasselmann dkk (1973) mengusulkan satu model spektrum yang baru berdasar pada Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) dengan mempertimbangkan *fetch* dengan luas yang tidak terbatas. Sangat baik untuk mengkarakterisasi angin laut ketika  $3.6 \sqrt{H_{mo}} < T_p < 5\sqrt{H_{mo}}$ . Selama pengamatan spektrum JONSWAP tampak memiliki puncak yang lebih tajam dibandingkan dengan spektrum Pierson-Moskowitz, maka untuk menambah ketinggian puncak tersebut digunakan fungsi peak-enhancement  $G(f)$  (Holthuijsen 2007) :

$$G(f) = \gamma \exp \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{f/f_{peak} - 1}{\sigma} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana  $\gamma$  merupakan faktor yang membentuk puncak spektrum atau *peak-enhancement* dan  $\sigma$  adalah parameter lebar puncak ( $\sigma = \sigma_a$  untuk  $f \leq f_{peak}$  dan  $\sigma = \sigma_b$  untuk  $f > f_{peak}$ ).

JONSWAP Spektrum dinyatakan oleh :

$$E_{JONSWAP}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_{peak}}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f/f_{peak}-1}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.22)$$

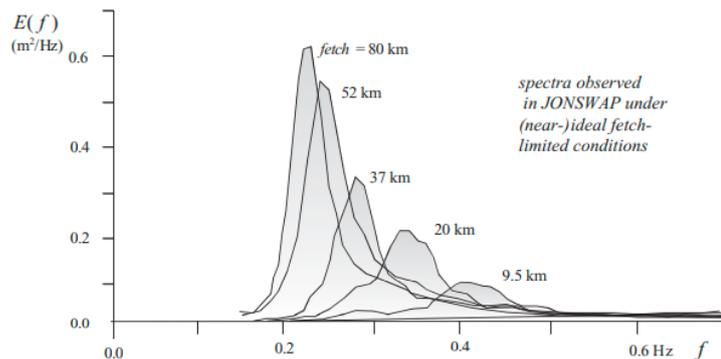
Kahma dan Calkeon (1992) berdasarkan hasil compile mereka dalam (Holthuijsen 2007) menyarankan  $\tilde{f}_{peak} = \tilde{f}_{peak} U_{10}/g$  untuk Panjang *dimensionless fetch*  $\tilde{F}$  :

$$\tilde{f}_{peak} = 2.18 \tilde{F}^{0.27} \dots\dots\dots(2.23)$$

Skala energi  $\propto$  untuk Panjang *dimensionless fetch*  $\tilde{F}$  (Lewis dan Alllos, 1990 dalam (Holthuijsen 2007)) :

$$\alpha = 0.0317 \tilde{f}_{peak}^{0.67} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dengan nilai  $\sigma_a = 0.07, \sigma_b = 0.09, \gamma = 1.0,$



**Gambar 2.4** Pengamatan spektrum gelombang selama *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) (Houlthuijsen, 2007).

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat adanya perubahan bentuk puncak dari spektrum tumpul ke puncak spektrum yang lancip sesuai dengan jarak *fetch*. Perubahan yang demikian akibat adanya transfer energi dari gelombang yang frekuensinya lebih tinggi ke frekuensi yang lebih rendah. Pertumbuhan spektrum ini menjelaskan bahwa gelombang dengan frekuensi rendah mempunyai energi yang lebih banyak kecepatan yang melebihi kecepatan angin dapat meninggalkan daerah pertumbuhannya. Gelombang yang telah meninggalkan daerah pertumbuhannya disebut swell dan gelombang yang masih tetap berada di daerah pertumbuhannya disebut sea. Spektrum JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) digunakan lebih umum, tidak hanya digunakan pada kondisi *fetch* yang terjangkau, tapi juga digunakan pada kondisi angin yang berubah-ubah (arbitrary) di laut dalam mencakup badai dan angin topan.