

PEMODELAN GELOMBANG DI PERAIRAN TELUK LAMPUNG

(Skripsi)

Oleh

**Miftahul Hasanah
1814221027**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PEMODELAN GELOMBANG DI PERAIRAN TELUK LAMPUNG

Oleh

Miftahul Hasanah

Teluk Lampung merupakan salah satu teluk yang berada di Provinsi Lampung. Teluk Lampung terhubung dengan Selat Sunda, Laut Jawa di timur, dan Samudra Hindia di barat daya. Karakteristik gelombang di Teluk Lampung sangat dipengaruhi oleh kondisi perairan Laut Jawa dan Samudra Hindia. Teluk Lampung memiliki berbagai kegiatan, seperti transportasi laut, perikanan, pariwisata, dan lain sebagainya. Oleh karena itu, informasi mengenai kondisi oseanografi, khususnya karakteristik gelombang, sangat penting untuk mendukung berbagai kegiatan tersebut. Informasi mengenai karakteristik gelombang yang didapat dari pengukuran langsung masih sulit diperoleh karena belum adanya alat yang dapat mengukur gelombang secara terus menerus. Cara memperoleh informasi mengenai karakteristik gelombang dapat dilakukan melalui peramalan dan pemodelan. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan gelombang di Teluk Lampung, dan menganalisis karakteristik gelombang dari hasil model tersebut. Metode yang digunakan adalah model hidrodinamika 2 dimensi. Data yang diperlukan untuk menjalankan model adalah data batimetri dan data angin. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pola rambat gelombang pada musim barat berasal dari barat daya dan selatan menuju ke arah timur teluk. Pada musim peralihan 1 gelombang merambat dari arah selatan menuju ke arah timur. Pada musim timur gelombang berasal dari arah selatan dan tenggara menuju ke arah barat laut dan utara teluk, sementara itu pada musim peralihan 2, gelombang merambat dari arah selatan ke arah timur menuju ke dalam teluk. Ketinggian gelombang yang terjadi berkisar antara 0,12 - 0,55 m, gelombang tertinggi terjadi di sisi timur teluk dibandingkan dengan sisi barat. Selain itu, tinggi gelombang di mulut teluk lebih tinggi dibandingkan dengan kepala teluk. Karakteristik gelombang sangat berkorelasi dengan angin yang ditunjukkan oleh hasil pengolahan sinyal menggunakan analisis fourier. Gelombang dengan densitas tertinggi terjadi pada periode 4 - 6 bulanan, sedangkan gelombang keseluruhan terjadi pada periode mingguan. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh angin yang berfluktuasi karena kondisi cuaca.

Kata kunci: Teluk Lampung, model 2 dimensi, fourier, power spectral density.

ABSTRACT

WAVE MODELING IN THE WATERS OF LAMPUNG BAY

By

Miftahul Hasanah

Lampung Bay is one of the bays in Lampung Province. Lampung Bay is connected to the Sunda Strait, Java Sea in the east, and the Indian Ocean in the southwest. Wave characteristic in Lampung Bays are greatly influenced by conditions in the waters of Jawa Sea and Indian Ocean. Lampung Bay has many activities, such as shipping, fishing, tourism, and so on. Therefore, information regarding oceanographic condition, especially wave characteristics, is very important to support these various activities. The information about wave characteristics that came from direct measurement is still difficult to obtain, because there are no equipment to measure wave continuously. The ways to obtain information about wave characteristic can be done through forecasting and modelling. This research aimed to modelling wave in Lampung Bay, and to analyze wave characteristic from the result of model. The method used was 2 dimensional hydrodynamic model. The data needed to run this model were bathymetric and wind datas. The result of this research showed that the wave propagation pattern at the west season came from the southwest and south towards the east of the bay. At the first transition season, wave propagated from the south towards the east. While at the east season, the wave came from the south and southeast towards the northwest and north of the bay, like rise at the second transition season, the wave propagated from the south to the east towards the bay. The height of wave occurred range between 0.12 - 0.55 m, the highest wave occurred on the east side of bay than on the west side, beside that, the height of wave was higher at the mouth of bay than at the head of bay. The wave characteristic was highly correlated with wind as shown by the result of signal processing using fourier analysis. The wave with the highest density occurred in the 4 - 6 month periods, while overall wave occur in the weekly period. Which was showed there was influenced by the wind that fluctuates due to the weather condition.

Keywords: Lampung Bay, 2 dimensional model, fourier, power spectral density.

PEMODELAN GELOMBANG DI PERAIRAN TELUK LAMPUNG

Oleh

Miftahul Hasanah

(Skripsi)

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Perikanan dan Kelautan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **PEMODELAN GELOMBANG DI PERAIRAN TELUK LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : **Miftahul Hasanah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1814221027**

Program Studi : **Ilmu Kelautan**

Jurusan : **Perikanan dan Kelautan**

Fakultas : **Pertanian**



MENYETUJUI
1. **Komisi Pembimbing**

Eko Efendi, S.T., M.Si.
NIP. 197803292003121001

Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si.
NIP. 199001202019031011

2. **Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan**

Dr. Indra Gumay Yudha, S.Pi., M.Si.
NIP. 19700815 199903 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Eko Efendi, S.T., M.Si.**



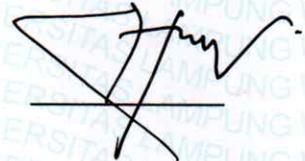
Sekretaris

: **Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si.**



Anggota

: **Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T.**

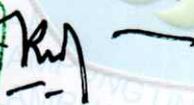


2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.

NIP. 196110201986031002



Tanggal lulus ujian skripsi : **22 Mei 2023**

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan dalam skripsi dengan judul "Pemodelan Gelombang di Perairan Teluk Lampung" adalah benar hasil karya mandiri. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik sarjana baik di Universitas Lampung maupun perguruan tinggi lainnya. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Tim Pembimbing. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, Oktober 2023

Yang membuat pernyataan,



Miftahul Hasanah

NPM. 1814221027

RIWAYAT HIDUP



Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Suswanto dan Ibu Sriwinantu Susilowati yang lahir pada tanggal 29 Agustus 1999 di Kota Metro. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 10 Metro Pusat pada tahun 2005-2011, melanjutkan ke pendidikan menengah pertama di MTS Muhammadiyah Metro pada tahun 2011-2014, dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 6 Metro pada tahun 2014-2017. Kemudian pada tahun 2018 penulis diterima di Program Studi Ilmu Kelautan Jurusan Perikanan dan Kelautan melalui jalur SBMPTN.

Selama menjadi mahasiswa di Jurusan Perikanan dan Kelautan Unila, penulis telah mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (HimapiK) sebagai anggota pengurus pada periode 2019-2020. Penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Renang, Widya Selam, Oseanografi Umum, dan Oseanografi Fisika. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan magang di Taman Nasional Kepulauan Seribu pada tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis juga mengikuti program pertukaran mahasiswa kampus merdeka di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Universitas Massamus Merauke selama 6 bulan. Pada tahun 2021 penulis mengikuti program pertukaran mahasiswa wilayah barat di Universitas Raja Ali Haji selama 6 bulan. Pada tahun 2021 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Hadimulyo Barat, Kecamatan Metro Pusat. Pada Juli hingga Agustus 2021 penulis melaksanakan Praktik Umum di BPPT dengan judul laporan “Karakteristik Gelombang Laut di Perairan Teluk Lampung”.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT dengan kemurahan dan ridho-Nya, karya sederhana ini dapat ditulis dengan baik dan lancar hingga selesai. Dengan mengucapkan bismillahirrohmanirrohim kupersembahkan karya sederhanaku kepada:

Kedua orang tuaku tercinta,

Bapak Suswanto dan Ibu Sriwinantu Susilowati

yang telah menyayangiku, membimbingku, memberikan semangat pantang menyerah, selalu mendoakan dalam setiap langkahku, dan selalu mendukung semua keputusan dan pilihan anak-anaknya tanpa menuntut apapun.

Saudaraku tersayang,

Kakakku Edo Mustaqim dan Muhammad Fajar, adikku Ema Uswatun Hasanah,
serta kakak iparku Finallita Wulandari dan Adila Fikriya.

Terima kasih telah memberikan nasihat, semangat, serta menjadi saudara terbaik.

Serta

Almamaterku tercinta, Universitas Lampung.

MOTO

“Man Jadda Wajada”

Barangsiapa yang bersungguh-sungguh, maka dia akan berhasil
(Pepatah Arab)

“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan
kemampuannya”

(QS. Al Baqarah ayat 286)

“Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan sekecil apapun, niscaya dia akan
melihat (balasan)nya”

(Q.S Al Zalzalah ayat 7)

“Only you can change your life. Nobody else can do it for you”

“Learn from yesterday, live for today, and hope for tomorrow”

SANWACANA

Syukur Alhamdulillah berkat nikmat dan karunia Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pemodelan Gelombang di Perairan Teluk Lampung”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains pada Program Studi Ilmu Kelautan Universitas Lampung. Selama penyusunan skripsi, penulis mendapatkan banyak dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Dr. Indra Gumay Yudha, S.Pi., M.Si. selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T. selaku Ketua Program Studi Ilmu Kelautan dan selaku Dosen Penguji Utama.
4. Eko Efendi, S.T., M.Si. selaku Dosen Pembimbing 1, yang telah memberikan bimbingan dari awal sampai akhir dalam penyusunan skripsi.
5. Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si. selaku Dosen Pembimbing 2, yang telah memberikan bimbingan dari awal sampai akhir dalam penyusunan skripsi.
6. Keluargaku, Bapak Suswanto, Ibu Sriwinantu, Kakakku Edo, Fajar, Finallita, Adila dan adik bungsuku Ema yang selalu mendoakan dan memberi semangat pantang menyerah, serta memberikan dukungan secara penuh.
7. Evi, Cindy, Desmi, Ima dan Suci yang telah memberikan semangat dan masukan dalam penulisan skripsi.
8. Keluarga Besar Ilmu Kelautan 2018 yang sudah memberikan semangat dan doa untuk menyelesaikan skripsi.

9. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu yang telah banyak membantu sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Semoga ketulusan bapak, ibu, serta rekan-rekan mendapatkan pahala dari Allah SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan penyajiannya.

Bandarlampung, Oktober 2023

Miftahul Hasanah
NPM. 1814221027

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Kerangka Pemikiran.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Gelombang Laut.....	5
2.2 Karakteristik Gelombang Laut.....	6
2.3 Deformasi Gelombang	9
2.4 Pembangkitan Gelombang oleh Angin	11
2.5 Peramalan Gelombang	13
III. METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Tempat	14
3.2 Alat dan Bahan.....	15
3.3 Pengumpulan Data	15
3.4 Pengolahan Data	16
3.4.1 Pengolahan Data Angin.....	16
3.4.2 Pengolahan Data Batimetri	17
3.4.3 Pembuatan Model.....	18
3.5 Analisis Data	22
3.5.1 Resultan Arah dan Kecepatan	22
3.5.2 <i>Spectral Density</i>	22
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Validasi Masukan Model	24
4.2 Pola Pergerakan Gelombang Hasil Pemodelan.....	26
4.3 Karakteristik Gelombang Hasil Pemodelan.....	33
V. KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan	36
5.2 Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	37

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi gelombang berdasarkan periode	7
2. Alat dan bahan yang digunakan	15
3. Skenario simulasi model <i>spectral wave</i>	21
4. Kriteria MAPE (<i>mean absolute percentage error</i>)	22

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran.....	4
2. Karakteristik gelombang.....	7
3. Refraksi gelombang.....	9
4. Difraksi gelombang.....	10
5. Refleksi gelombang.....	10
6. Peta lokasi penelitian.....	14
7. <i>Mesh</i> batimetri.....	18
8. Mawar angin data masukan model.....	25
9. Perbandingan data angin Copernicus dan BMKG.....	25
10. Gelombang hasil pemodelan di Teluk Lampung.....	28
11. Stik plot angin dan gelombang di Teluk Lampung.....	32
12. Karakteristik gelombang Teluk Lampung hasil pemodelan.....	33
13. Hasil analisis pemrosesan sinyal deret waktu.....	34
15. Densitas spektral tinggi gelombang maksimum di Teluk Lampung.....	35

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teluk Lampung merupakan salah satu teluk yang berada di Provinsi Lampung. Teluk Lampung berada di ujung paling selatan dari Pulau Sumatera yang berhadapan langsung dengan Selat Sunda. Teluk Lampung memiliki luas kurang lebih 1.888 km² dengan rata-rata kedalaman mencapai 20 m. Rata-rata kedalaman pada bagian kepala teluk adalah 20 m pada jarak yang cukup dekat dari garis pantai dan cenderung semakin dalam ke arah selatan ke bagian mulut teluk. Kedalaman maksimum Teluk Lampung adalah 75 m yang berada di Selat Legundi (Pariwono, 1999).

Teluk Lampung merupakan wilayah perairan yang sangat strategis dan penting bagi kehidupan masyarakat di sekitarnya. Wilayah perairan ini digunakan untuk berbagai kegiatan seperti transportasi laut, perikanan, pariwisata, dan lain-lain (Sianturi *et al.*, 2013). Teluk Lampung memiliki aktivitas pelayaran yang berfungsi dalam pendistribusian logistik. Aktivitas pelayaran sangat bergantung pada kondisi cuaca maritim antara lain angin dan gelombang (Milasari *et al.*, 2021).

Data gelombang laut di perairan Teluk Lampung belum banyak diperoleh dengan kualitas dan kuantitas yang memadai, hanya pada perairan di sekitar Panjang yang memiliki data cukup baik. Menurut Pariwono (1999), kondisi gelombang besar di perairan sekitar Panjang terjadi pada musim timur hingga musim peralihan 2. Tinggi gelombang yang ditemui di perairan tersebut berkisar antara 0,50 – 1,0 m. Informasi tentang gelombang laut sangat diperlukan untuk menghindari terjadinya kecelakaan yang dapat terjadi di laut. Data gelombang laut dapat diperoleh melalui pengukuran langsung, pendugaan (*hindcasting*) dan pemodelan hidrodinamika.

Model hidrodinamika merupakan metode alternatif yang lebih mudah serta efisien untuk memperoleh data gelombang laut yang terjadi pada suatu perairan. Pemodelan hidrodinamika dalam bentuk 2 dimensi bertujuan untuk melihat gambaran pergerakan gelombang permukaan yang terjadi di laut (Remya *et al.*, 2012). Penelitian yang menggunakan pemanfaatan model hidrodinamika sudah banyak dilakukan, di antaranya penelitian Ali *et al.* (2021) yang menggunakan model hidrodinamika untuk mendapatkan tinggi gelombang dalam menentukan energi gelombang laut. Ariyanti *et al.* (2017) memanfaatkan model hidrodinamika untuk memodelkan refraksi dan menganalisis karakteristik gelombang laut yang dibangkitkan oleh angin. Putra *et al.* (2021) memanfaatkan model hidrodinamika untuk mengetahui karakteristik penjalaran gelombang laut.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tersebut, model hidrodinamika telah membuktikan bahwa pendekatan ini lebih efisien dalam memahami karakteristik gelombang laut pada suatu perairan. Model hidrodinamika memungkinkan peneliti untuk mensimulasikan pergerakan gelombang laut dalam berbagai situasi dan kondisi tanpa perlu melibatkan eksperimen lapangan (pengukuran langsung) yang mahal dan rumit. Oleh karena itu, model hidrodinamika dipilih untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik dan energi gelombang yang ada di perairan Teluk Lampung. Informasi mengenai gelombang penting untuk menghindari atau meminimalisir dampak negatif yang terjadi di perairan.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik gelombang hasil pemodelan di perairan Teluk Lampung.
2. Menganalisis densitas energi gelombang hasil pemodelan di perairan Teluk Lampung.

1.3 Manfaat Penelitian

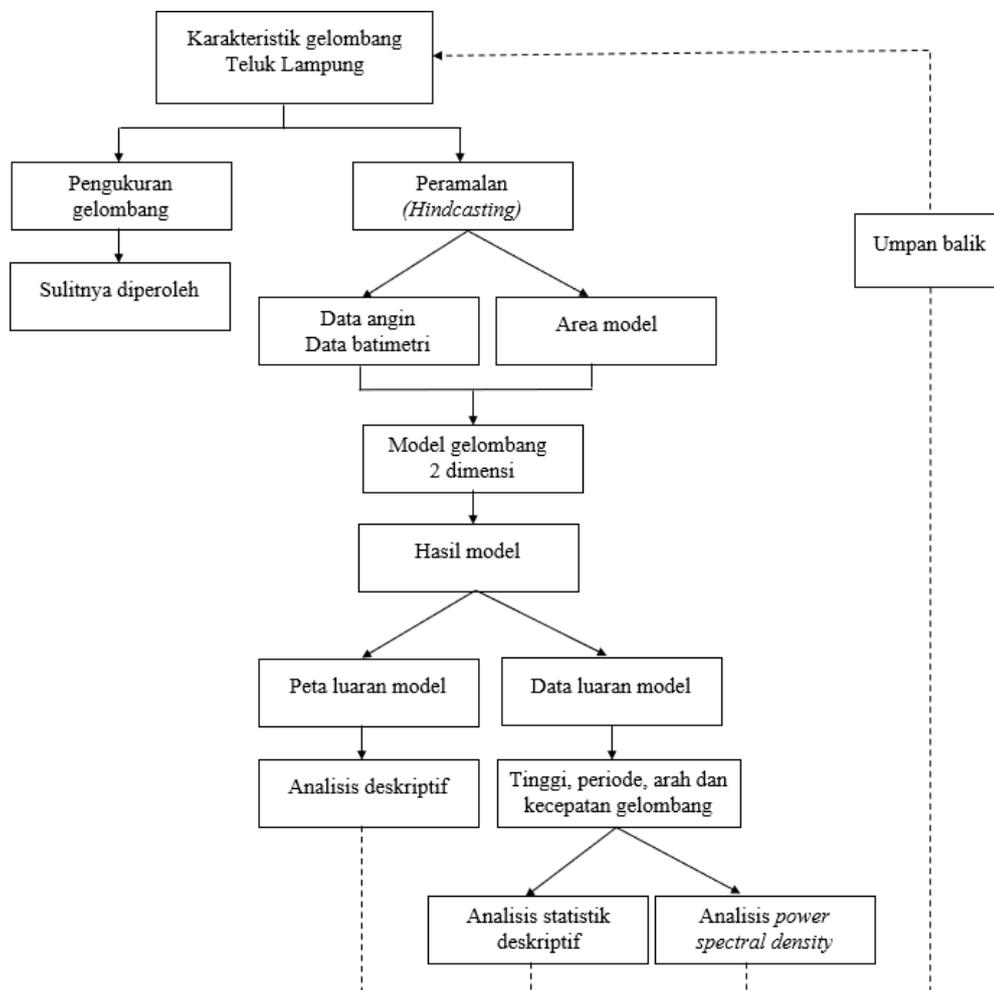
Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi terkait gelombang laut yang dapat digunakan sebagai pendukung dalam melaksanakan aktivitas di perairan maupun dapat digunakan sebagai salah satu bahan pertimbangan dalam pengambilan kebijakan pengelolaan bangunan-bangunan di pantai, serta dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.4 Kerangka Pemikiran

Gelombang laut merupakan salah satu parameter oseanografi yang memengaruhi kondisi dari suatu pantai. Lokasi penelitian ini dilaksanakan di perairan Teluk Lampung, dimana kondisi gelombang laut di perairan ini belum banyak dikaji. Fenomena dan dinamika yang terjadi di perairan laut menjadi hal yang sangat penting karena hal itu berkaitan dengan berbagai aktivitas di laut. Aktivitas di laut, seperti pelayaran, menentukan lokasi pelabuhan, serta merancang bangunan lainnya memerlukan data gelombang. Saat ini data gelombang di perairan Teluk Lampung masih sulit diperoleh karena berbagai faktor, seperti sulitnya metode pelaksanaan, alat, dan biaya yang sangat mahal karena gelombang adalah proses acak yang terjadi dalam satuan detik sehingga diperlukan *storage* dan baterai yang sangat besar.

Sulitnya memperoleh data gelombang menyebabkan banyak peneliti melakukan metode peramalan (*hindcasting*). *Hindcasting* gelombang adalah teknik peramalan gelombang yang akan datang dengan menggunakan data angin di masa lampau. Pada peramalan gelombang, data gelombang hanya dapat diramal sesuai dengan banyaknya data yang didapat (data gelombang 2 tahun hanya dapat meramal data gelombang 2 tahun ke depan). Dalam *hindcasting*, gelombang laut yang timbul dianggap hanya dibangkitkan oleh hembusan angin saja. Hal ini masih dapat diterima karena angin merupakan faktor dominan yang dapat membentuk gelombang, walaupun tidak seakurat meramal data gelombang dari data gelombang yang diperoleh dari lapangan. Data yang digunakan dalam metode peramalan (*hindcasting*) yaitu data angin, data batimetri, dan area model.

Untuk menggambarkan keadaan laut dilakukan pemodelan gelombang dengan menggunakan teknik numerik dari sebuah sistem. Pada penelitian ini pemodelan gelombang menggunakan perangkat lunak MIKE 21 yang disajikan dalam bentuk peta model 2 dimensi. Hasil dari pemodelan didapatkan peta model yang menggambarkan proses penjalaran gelombang yang terjadi di lokasi penelitian. Selain itu, didapatkan data luaran model yang berupa tinggi, periode, arah, dan kecepatan gelombang yang kemudian dianalisis menggunakan sebuah *script* yang dijalankan pada perangkat lunak MATLAB yang menghasilkan luaran berupa resultan kecepatan dan arah gelombang, dan grafik *spectral density* yang menggambarkan densitas energi gelombang yang terkandung pada setiap rentang periode gelombang pada lokasi penelitian. Hasil dari analisis tersebut memberikan informasi mengenai karakteristik gelombang di perairan Teluk Lampung. Secara ringkas, kerangka pemikiran disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Laut

Gelombang laut adalah peristiwa gerak naik turunnya massa air secara tegak lurus membentuk kurva/grafik sinusoidal (Cindy *et al.*, 2017). Menurut Dewi (2021) gelombang laut merupakan pergerakan naik turunnya air laut yang tidak disertai perpindahan massa dari air laut tersebut. Gelombang laut selalu menimbulkan gerakan berupa ayunan air yang bergerak tanpa henti pada permukaan laut. Loupatty (2013) menjelaskan bahwa pergerakan naik turunnya air laut ini tidak teratur dan stabil. Gelombang yang berada di laut sangat kompleks dan sulit digambarkan, puncak permukaan laut sering nampak berubah-ubah, hal ini bisa diamati dari permukaan airnya yang diakibatkan oleh arah perambatan gelombang yang sangat bervariasi serta bentuk gelombang yang tak beraturan.

Gelombang laut dapat dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu gelombang permukaan dan gelombang internal. Gelombang permukaan adalah suatu gelombang yang terjadi di batas antara air dan udara akibat perbedaan rapat massa air dan udara. Gelombang ini terbentuk akibat adanya getaran dan tiupan angin yang lembut di permukaan air. Gelombang permukaan dapat menyebabkan perubahan kondisi pesisir melalui erosi pantai dan sedimentasi, sedangkan gelombang internal adalah suatu gelombang yang terjadi di bawah permukaan air laut yang tidak dapat diamati secara langsung. Gelombang internal terjadi karena adanya perbedaan rapat massa pada setiap lapisan air laut. Perbedaan rapat massa disebabkan oleh perubahan kadar garam dan temperatur. Perbedaan rapat massa di setiap lapisan ini mengakibatkan munculnya aliran partikel di setiap lapisan air laut. Garis arus dari aliran partikel disebut gelombang internal (Febriano *et al.*, 2014).

Terdapat dua tipe gelombang berdasarkan dari sifatnya, yaitu gelombang pembangun/pembentuk pantai (*constructive wave*) dan gelombang perusak pantai (*destructive wave*). Gelombang pembentuk pantai, mempunyai ketinggian kecil dan kecepatan rambat yang rendah. Pada saat gelombang tersebut pecah di pantai, gelombang akan mengangkut sedimen (material pantai). Material pantai akan tertinggal di pantai (deposit) ketika aliran balik dari gelombang pecah meresap ke dalam pasir atau pelan-pelan mengalir kembali ke laut. Gelombang perusak pantai biasanya mempunyai ketinggian dan kecepatan rambat yang besar. Air yang kembali berputar mempunyai lebih sedikit waktu untuk meresap ke dalam pasir. Ketika gelombang datang kembali menghantam pantai akan ada banyak volume air yang terkumpul dan mengangkut material pantai menuju ke tengah laut atau ke tempat lain (Loupatty, 2013).

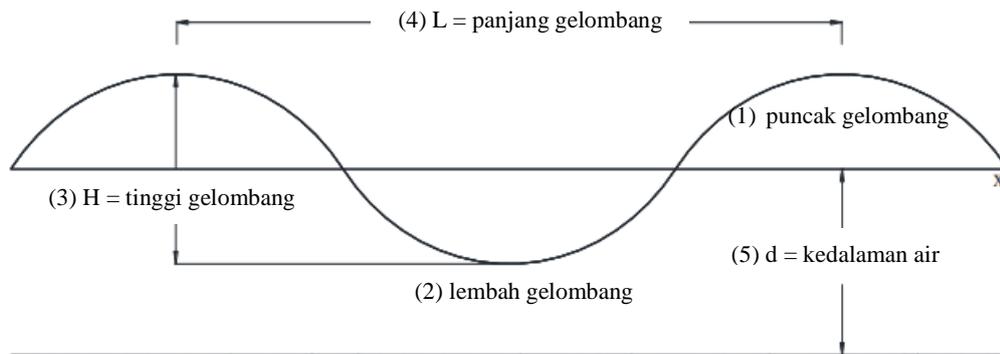
Menurut Kurniawan *et al.* (2012) gelombang di laut timbul karena adanya gaya pembangkit yang bekerja pada laut. Gelombang yang terjadi di lautan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan pembangkitnya. Pembangkit gelombang laut dapat disebabkan oleh angin (gelombang angin), gaya tarik menarik bumi, bulan, dan matahari (gelombang pasang surut), gempa (vulkanik atau tektonik) di dasar laut (gelombang tsunami), ataupun gelombang yang disebabkan oleh gerakan kapal besar yang sedang melaju (Usmaya *et al.*, 2018).

2.2 Karakteristik Gelombang Laut

Gelombang mempunyai ukuran yang bervariasi mulai dari riak dengan ketinggian beberapa sentimeter (cm) sampai pada gelombang badai yang dapat mencapai ketinggian 30 m (Harianja, 2018). Menurut Aminuddin *et al.* (2015) gelombang laut memiliki beberapa bagian, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2 yaitu:

1. Puncak gelombang (*crest*) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang.
2. Lembah gelombang (*trough*) adalah titik terendah gelombang, di antara dua puncak gelombang.
3. Tinggi gelombang (H) adalah jarak vertikal antara puncak gelombang dan lembah gelombang (m).

4. Panjang gelombang (L) adalah jarak horizontal antara dua puncak atau dua lembah yang berurutan (m).
5. Kedalaman air adalah jarak vertikal antara permukaan air dan dasar perairan.
6. Periode gelombang (T) adalah waktu tempuh di antara dua puncak atau dua lembah gelombang secara berurutan pada titik yang tetap (s).
7. Amplitudo (a) adalah jarak vertikal antara puncak/titik tertinggi gelombang atau lembah/titik terendah gelombang, dengan muka air tenang.



Gambar 2. Karakteristik gelombang.

Sumber: Aminuddin *et al.* (2015).

Gelombang laut merupakan salah satu sifat fisis yang bisa menggambarkan karakteristik dari suatu perairan (Ashari *et al.*, 2020). Gelombang laut terjadi akibat adanya gangguan pada lapisan batas antara perairan dan atmosfer. Gelombang laut umumnya dibangkitkan oleh tiupan angin sehingga air di permukaan laut mengalami gerakan naik turun. Faktor pembangkit yang beragam serta kondisi perairan yang berbeda-beda membuat gelombang dapat diklasifikasikan dalam berbagai parameter. Salah satu klasifikasi gelombang laut yang sering digunakan yaitu klasifikasi gelombang laut berdasarkan periode gelombang atau berkaitan dengan panjang gelombangnya. Fharabi (2019), mengklasifikasikan tipe gelombang berdasarkan periodenya seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi gelombang berdasarkan periode

No.	Periode	Panjang Gelombang	Nama
1.	0 – 0,2 detik	Beberapa sentimeter	<i>Ripples/riak</i>
2.	0,2 - 9 detik	Sekitar 130 sentimeter	Gelombang angin
3.	9 - 12 detik	Ratusan meter	<i>Swell</i>
4.	15 - 30 detik	Lebih dari ratusan meter	<i>Long swell</i>
5.	0,5 menit - 1 jam	Kurang dari seribu meter	Gelombang panjang

Sumber: Fharabi, (2019).

Menurut Brillin *et al.* (2015) spektrum gelombang merupakan representatif dari jumlah energi gelombang yang terjadi pada masing-masing variasi frekuensi gelombang. Bentuk dari spektrum gelombang sangat bervariasi tergantung pada tinggi gelombang, periode yang dibutuhkan, dan kecepatan angin. Analisis spektrum merupakan metode yang digunakan untuk mengestimasi fungsi densitas spektral dari sebuah deret waktu. Analisis spektrum dapat digunakan sebagai alat untuk menganalisis data yang berkaitan dengan masalah fenomena selain topografi yang berhubungan dengan waktu, yang tentunya diperlukan suatu teknik tersendiri dalam mengurai informasi data (Satriyani, 2007).

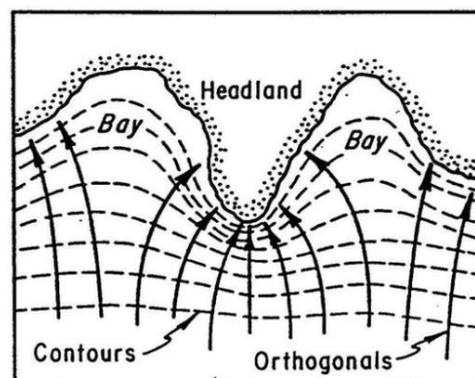
Adiprabowo (2015) menjelaskan bahwa pembangun model spektrum pada umumnya menggunakan hubungan antara perubahan energi gelombang pada suatu komponen sepanjang lintasan penjalaran yang bergerak bersama kecepatan yang disebabkan oleh adanya fenomena fisis seperti input angin, disipasi, dan interaksi non-linear. Prinsip analisis spektrum gelombang adalah menguraikan suatu gelombang irreguler menjadi susunan dari gelombang teratur dari berbagai frekuensi dan tinggi gelombang.

Spektrum gelombang memberikan informasi tentang jumlah energi yang dimiliki gelombang dalam setiap periode atau frekuensi yang berbeda. Salah satu teknik yang sering digunakan untuk menganalisis perubahan spektrum gelombang yaitu analisis spektral gelombang. Analisis ini melibatkan pengukuran spektrum gelombang pada interval waktu tertentu, dan memungkinkan untuk mengamati perubahan frekuensi gelombang selama periode waktu tersebut. Parameter yang baik digunakan untuk mengamati perubahan spektrum gelombang adalah periode gelombang. Dalam peramalan gelombang, parameter periode gelombang digunakan untuk menghitung energi gelombang pada berbagai periode. Karena spektrum gelombang selalu berubah seiring waktu, maka pengamatan terhadap perubahan periode gelombang dapat membantu dalam memprediksi perubahan dalam spektrum gelombang (Ochi, 2005).

2.3 Deformasi Gelombang

Gelombang yang bergerak menuju pantai akan mengalami deformasi sebagai akibat dari perubahan kedalaman suatu perairan yang cenderung dangkal. Ada tiga jenis deformasi gelombang yang terjadi ketika mendekati pantai akibat perbedaan kedalaman sebelum akhirnya mengalami pemecahan gelombang (*wave breaking*), yaitu refraksi, difraksi, dan refleksi (Triatmodjo, 1999). Menurut Carter (1993) arah perambatan berangsur-angsur berubah dengan berkurangnya kedalaman, sehingga dapat diamati bahwa muka gelombang cenderung sejajar dengan kontur kedalaman.

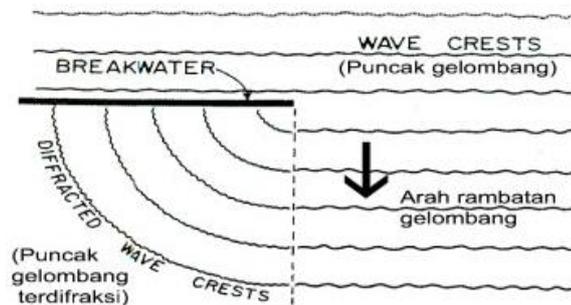
Refraksi gelombang adalah suatu peristiwa terjadinya pembelokan arah gelombang yang memasuki perairan yang dangkal yang disebabkan sebagian gelombang masih merambat dengan kecepatan gelombang laut dalam pada waktu masuk ke laut dangkal (Ashari *et al.*, 2020). Triatmodjo (1999) menjelaskan bahwa refraksi adalah Bergeraknya gelombang menuju pantai yang mengalami proses perubahan garis puncak gelombang dan berusaha sejajar dengan kontur garis pantai. Garis ortogonal gelombang membelok dalam arah menuju tegak lurus garis kontur seperti Gambar 3.



Gambar 3. Refraksi gelombang.
Sumber: Triatmodjo, (1999).

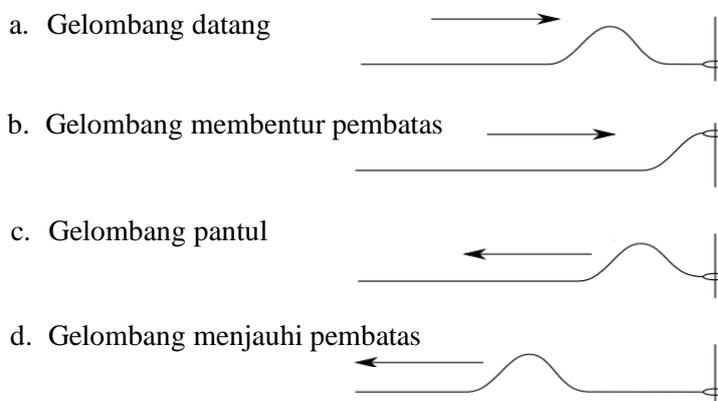
Difraksi gelombang terjadi apabila gelombang datang terhalang oleh suatu rintangan seperti pemecah gelombang atau pulau. Apabila gelombang datang terhalang oleh suatu rintangan, maka gelombang akan membelok di sekitar ujung rintangan dan masuk ke daerah terlindung (daerah bayangan atau *shadow zone*) di

belakang rintangan. Dalam difraksi terjadi transfer energi yang sejajar dengan puncak gelombang atau tegak lurus dengan arah penjalaran gelombang (Gambar 4). Transfer energi itu menyebabkan terjadinya gelombang di daerah bayangan, meskipun tidak sebesar gelombang di luar daerah bayangan (Komar, 1998).



Gambar 4. Difraksi gelombang.
Sumber: Komar, (1998).

Refleksi gelombang adalah suatu fenomena ketika suatu gelombang datang membentur atau menghantam suatu tembok atau penghalang seperti ujung dermaga, maka gelombang tersebut akan dipantulkan sebagian ataupun seluruhnya (Putri *et al.*, 2019). Menurut Triatmodjo (1999) refleksi gelombang terjadi ketika gelombang datang mengenai atau menabrak suatu rintangan akan dipantulkan sebagian atau seluruhnya (Gambar 5). Fluktuasi muka air ini dapat menimbulkan gerakan pada kapal yang ada disekitarnya atau pada kolam pelabuhan. Untuk mendapat ketenangan dalam kolam pelabuhan maka bangunan pelabuhan harus mampu menyerap/menghancurkan energi gelombang.



Gambar 5. Refleksi gelombang.
Sumber: Triatmodjo, (1999).

2.4 Pembangkitan Gelombang oleh Angin

Angin adalah massa udara yang bergerak karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya, angin dapat bergerak secara horizontal maupun secara vertikal dengan kecepatan bervariasi dan berfluktuasi secara dinamis (Nabila *et al.*, 2020). Menurut Widhiarno (2016) angin terjadi akibat adanya perubahan ataupun perbedaan suhu udara antara suatu tempat dengan tempat yang lain. Fenomena terjadinya angin darat dan angin laut merupakan kejadian yang disebabkan adanya perbedaan suhu dan tekanan udara. Angin laut terjadi pada siang hari karena air bersifat lambat menyerap panas, sehingga lautan bersuhu lebih dingin dibandingkan dengan daratan. Hal tersebut menyebabkan gerakan angin berembus dari laut ke darat. Pada malam hari terjadi sebaliknya, angin darat terjadi pada malam hari disebabkan oleh naiknya udara di laut dan digantikan oleh udara dari darat. Arah angin darat yang menuju ke laut ini banyak dimanfaatkan nelayan untuk berangkat berlayar mencari ikan di laut.

Nontji (2005) menjelaskan bahwa di Indonesia, pola angin sangat dipengaruhi oleh angin muson. Angin muson adalah angin yang bergerak terus menerus secara periodik. Menurut Sudarto (2011) angin muson adalah angin yang berhembus secara periodik dan antara periode yang satu dengan yang lain polanya akan berlawanan yang berganti arah secara berlawanan setiap setengah tahun. Angin muson dibagi menjadi 2, yaitu muson barat atau dikenal dengan angin musim barat dan muson timur atau dikenal dengan angin musim timur. Angin muson barat adalah angin yang mengalir dari Asia (musim dingin) ke Australia (musim panas). Angin ini melewati Indonesia bagian barat dan mengandung curah hujan yang banyak karena melewati perairan dan samudra. Angin ini terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari. Angin muson timur adalah angin yang mengalir dari Australia (musim dingin) ke Asia (musim panas) sedikit curah hujan (kemarau) di Indonesia bagian timur karena angin melewati celah-celah sempit dan berbagai gunung. Angin timur terjadi pada bulan Juni, Juli dan Agustus. Antara kedua musim tersebut terdapat musim yang disebut musim pancaroba (peralihan), yaitu musim peralihan dari musim penghujan ke musim kemarau, dan musim peralihan dari musim kemarau ke musim penghujan.

Gelombang di laut umumnya gelombang yang dibangkitkan oleh angin. Mekanisme terjadinya gelombang oleh angin terjadi ketika angin bertiup di atas permukaan air akan mentransfer energinya ke air. Muka air laut akan tenang dan datar tanpa adanya angin. Ketika angin bertiup, mula-mula terbentuk gelombang-gelombang kecil yang berupa riak (*ripple*). Riak ini berperan membentuk kekasaran muka laut yang dapat membantu transfer energi dari angin ke laut. Angin yang terus berhembus, mentransfer energi yang semakin besar ke muka air, sehingga terbentuk gelombang yang lebih panjang (besar) dan memiliki tinggi gelombang semakin besar. Angin yang terus berhembus, akan tercapai kondisi yang disebut *fully developed sea* (Kuswartomo *et al.*, 2021). *Fully developed sea* adalah kondisi di mana gelombang laut mencapai tinggi maksimum yang dapat dicapai oleh angin pada kecepatan tertentu.

Azis (2006) menjelaskan bahwa terdapat tiga faktor angin yang berpengaruh pada pembentukan gelombang yang dipengaruhi angin, yaitu: 1) kecepatan angin, umumnya makin kencang angin yang bertiup, makin besar gelombang yang terbentuk dan gelombang ini mempunyai kecepatan yang tinggi dan panjang gelombang yang besar. 2) lamanya angin bertiup, dimana tinggi, kecepatan dan panjang gelombang seluruhnya cenderung untuk meningkat sesuai dengan lamanya angin bertiup. 3) jarak tanpa rintangan dimana angin sedang bertiup (*fetch*).

Fetch adalah jarak yang ditempuh angin dalam pembentukan gelombang. *Fetch* berpengaruh dalam pembangkitan tinggi gelombang dan periode gelombang dimana semakin panjang jarak *fetch* semakin besar ketinggian gelombang yang terjadi. Di daerah pembangkitan, gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin tetapi juga dalam berbagai sudut terhadap arah angin (Mulyadi *et al.*, 2015). Perhitungan *fetch* dilakukan dengan membuat arah angin dominan menjadi garis poros *fetch* untuk menentukan garis *fetch* kurang lebih 45° ke kanan dan ke kiri dengan interval 6° (Satriadi, 2017).

2.5 Peramalan Gelombang

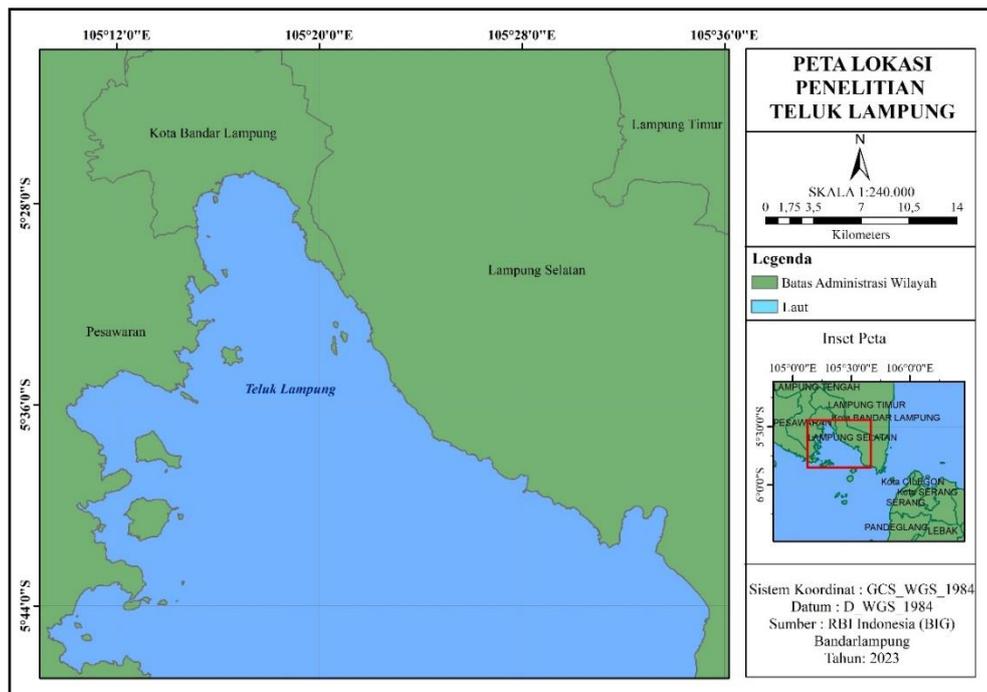
Peramalan atau *hindcasting* gelombang merupakan teknik peramalan gelombang yang akan datang dengan menggunakan angin yang sudah ada atau di masa lampau. Data angin dapat digunakan untuk memperkirakan periode dan tinggi gelombang di lautan (Mulyabakti *et al.*, 2016). Menurut Baharuddin *et al.* (2009) gelombang yang paling umum dikaji dalam teknik pantai adalah gelombang yang dibangkitkan oleh angin.

Data angin yang digunakan dalam peramalan gelombang berupa kecepatan dan arah angin. Klasifikasi kecepatan angin dilakukan untuk mengetahui frekuensi kejadian kecepatan angin maksimum. Arah angin diklasifikasikan menjadi 8 penjuru mata angin, yaitu barat, barat laut, barat daya, utara, tenggara, selatan, timur, dan timur laut. Berdasarkan hasil klasifikasi kecepatan angin maksimum dan arah angin, maka didapatkan distribusi frekuensi dari setiap kecepatan dan arah angin. Distribusi frekuensi tersebut digambarkan dalam bentuk diagram mawar angin (*windrose*). Salah satu metode peramalan gelombang adalah *Shore Protection Manual* (SPM). Metode ini dikembangkan oleh Coastal Engineering Research Center (CERC) US Army. Metode ini juga dijelaskan sebagai metode sederhana untuk memprediksi gelombang. Metode SPM merupakan pengembangan dari metode *Sverdrup Munk Bretschneider* (SMB) (Fatoni, 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret-Juni 2022. Domain lokasi wilayah pemodelan adalah wilayah perairan di Teluk Lampung dengan batas $105^{\circ}13'92,45''$ - $105^{\circ}60'68,51''$ BT, dan $5^{\circ}77'77,00''$ - $5^{\circ}43'67,04''$ LS. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 6. Secara administratif, wilayah penelitian terletak pada Kabupaten Pesawaran, Kota Bandar Lampung, dan Kabupaten Lampung Selatan.



Gambar 6. Peta lokasi penelitian.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Alat dan bahan yang digunakan

No.	Alat	Kegunaan
1.	Laptop	Alat yang digunakan dalam pengolahan dan menyimpan data.
2.	Ms. Excel	Aplikasi yang digunakan untuk mengolah data angin.
3.	ODV (<i>Ocean Data View</i>)	Perangkat lunak untuk mengkonversi data <i>NetCDF</i> keformat <i>Text</i> .
4.	ArcGis	Perangkat lunak untuk membuat area model.
5.	MIKE 21	Perangkat lunak untuk pembuatan model gelombang.
6.	MATLAB	Perangkat lunak untuk membuat grafik <i>spectral density</i> dan <i>stick plot</i> .
7.	Data angin dari <i>website Copernicus</i>	Data untuk masukan model.
8.	Data angin dari BMKG	Data untuk validasi masukan model.
9.	Peta lokasi	Data untuk pembuatan area model.
10.	Data batimetri	Data untuk masukan model.

3.3 Pengumpulan Data

Sumber data dalam penelitian ini merupakan data sekunder. Data sekunder yang digunakan pada penelitian ini adalah data angin yang diperoleh dari laman cds.climate.copernicus.eu dengan dataset *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Variabel angin yang digunakan yaitu komponen U dan V (10m *u-component of wind* dan 10m *v-component of wind*). Selain itu digunakan juga data angin yang diperoleh dari BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) Stasiun Meteorologi Maritim Lampung. Data yang diperoleh berupa data arah dan kecepatan angin yang diambil berdasarkan 4 musim yaitu musim barat (Desember-Februari), musim peralihan 1 (Maret-Mei), musim timur (Juni-Agustus), musim peralihan 2 (September-November), sesuai dengan koordinat lokasi penelitian.

Data sekunder selanjutnya adalah data batimetri nasional yang diperoleh dari laman tanahair.indonesia.go.id dengan resolusi spasial 6arcsecond (180 m)

menggunakan datum MSL (*mean sea level*). Data *gridded* batimetri nasional dari 90 sampai 150 BT dan dari 20 LS sampai 20 LU.

3.4 Pengolahan Data

3.4.1 Pengolahan Data Angin

Pengolahan data angin dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Terdapat beberapa tahap dalam pengolahan data angin yaitu koreksi durasi, koreksi stabilitas dan konversi *wind stress factor* dengan persamaan yang mengacu pada USACE (2003).

1. Koreksi Durasi

Koreksi durasi dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan angin yang ber-tiup secara konstan dan untuk mendapatkan nilai kecepatan angin rata-rata selama durasi angin yang ditentukan. Koreksi durasi disajikan pada persamaan 1-3.

$$t_1 = \frac{1609}{U_f} \quad (1)$$

Menghitung U_{3600}

$$U_{3600} = \frac{U_f}{c} \quad (2)$$

dengan nilai c sebagai berikut:

$$c = 1,277 + 0,296 \tanh \left(0,9 \log \left(\frac{45}{t} \right) \right) \quad (3)$$

keterangan:

- t : Durasi waktu yang diinginkan (s)
- U_f : Kecepatan angin hasil koreksi ketinggian (m/s)
- U_{3600} : Kecepatan angin durasi satu jam (m/s)
- c : Konstanta

2. Koreksi Stabilitas

Koreksi stabilitas berkaitan dengan perbedaan suhu udara dan permukaan laut. Angin bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, begitupun

sebaliknya angin bergerak dari daerah yang suhunya dingin ke daerah yang bersuhu panas. Koreksi stabilitas disajikan pada persamaan 4.

$$U = R_T U_{10} \quad (4)$$

keterangan:

U : Kecepatan angin hasil koreksi stabilitas (m/s)

U₁₀ : Kecepatan angin pada ketinggian 10 m (m/s)

R_T : Koefisien stabilitas

3. Konversi *Wind Stress Factor*

Konversi *wind stress factor* digunakan untuk mengkonversi data arah dan kecepatan angin yang bertiup di darat menjadi data arah dan kecepatan angin yang bertiup dilaut. Konversi *wind stress factor* disajikan pada persamaan 5.

$$U_A = 0,71 * U^{1,23} \quad (5)$$

keterangan:

U_A : *Wind stress factor* (m/s)

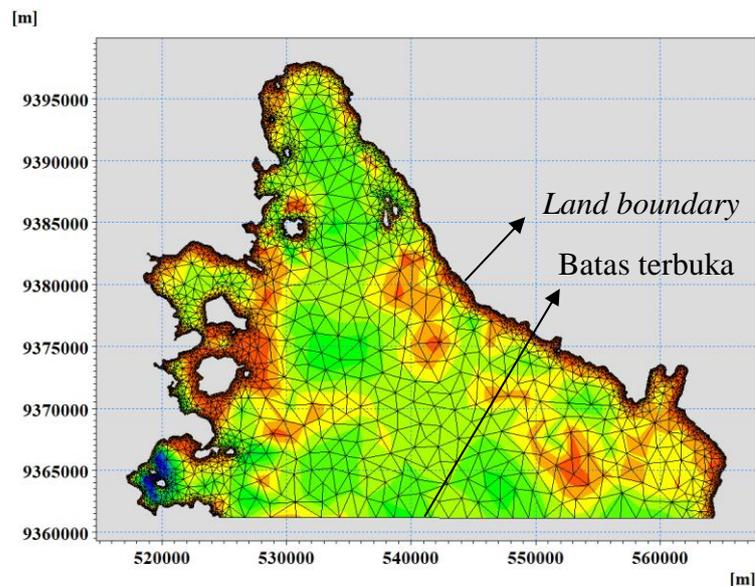
U : Kecepatan angin hasil koreksi stabilitas (m/s)

3.4.2 Pengolahan Data Batimetri

Data batimetri dan peta lokasi digunakan sebagai dasar pembuatan area model dan *mesh* batimetri. Pengolahan peta batimetri dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Data batimetri diolah dengan cara memotong data pada wilayah Teluk Lampung saja. Data yang telah dipotong merupakan area model penelitian, selanjutnya area model yang berupa polygon tersebut diubah ke dalam bentuk poin dan diberi koordinat. Dari pengolahan tersebut akan menghasilkan data poin garis pantai dan data poin batimetri. Data poin garis pantai dan poin batimetri disimpan dengan ekstensi .XYZ. Data inilah yang menjadi bahan utama dalam pembuatan *mesh*.

Data yang telah disimpan dalam ekstensi .XYZ digunakan dalam pembuatan *mesh* batimetri dengan menggunakan perangkat lunak MIKE 21. Pembuatan *mesh* dilakukan menggunakan modul *mesh generator (.mdf)*, dan ditentukan batas terbuka dan batas tertutup (*land boundary*). Batas terbuka (yang berhadapan dengan laut

terbuka) dapat dijadikan sebagai awalan transformasi pergerakan massa air dan batas tertutup model dipakai untuk penanda daratan. Selanjutnya dilakukan *generate mesh* untuk membuat jaringan atau grid yang akan disimulasikan. Pada modul *mesh generator (.mdf)* hasil keluarannya berupa grid yang tidak teratur (*unstructured mesh*) atau disebut *flexible mesh* (Gambar 7). Penggunaan *flexible mesh* sangat menguntungkan untuk mengatasi pembentukan *mesh* di area-area yang sulit yang mempunyai bentuk geometri curam, berkelok-kelok, sempit dan lain sebagainya. Dengan demikian pembentukan *mesh* juga sangat menentukan dalam hasil model.



Gambar 7. *Mesh* batimetri.

3.4.3 Pembuatan Model

Pemodelan gelombang pada penelitian ini menggunakan pemodelan numerik MIKE 21 *spectral wave*. MIKE 21 *spectral wave* (SW) merupakan model generasi baru dari *wind wave* model berdasarkan *unstructured mesh*. MIKE 21 SW mensimulasikan pembentukan dan transformasi gelombang yang dibangkitkan oleh angin. Modul MIKE 21 SW memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi pembangkitan gelombang, penjarangan gelombang, dan kehilangan energi gelombang akibat perubahan kedalaman. Model SW dibangun berdasarkan persamaan kesetimbangan gerak gelombang yang mendeskripsikan perubahan gelombang.

1. Persamaan Pembangun

Untuk memperhitungkan variasi arah gelombang dengan memisahkan distribusi spektrum gelombang ke dalam beberapa komponen arah yang berbeda. Dalam formulasi ini, spektrum gelombang didefinisikan sebagai fungsi dari frekuensi dan arah. Kemudian, spektrum tersebut dipisahkan menjadi beberapa fungsi kepadatan spektral, masing-masing merepresentasikan kontribusi spektral dari setiap arah gelombang. Fungsi-fungsi tersebut kemudian diintegrasikan untuk mendapatkan total energi spektral dalam domain frekuensi dan waktu (persamaan 6).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} &= T_0 \\ \frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} &= T_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Keterangan: $m_0(x,y,\theta)$ dan $m_1(x,y,\theta)$ adalah momen nol dan pertama dari spektrum aksi masing-masing, $c(x,y,\theta)$ kecepatan rambat gelombang. $T_0(x,y,\theta)$ dan $T_1(x,y,\theta)$ adalah fungsi sumber berdasarkan spektrum aksi.

Untuk perambatan gelombang pada kedalaman, gelombang angin diwakili oleh spektrum kerapatan aksi gelombang $N(\sigma, \theta)$. Parameter fase independen telah dipilih sebagai frekuensi sudut relatif (intrinsik), $\sigma = 2\pi f$ dan arah perambatan gelombang θ . Hubungan antara frekuensi sudut relatif dan frekuensi sudut absolut ω (persamaan 7), diberikan oleh persamaan hubungan dispersi linier (DHI, 2017).

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (7)$$

Keterangan: g adalah percepatan gravitasi, d adalah kedalaman air dan \bar{U} adalah vektor kecepatan arus dan \bar{k} adalah vektor bilangan gelombang (k) dan arah θ . Kerapatan aksi, $N(\sigma, \theta)$, berhubungan dengan densitas energi, $E(\sigma, \theta)$ oleh persamaan 8.

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (8)$$

Istilah sumber energi (S), mewakili superposisi fungsi sumber yang menggambarkan berbagai fenomena fisik, dihitung pada persamaan 9.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (9)$$

Keterangan: S_{in} merepresentasikan transfer momentum energi angin ke pembangkitan gelombang, S_{nl} transfer energi karena interaksi gelombang-gelombang non-linear, S_{ds} disipasi energi gelombang akibat *white-capping* (pemecah gelombang air dalam), S_{bot} disipasi karena gesekan dasar dan S_{surf} disipasi energi gelombang akibat pecahnya kedalaman.

2. Diskritisasi

Integrasi dalam waktu didasarkan pada pendekatan langkah fraksional. Pertama, langkah propagasi dilakukan dengan menghitung solusi perkiraan N pada tingkat waktu yang baru ($n+1$) dengan menyelesaikan persamaan kekekalan aksi gelombang homogen, yaitu tanpa suku sumber. Kedua, langkah istilah sumber dilakukan dengan menghitung solusi baru N^{n+1} dari solusi yang diestimasi dengan mempertimbangkan hanya efek dari istilah sumber. Langkah propagasi dilakukan oleh skema euler eksplisit dengan persamaan 10.

$$N_{i,l,m} = N_{i,l,m}^n + \Delta t \left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} \right)^n \quad (10)$$

Untuk mengatasi pembatasan stabilitas yang parah, skema integrasi *multisequence* digunakan. Langkah waktu maksimum yang diizinkan ditingkatkan dengan menggunakan urutan langkah integrasi secara lokal, di mana jumlah langkah dapat bervariasi dari titik ke titik.

Langkah istilah sumber dilakukan dengan menggunakan metode implisit (persamaan 11) (Komen *et al.*, 1994).

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m} + \Delta t \left[\frac{(1 - \alpha)S_{i,l,m} + \alpha S_{i,l,m}^{n+1}}{\sigma_l} \right] \quad (11)$$

Keterangan: α adalah koefisien pembobotan yang menentukan jenis metode beda hingga menggunakan perkiraan S^{n+1} , persamaan ini dapat disederhanakan menjadi persamaan 12.

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m}^n + \frac{(S_{i,l,m}/\sigma_l)\Delta t}{(1 - \alpha\gamma\Delta t)} \quad (12)$$

Untuk gelombang yang tumbuh ($\gamma > 0$) perbedaan maju eksplisit digunakan ($\alpha = 0$), sedangkan untuk gelombang peluruhan ($\gamma < 0$) perbedaan mundur implisit ($\alpha = 1$) yang diterapkan.

3. Asumsi Model

Skenario pembuatan model gelombang dua dimensi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario simulasi model *spectral wave*

Parameter	Diterapkan dalam simulasi
Grid batimetri	<i>Unstructural triangular grid (Flexible Mesh)</i>
Kedalaman minimum	Konstan
Waktu simulasi	Musim barat (Desember 2020-Februari 2021) Musim peralihan I (Maret-Mei 2021) Musim timur (Juni-Agustus 2021) Musim peralihan II (September-November 2021)
Waktu	Nomor waktu = 2183 Waktu = 3600 sec
Angin	Variasi konstanta waktu dalam domain
Kondisi batas	Parameter gelombang (versi 1)
Diskritisasi spektral	8
Batas terbuka	Laut terbuka
Batas tertutup	Daratan
Tipe keluaran	Seri area

4. Validasi Model

Data angin yang diperoleh dari Copernicus sebagai masukan model divalidasi dengan data angin BMKG menggunakan metode MAPE (*mean absolute percentage error*). MAPE adalah pengukuran statistik tentang akurasi perkiraan (prediksi) pada metode peramalan. Pengukuran dengan menggunakan MAPE dapat digunakan karena MAPE mudah dipahami dan diterapkan dalam memprediksi akurasi peramalan. MAPE memiliki kriteria tertentu apakah data yang dievaluasi dapat dipertimbangkan. Semakin kecil nilai presentasi kesalahan (*percentage error*) pada MAPE maka, semakin akurat hasil peramalan

tersebut (Ridlwan *et al.*, 2021). Adapun persamaan dan kriteria interpretasi MAPE tersebut disajikan pada persamaan 13 dan Tabel 4.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{|y_i - x_i|}{y_i} \right) \times 100\% \quad (13)$$

Tabel 4. Kriteria MAPE (*mean absolute percentage error*)

MAPE	Interpretasi
<10%	Sangat baik
10% - 20%	Baik
20% - 50%	Cukup
>50%	Buruk

3.5 Analisis Data

Data hasil pemodelan yang diperoleh yaitu tinggi gelombang, periode gelombang, arah dan kecepatan gelombang, serta arah dan kecepatan angin. Hasil dari pemodelan tersebut dianalisis menggunakan beberapa metode analisis sesuai dengan tujuan penelitian.

3.5.1 Resultan Arah dan Kecepatan

Data arah, kecepatan angin dan gelombang dapat dianalisis menggunakan *stick plot*. *Stick plot* adalah jenis plot grafik yang digunakan untuk menunjukkan data sekuen waktu dengan memplotkan titik vertikal pada posisi yang sesuai dengan nilai data. Grafik *stick plot* bertujuan untuk mengetahui representasi visual dari informasi arah, dan kecepatan gelombang, serta arah dan kecepatan angin yang membantu dalam memvisualisasikan dan memahami interaksi antar variabel tersebut. Dalam pemrosesan data *stick plot* diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB.

3.5.2 Spectral Density

Data periode gelombang yang diperoleh dari hasil pemodelan dianalisis menggunakan *spectral density*. *Spectral density* adalah metode analisis yang berguna

untuk mengetahui energi gelombang dalam suatu frekuensi atau periode tertentu dalam data *time series*. *Spectral density* menunjukkan perbedaan antara variasi frekuensi yang lemah dengan variasi frekuensi yang kuat. Analisis ini bertujuan untuk mencari intensitas energi gelombang yang tinggi pada suatu periode.

Analisis *spectral density* diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB, salah satu perangkat lunak pemrograman yang memiliki banyak fungsi untuk analisis sinyal. Dalam menghitung *spectral density*, digunakan fungsi FFT (*fast fourier transform*) untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Kemudian *spectral density* dihitung dengan menghitung spektrum daya dari data yang telah diubah, untuk menggambarkan distribusi energi spektral dari sinyal. Persamaan yang digunakan dalam *fast fourier transform* disajikan pada persamaan 14 dan 15 (Kumar *et al.*, 2014).

$$z_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \zeta_j \exp\left(\frac{-i2\pi(j-1)(n-1)}{N}\right) \quad (14)$$

Spectral density dihitung dengan:

$$S(f_i) = \frac{1}{\Delta f} \frac{A_i^2}{2} \quad (15)$$

keterangan:

- f_i : Frekuensi ke-i
- A_i : Amplitudo ke-i
- Δf : Interval frekuensi

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Tinggi gelombang maksimum terjadi pada musim barat di bulan Desember sebesar 2,35 m dan tinggi gelombang terendah terjadi pada musim peralihan 1 di bulan April sebesar 0,12 m. Kecepatan gelombang tertinggi terjadi pada musim peralihan 2 di bulan Oktober sebesar 0,99 m/s, sedangkan kecepatan gelombang terendah terjadi pada musim barat di bulan Februari sebesar 0,17 m/s.
2. Tenaga densitas spektral tertinggi terjadi pada periode 4 - 6 bulanan, sedangkan tenaga spektral yang dominan pada densitas spektral yang rendah dengan periode mingguan menunjukkan bahwa gelombang di dalam perairan Teluk Lampung lebih dipengaruhi perubahan cuaca.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dapat diketahui karakteristik gelombang dan peluang terjadinya gelombang tinggi berdasarkan densitas spektral, maka dapat disarankan sebagai berikut:

1. Mengurangi aktivitas di laut pada saat kemungkinan terjadi gelombang tinggi.
2. Mewaspadaai perubahan cuaca yang berpengaruh terhadap gelombang.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Azis, M. F. 2006. Gerak air di laut. *Jurnal Oseana*. 31(4):9-21.
- Adiprabowo, S. R. 2015. *Studi Karakteristik Gelombang di Perairan Selat Sunda*. (Tugas Akhir). Institut Teknologi Bandung. Bandung. 93 hlm.
- Ahmad, A. L., Nurisman, N., Achiari, H., & Setiawati, E. 2022. Kajian karakteristik gelombang di Kecamatan Bumi Waras, Lampung. *Marine and Fisheries Science Technology Journal*. 3(1): 55–66.
- Agustino, O. 2014. Penjalaran transformasi gelombang di perairan pelabuhan Tanjung Kelian Kabupaten Bangka Barat. *Jurnal Oceanografi*. 3(2): 236-245.
- Ali, I. A. H. A., Armono, H. D., Rahmawati, S., Ridlwan, A., & Ariefianto, R. M. 2021. Pemodelan tinggi gelombang untuk kajian energi gelombang laut di perairan barat Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*. 15(2): 75-84.
- Aminuddin, J., Abdullatif, R. F., & Wihantoro. 2015. Persamaan energi untuk perhitungan dan pemetaan area yang berpotensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut. *Jurnal Wave*. 9(1): 9–16.
- Arianty, N., Mudin, Y., & Rahman, A. 2017. Pemodelan refraksi gelombang dan analisis karakteristik gelombang laut di Perairan Teluk Palu. *Gravitasi*. 16(2): 23-30.
- Ashari, S., & Arsyad J. 2020. *Pengaruh Model Pemecah Gelombang Berongga Bentuk Persegi Terhadap Gelombang Transmisi*. (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Makassar. Makassar. 103 hlm.
- Baharuddin, Pariwono, J., & Nurjaya, I. W. 2009. Pola transformasi gelombang dengan menggunakan model RCP wave pada Pantai Bau-Bau. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*. 1(2): 60–71.
- Brillin, D.B., Santoso, A., & Arief, I.S. 2015. Analisa seakeeping pada offshore supply vessel 56 meter. *Jurnal Teknik ITS*. 4(2): 25-31.
- Bye, J. A. T., & Babanin, A. V. 2009. Wave generation by wind. *Journal*

Encyclopedia of Ocean Sciences. 48(4): 304-309.

Carter, R. W. C. 1993. *Coastal Environment: an Introduction to The Physical, Ecological and Cultural System of Coast Lines*. Academic Press. London. 610 hlm.

Cindy, W.A., & Jasin, M. I. 2017. Studi karakteristik gelombang pada daerah Pantai Desa Kalinaung Kab. Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik*. 5(3): 167-174.

Colosi, L. V., Villas Boas, A. B., & Gille, S. T. 2021. The seasonal cycle of significant wave height in the ocean: local versus remote forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 126(8): 1-16.

Dewi, M. J. 2021. *Energi Gelombang*. PT Bumi Aksara. Jakarta. 106 hlm.

Danish Hydraulic Institute. 2017. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. Denmark. 56 pp.

Fatoni, K. I. 2019. Pemanfaatan data angin untuk prediksi karakteristik gelombang laut di Perairan Indonesia. *Jurnal Oseanografi Disosemet*. 4(2): 1-14.

Febriano, Y. 2014. Pemodelan karakteristik gelombang soliter internal air laut menggunakan solusi soliton persamaan korteweg de vries. *Journal Pillar of Physics*. 4(2): 41-48.

Fharabi, M. 2019. *Pemodelan Transformasi Gelombang di Perairan Pantai Cermin*. (Skripsi). Universitas Sumatera Utara. Medan. 80 hlm.

Harianja, B. H. 2018. *Studi Eksperimen Refleksi Gelombang Pada Artificial Hexareef Akibat Pengaruh Konfigurasi Horizontal*. (Tugas Akhir). Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 73 hlm.

Hidayat, N. 2005. Kajian hidro-oceanografi untuk deteksi proses-proses fisik di pantai. *Jurnal Smartek*. 3(2): 73-85.

Komar, P. D. 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Printice Hall. New Jersey. 544 pp.

Komen, G.J., Janssen, V., & Mastenbroek. 1994. Review: on the sea state dependence of the charnock parameter. *Journal Glob Atmos Ocean System*. 5(2): 367-388.

Kumar, P., Zhang, H., & Kim, K. I. 2014. Spectral density analysis for wave characteristics in Pohang New Harbor. *Journal Pure and Applied Geophysics*. 171(7): 1169-1185.

- Kunarso, Ismanto, A., Putra Situmorang, R., & Yulina Wulandari, S. 2018. Variability of upwelling in Bone Bay and Flores Sea. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 9(10): 742-751.
- Kurniawan, R. 2012. *Karakteristik Gelombang Laut dan Daerah Rawan Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia*. (Tesis). Universitas Indonesia. Depok. 90 hlm.
- Kuswartomo, K., Sulistiya, B. N., Isnugroho, I., & Fatchan, A. K. 2021. Prediksi tinggi gelombang berdasarkan CERC (SPM 1984) di Pantai Baru, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Dinamika Teknik Sipil*. 14(1): 1-7.
- Loupatty, G. 2013. Karakteristik energi gelombang dan arus perairan di Provinsi Maluku. *Jurnal Ilmu Matematika Dan Terapan*. 7(1): 19-22.
- Marelsa, N. F., & Oktaviandra, Y. 2019. Analisis karakteristik gelombang laut menggunakan software windwave-12 (studi kasus: Kepulauan Mentawai). *OSEANA*. 44(2): 10-24.
- Milasari, A., Ismunarti, D. H., Indrayanti, E., Muldiyatno, F., Ismanto, A., & Rifai, A. 2021. Model arus permukaan Teluk Lampung pada musim peralihan II dengan pendekatan hidrodinamika. *Journal Buletin Oseanografi Marina*. 10(3): 259-268.
- Mulyabakti, C., Jasin, M. I., & Mamoto, J. D. 2016. Analisis karakteristik gelombang dan pasang surut pada daerah Pantai Paal Kecamatan Likupang Timur Kabupaten Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik*. 4(9): 585-594.
- Mulyadi. Jumarang, M. I., & Apriansyah. 2015. Studi variabilitas tinggi dan periode gelombang laut signifikan di Selat Karimata. *Positron*. 5(1): 19-25.
- Nabila, N. M., Sasmito, B., & Sukmono, A. 2020. Studi karakteristik gelombang perairan laut jawa menggunakan satelit altimetri tahun 2016-2018 (studi kasus : Perairan Laut Utara Jawa). *Jurnal Geodesi Undip*. 9(1): 67-76.
- Nadia, P., Ali, M., & Besperi, B. 2013. Pengaruh angin terhadap tinggi gelombang pada struktur bangunan breakwater di Tapak Paderi Kota Bengkulu. *Jurnal Teknik Sipil*. 5(1): 41-56.
- Nontji, A. 2005. *Laut Nusantara*. Djambatan. Jakarta. 372 hlm.
- Ochi, M. K. 2005. *Ocean Waves*. Cambridge University Press. Cambridge. 325 pp.
- Pariwono, J. I. 1999. *Kondisi Oseanografi Perairan Pesisir Lampung*. Proyek Pesisir. Jakarta. 24 hlm.

- Pinet, Paul. R. 2003. *Invitation to Oceanography*. Jones and Bartlett Publishers. Sudbury. 582 pp.
- Purnama, D., Helmi, M., & Yusuf, M. 2013. Analisa sel sedimen sebagai pendekatan studi erosi di Teluk Lampung, Kota Bandar Lampung Provinsi Lampung. *Journal of Marine Research*. 2(1): 143–153.
- Putra, T. W. L., Zainuri, M., & Sugianto, D. N. 2021. Studi penjalaran gelombang laut di Pulau Panjang, Kabupaten Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*. 10(1): 75-87.
- Putri, T. S., Sukri, A. S., & Sina, M. I. 2019. Pemodelan karakteristik gelombang dengan surface water modelling system (SMS) pada Pantai Pulau Maginti. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*. 7(3): 319-330.
- Ramdani, D.M. 2014. Analisis refraksi gelombang laut berdasarkan model *CMS-Wave* di Pantai Keling Kabupaten Jepara. *Jurnal Oseanografi*. 3(3): 392-400.
- Remya, P.G., Kumar, R., Basu, S., & Sarkar, A. 2012. Wave hindcast experiments in the Indian Ocean using MIKE 21 SW model. *Journal of Earth System Science*. 121(2): 385-392.
- Ridlwan, A., Armono, H. D., Rahmawati, S., & Tuswan, T. 2021. Transmission coefficient analysis of notched shape floating breakwater using volume of fluid method: a numerical study. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*. 18(1): 41-50.
- Sebayang, I.S.D., & Kurniadi, A. 2015. Identifikasi dan analisis kerusakan garis pantai tanjung pasir di Kabupaten Tangerang, Banten. *Rekayasa Sipil*. 4(1): 11–20.
- Satriadi, A., & Prayogi, H. 2017. Peramalan tinggi dan periode gelombang signifikan di perairan dangkal (studi kasus Perairan Semarang). *Buletin Oseanografi Marina*. 6(1): 17-23.
- Satriyani. 2007. *Studi Identifikasi Pola Utama Data Radiosonde Melalui Analisis Komponen Utama dan Analisis Spektrum (Studi Kasus Bandung)*. (Skripsi). Institut Pertanian Bogor. Bogor. 34 hlm.
- Sianturi, O. R., Widada, S., Prasetyawan, I. B., & Novico, F. 2013. Pemodelan hidrodinamika sederhana berdasarkan data hidro-oseanografi lapangan di Teluk Lampung. *Jurnal Oseanografi*. 2(3): 299-309.
- Sudarto. 2011. Pemanfaatan dan pengembangan energi angin untuk proses produksi garam di kawasan timur Indonesia. *Jurnal Triton*. 7(2): 61-70.
- Triatmodjo, B. 1999. *Teknik pantai*. Betta Offset. Yogyakarta. 397 hlm.

- [USACE] *United States Army Corps of Engineers*. 2003. *Coastal Hydrodynamics Part II, Coastal Sediment Processes Part III*. Department of the Army, US Army Corps of Engineers. Washington. 480 pp.
- Usmaya, A. H., & Muliati, Y. 2018. Analisis karakteristik gelombang di Perairan Pulau Enggano, Bengkulu. *Jurnal Teknil Sipil*. 4(2): 94-103.
- Wardhani, P. A., Widagdo, S., & Prasita, V. D. 2021. Pola angin dan kaitannya terhadap karakteristik tinggi gelombang di Perairan Labuan Bajo, NTT. *Journal of Tropical Marine Research*. 3(1): 34-42.
- Widhiarno, F., & Yati, M. 2016. Peramalan gelombang di Perairan Kabupaten Indramayu dengan pemodelan numerik SWAN 41.01A. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*. 2(4): 160-171.
- Widhi, K. B., Indrayanti, E., & Prasetyawan, I. B. 2013. Kajian pola arus di Perairan Teluk Lampung menggunakan pendekatan model hidrodinamika 2 dimensi delft3D. *Journal of Oceanography*. 1(2): 169-177.