

## Pemodelan Kekuatan Gelombang di Pesisir Barat Kecamatan Kuta, Bali

Timothy Kenoly, I Gede Hendrawan<sup>a\*</sup>, I Gusti Ngurah Putra Dirgayusa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

\*Corresponding author, email: [gede.hendrawan@unud.ac.id](mailto:gede.hendrawan@unud.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received : 20 Mei 2022

Received in revised form : 24 Agustus 2022

Accepted : 30 September 2022

Available online : 28 Februari 2023

#### Keywords:

Coastal

FVCOM-SWAVE

Kuta

Power

Wave

### ABSTRACT

*The coastal area is an important area with many different functions for both human and marine organisms. Still, coastal regions are vulnerable to changes caused by various things, including waves. Waves can cause shoreline changes and erode coastal regions. Kuta District is one of the coastal areas on the island of Bali that are threatened with constant sediment erosion every year. One way to increase understanding of the wave and its effect on the coastal areas is through numerical modeling. This study aimed to determine the pattern of wave and wave strength distribution on the west coast of the Kuta district. The Finite Volume Coastal Ocean Model and SWAVE (FVCOM-SWAVE) coupling model that was used in this study utilized the Finite Volume method of computation with the unstructured triangular grid. The results showed that in West Season (December-January-February), the range of mean significant wave heights on the west coast of Kuta District is 0.05 - 0.2 m, and the wave power ranged from 1 to 30 W/m with the most considerable value of significant wave heights and wave power were encountered in January. Water areas near land have greater wave heights and wave power than areas far from land, except around Ngurah Rai International Airport. The movement of waves primarily comes from the southwest, the Bali Strait, to the east and is divided by the runway into following the northern and southern parts of the coast. Thus, the most significant wave height and wave power values are found in the waters near Kuta beach and Legian beach.*

2023 JMRT. All rights reserved.

### 1. Pendahuluan

Area pesisir merupakan area yang dimanfaatkan sebagai lokasi tempat tinggal lebih dari 5 juta manusia yang masih terus meningkat (Barragán and Andrés, 2015) serta memiliki peran penting sebagai habitat berbagai biota laut (Kordi dan Ghufroon, 2011), pelindung daratan dari abrasi (Nur and Hilmi, 2021; Indarsih and Masruri, 2019) dan intrusi air laut (Hilmi *et al.*, 2017). Sejumlah 30% dari keseluruhan kegiatan pariwisata global dilakukan di area pesisir menjadikan area ini populer (Ghosh, 2012; Honey and Krantz, 2007). Area pesisir yang penting serta menjadi salah satu pusat kegiatan pariwisata di Pulau Bali adalah kecamatan Kuta. Namun demikian, area pesisir rentan mengalami kerusakan akibat fenomena alam dan aktivitas antropogenis (Honey and Krantz, 2007). Pada tahun 2020, telah diketahui bahwa pantai di Kecamatan Kuta mengalami ancaman erosi sebesar 1 hingga 2 meter tiap tahunnya selama 25 tahun terakhir (Makfiya *et al.*, 2020).

Gelombang merupakan fenomena alam yang terjadi di area pesisir dan dibangkitkan oleh hembusan angin. Semakin kuat dan lama angin yang berhembus, semakin besar kekuatan yang dimiliki gelombang (Komar, 2018), akibatnya semakin tinggi juga potensi gelombang dapat mengikis area pesisir. Hal ini sudah terjadi pada pesisir timur India (Ramakrishnan *et al.*, 2018), pesisir tenggara Australia (Harley *et al.*, 2017), serta pesisir barat Eropa (Castelle *et al.*, 2015). Selain itu gelombang berkekuatan tinggi juga berbahaya bagi aktivitas pariwisata, dan mampu merusak berbagai infrastruktur pesisir (Park *et al.*, 2017; Hayatdavoodi and Cengiz, 2016). Oleh karena alasan inilah

pemodelan kekuatan gelombang di pesisir barat Kecamatan Kuta menjadi penting untuk dilakukan.

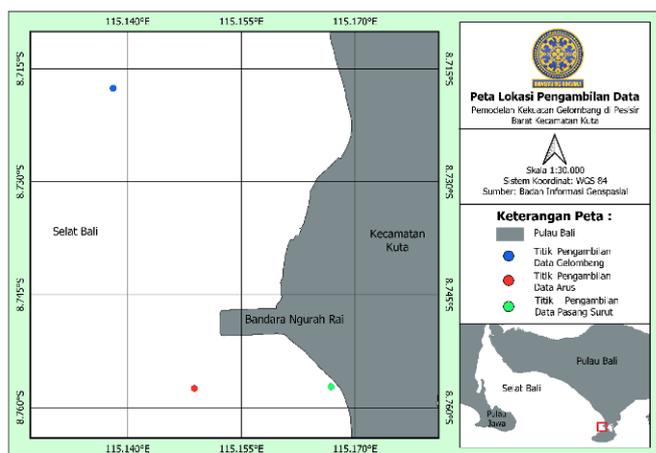
Kajian mengenai kekuatan gelombang tidak mudah dilakukan akibat kebutuhan sumber daya yang besar. Namun hal tersebut dapat diantisipasi menggunakan pemodelan numerik. *Finite Volume Coastal Ocean Model* (FVCOM) dapat digunakan untuk memodelkan gelombang yang melibatkan proses hidrodinamika perairan, dan sudah banyak digunakan dalam berbagai kajian di area pesisir (Zhang *et al.*, 2020; Beardsley *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2011). FVCOM digabungkan dengan SWAVE yang merupakan versi *unstructured grid* dari model SWAN untuk dapat mensimulasikan interaksi arus dan gelombang secara paralel (Qi *et al.*, 2009). *Coupling* model FVCOM-SWAVE memberikan fleksibilitas geometri dari metode *finite element* dan efisiensi komputasi dari metode *finite difference* (Chen *et al.*, 2003). Selain itu, karakteristik *unstructured triangular grid* yang terbentuk mampu membantu pemodelan pada batimetri dan geometri pesisir yang kompleks (Chen *et al.*, 2012). Hal ini dapat memberikan keuntungan pada saat memodelkan gelombang di area pesisir yang spesifik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola gelombang dan pola distribusi kekuatan gelombang di perairan pesisir barat Kecamatan Kuta. Hasil dari penelitian pemodelan kekuatan gelombang di pesisir barat Kecamatan Kuta dapat digunakan sebagai informasi penunjang serta bahan pertimbangan dalam pengelolaan dan pembangunan infrastruktur di area pesisir barat Kecamatan Kuta.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Fokus area penelitian terletak pada perairan pesisir barat Kecamatan Kuta, dengan 3 titik pengamatan data validasi model (Gambar 1). Titik pengamatan pertama terletak pada 8°45'25,9985" LS dan 115°10'00,5653" BT, untuk mengumpulkan data validasi pasang surut. Titik pengamatan kedua untuk pengumpulan data validasi arus yang terletak pada 8°45'26,8094" LS dan 115°08'55,6705" BT. Titik pengamatan ketiga yang terletak pada 8°43'03,2218" LS dan 115°08'17,1050" BT dan kedalaman 20 meter, digunakan untuk pengumpulan data validasi gelombang.



Gambar 1. Titik Pengamatan Data Validasi

2.2 Desain Model

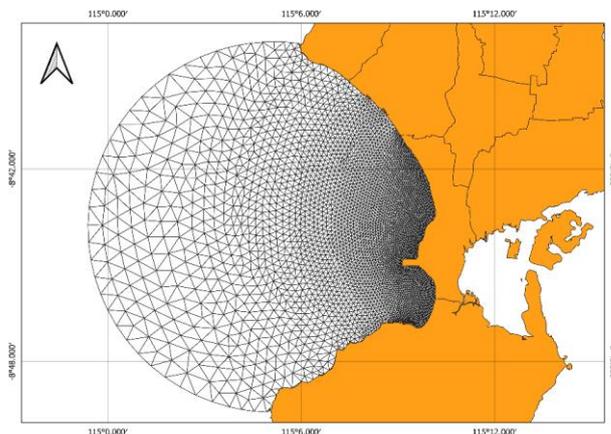
Data yang digunakan dalam penelitian terbagi menjadi data *input* dan data validasi pemodelan. Data *input* meliputi data batimetri, data kecepatan dan arah angin, serta data elevasi pasang surut. Sedangkan untuk data validasi pemodelan meliputi data elevasi pasang surut, data kecepatan arus dan data tinggi gelombang signifikan. Keseluruhan data yang digunakan pada berupa data sekunder atau data yang diperoleh dari penelitian terdahulu. Informasi detil data penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber Data Sekunder

Data	Sumber	Keterangan
Batimetri	Batimetri Nasional (Badan Informasi Geospasial)	Data <i>input</i> model dengan resolusi spasial 6 arc-second (1/3600°). Diakses pada 24 Desember 2021.
Kecepatan & Arah Angin	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	Data <i>input</i> model dengan resolusi spasial 0,125° Periode Waktu: Bulan Januari pada 15 tahun (2006-2020), Diakses pada 24 Desember 2021
Elevasi Pasang Surut	Tidal Model Driver (TMD) – TPXO 8	Data <i>input</i> model dengan resolusi spasial 1/30° yang terdiri dari komponen S2, M2, N2, K2, K1, P1, O1 dan Q1. S. Periode Waktu: 15 November 2021 – 2 Maret 2022, Diakses pada 10 Mei 2022.
Kecepatan Arus	Data pengukuran lapangan dari	Data validasi model Periode Waktu: 2 Februari

penelitian milik program studi Magister Sains Kebumihan, Institut Teknologi Bandung	2019 pukul 09.00 – 13.00, Diakses pada 20 Mei 2022.	
Elevasi Pasang Surut	Data pengukuran lapangan dari penelitian milik Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Udayana	Data validasi model Periode Waktu: 10 – 25 November 2018, Diakses pada 20 Mei 2022.
Gelombang	Data Pengukuran lapangan milik Balai Wilayah Sungai Bali Penida	Data validasi model. Periode Waktu: 23 – 27 Januari 2008, Diakses pada 20 Mei 2022

Model dijalankan selama 3 bulan dengan dengan 2 jenis batas pada *domain* model. Batas jenis pertama adalah batas tertutup di sebelah kanan yang bersinggungan dengan daratan dengan jarak antar *node* 100-400 m. Sedangkan batas jenis kedua adalah batas terbuka yang berupa perairan Selat Bali dengan jarak antar *node* berkisar antara 400-1000 m. Area perairan pesisir barat Kecamatan Kuta memiliki resolusi spasial yang lebih detail dibandingkan area lain ditandai dengan jarak antar *node* yang lebih rapat. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan mengurangi *error* yang dapat muncul dari model pada area fokus penelitian. Visualisasi desain domain model yang digunakan tertuang pada Gambar 2, dan detail parameter model yang digunakan tertuang pada Tabel 2.



Gambar 2. Desain Domain model

Tabel 2. Parameter Model

Parameter	Keterangan
Grid	Unstructured triangular grid dengan resolusi <i>node</i> 100-1000 m
Layer	Uniform layer dengan 10 sigma layer
Open boundary	Elevasi pasang surut (S2, M2, N2, K2, K1, P1, O1 dan Q1).
Kondisi meteorologis	Data angin ECMWF interval 1 jam pada bulan Januari selama 15 tahun (2006-2020)
Batimetri	Batimetri Nasional (BATNAS)
Time step	4 detik

Waktu Simulasi	3 Bulan (Bulan Desember - Februari)
Interval data output	10 menit

### 2.3 Model Hidrodinamika

Terdapat 8 persamaan pembangun dalam FVCOM yang meliputi persamaan momentum dan kontinuitas (1-4), temperatur (5), salinitas (6), densitas (7), dan elevasi pasang surut (8) (Chen *et al.*, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f_v = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_u = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

$$\zeta_0 = \bar{\zeta} + \sum_{i=1}^{N_0} \hat{\zeta}_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \quad (8)$$

x, y, dan z adalah arah timur barat, utara selatan, serta arah vertikal, sedangkan u, v, w adalah komponen kecepatan arus untuk masing masing arah. T, S dan  $\rho$  adalah temperatur, salinitas serta densitas.  $\rho_a$  dan  $\rho_H$  adalah tekanan udara pada permukaan air dan tekanan hidrostatik, sedangkan q adalah tekanan non-hidrostatiknya.  $f$  adalah parameter Coriolis dengan g merupakan percepatan gravitasi.  $K_m$  merupakan koefisien viskositas eddy pada arah vertikal dan  $K_h$  adalah koefisien difusi termal eddy pada arah vertikal.  $F_u$ ,  $F_v$ ,  $F_T$ , dan  $F_S$  merupakan momentum horizontal, serta simbol untuk difusi termal dan salinitas.

### 2.4 Model Gelombang Permukaan

Dalam memodelkan gelombang, model SWAN menggunakan persamaan yang didasari pada kesetimbangan gaya sebagai berikut (Chen *et al.*, 2012):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(C_g^+ + V^+)N] + \frac{\partial C_g N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta N}}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (9)$$

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (10)$$

N merupakan spektrum densitas aksi gelombang, t adalah waktu,  $\sigma$  adalah frekuensi relative  $\theta$  adalah arah pergerakan gelombang.  $C_g$  &  $C_{\theta}$  adalah kecepatan propagasi gelombang pada ruang spectral,  $C_g^+ = \frac{\partial \omega}{\partial k^+}$  adalah kecepatan kelompok gelombang,  $k^+$  adalah vector angka gelombang dan  $V^+$  merupakan vektor ambient arus air.  $\nabla \cdot ()$  adalah operator pembagi horizontal secara geografis yang mana pada sistem koordinat kartesian adalah  $\nabla \cdot () = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ . Secara berurutan  $S_{tot}$ ,  $S_{in}$ ,  $S_{nl3}$ ,  $S_{nl4}$ ,  $S_{ds,w}$ ,  $S_{ds,b}$  dan  $S_{ds,br}$  adalah Komponen *source sink* total, komponen perkembangan gelombang yang diinduksi oleh angin, transfer energi nonlinear akibat interaksi 3 gelombang, transfer energi nonlinear akibat interaksi 4 gelombang, komponen *wave decay* akibat *white capping*, komponen *wave decay* akibat pemecahan gelombang karena friksi dasar perairan dan perubahan kedalaman.

Spektrum densitas aksi didefinisikan sebagai berikut (Qi *et al.*, 2009):

$$N = E/\sigma \quad (11)$$

E merupakan densitas energi gelombang dan  $\sigma$  frekuensi relative radian. Densitas energi gelombang dapat di estimasikan dengan spektrum densitas varian (Holthuijsen, 2007):

$$E_{energy}(f) = \rho g E_{variance}(f) \quad (12)$$

Spektrum densitas varian ini dihitung menjadi varian total:

$$\overline{\eta^2} = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (13)$$

Varian total inilah yang nantinya digunakan untuk menghitung tinggi gelombang signifikan:

$$H_s \approx 4 \sqrt{\overline{\eta^2}} \quad (14)$$

Komponen induksi angin yang berperan sebagai pembangkit utama dari gelombang memiliki 2 bagian. Bagian pertama memperhitungkan pembangkitan awal gelombang oleh pola tekanan akibat berhembusnya diatas permukaan air tertuang dalam persamaan 16 dan 17. Sedangkan bagian kedua memperhitungkan energi yang didapat gelombang melalui mekanisme *positive-feedback* tertuang dalam persamaan 18 (Grashorn, 2013).

$$S_{in}(\sigma, \theta) = \alpha + \beta E(\sigma, \theta) \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{g^{3/2} u_*^3} [u_* \cos(\theta - \theta_{wind})]^4 G \quad \text{untuk } (\theta - \theta_{wind}) \leq 90^\circ \quad (16)$$

$$= 0 \quad \text{untuk } (\theta - \theta_{wind}) > 90^\circ$$

$$G = \exp[-(\sigma/(\sigma_{PM}^*))^{-4}] \quad \text{dengan } \sigma_{PM}^* = 2\pi \frac{0.13g}{28u_*} \quad (17)$$

$$\beta = \max\left(0, 0.25 \frac{\rho_{air}}{\rho_{water}} \left[28 \frac{u_*}{c} \cos(\theta_{wave} - \theta_{wind}) - 1\right]\right) \sigma \quad (18)$$

$\theta$  merupakan arah dan  $\sigma_{PM}^*$  adalah frekuensi puncak dari spektrum Pierson-Moskowitz.  $u_*$  adalah kecepatan friksi pada permukaan laut yang didapat melalui kecepatan komponen angin pada ketinggian 10 meter (Holthuijsen, 2007).

$$u_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (19)$$

$$C_D = (0.8 + 0.065 U_{10}) \cdot 10^{-3} \quad \text{untuk } U_{10} > 7.5 m/s \quad (20)$$

$$= 1.2875 \cdot 10^{-3} \quad \text{untuk lainnya}$$

$C_D$  merupakan koefisien hambatan angin, dan G adalah fungsi pemotongan untuk membatasi pertumbuhan gelombang pada frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi Pierson-Moskowitz.

### 2.5 Validasi Data

Terdapat 3 metode validasi data yang digunakan pada penelitian ini. Perhitungan korelasi Pearson berfungsi untuk mengetahui berbagai variabel yang terlibat dalam model. Hasil korelasi Pearson berkisar 0 hingga 1 dengan intepretasi yang tertera pada Tabel 3. Adapun persamaan Korelasi Pearson yang dijabarkan oleh Wilks (2011) adalah sebagai berikut:

$$r = \frac{\Sigma xy - \frac{(\Sigma x)(\Sigma y)}{n}}{\sqrt{\left(\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}\right)\left(\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}\right)}} \quad (21)$$

Keterangan:

- x = Nilai data pengamatan
- y = Nilai data hasil model
- n = jumlah data
- r = nilai korelasi Pearson erdapat 8 persamaan

**Tabel 3.** Intepretasi Nilai Korelasi Pearson

No	Nilai r	Interpretasi
1	0,00 – 0,199	Sangat Rendah
2	0,200 – 0,399	Rendah
3	0,400 – 0,599	Sedang
4	0,600 – 0,799	Kuat
5	0,800 – 1,000	Sangat Kuat

Sumber: Sugiyono, 2010

Metode kedua adalah *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengetahui besaran eror dari hasil model terhadap data lapangan. Semakin kecil hasil RMSE, maka semakin kecil eror data hasil model. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian meteorologi dan klimatologi, utamanya dengan sebaran data yang terdistribusi secara normal (Chai and Draxler, 2014). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{val} - x_{model})^2} \quad (22)$$

Keterangan:

- $x_{val}$  = Nilai data pengamatan
- $x_{model}$  = Nilai data hasil model
- n = jumlah data

Metode ketiga yang digunakan adalah indeks Willmott untuk mengetahui kinerja dari model. Hasil dari perhitungan indeks Willmott akan berkisar -1 hingga 1. Semakin tinggi nilai dari perhitungan indeks, makin baik kinerja model dan makin kecil eror. Persamaan dari perhitungan Indeks Willmott adalah sebagai berikut (Willmott *et al.*, 2012):

$$d_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (23)$$

ketika  $\sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|$

$$d_r = \frac{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1$$

ketika  $\sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|$

Keterangan:

- $O_i$  = Nilai data pengamatan
- $\bar{O}$  = Rerata nilai data pengamatan
- $P_i$  = Nilai data hasil model
- c = 2 (nilai simpangan absolut rata rata)

### 2.6 Perhitungan Kekuatan Gelombang

Gelombang bergerak membawa 2 jenis energi yakni energi potensial dan kinetik. Kekuatan gelombang atau fluks energi gelombang dapat dipahami dengan memperhitungkan energi potensial dan kinetiknya. Berdasarkan penelitian Thata *et al.* (2021), maka persamaan energi gelombang laut adalah sebagai berikut:

$$EP = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (24)$$

$$EK = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (25)$$

$$Et = EP + EK = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (26)$$

$$\bar{E} = \frac{Et}{L} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (27)$$

Keterangan:

- L = Panjang gelombang
- $\rho$  = Densitas air laut (1,027 kg/m<sup>3</sup>)
- H = Tinggi gelombang yang diperhitungkan
- g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)
- EK = Energi Kinetik
- EP = Energi Potensial
- Et = Total Energi Gelombang
- $\bar{E}$  = Rerata Energi Gelombang

Energi total hanya memperhitungkan energi dari panjang 1 individu gelombang. Sedangkan Energi rerata sudah direratakan pada suatu luasan area tertentu. Pada persamaan rerata energi gelombang, parameter tinggi gelombang yang digunakan dapat disederhanakan menjadi parameter tinggi gelombang signifikan, sehingga persamaan yang digunakan menjadi seperti berikut (Rizal. 2019):

$$\bar{E} = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (28)$$

Besarnya daya gelombang dapat diperoleh melalui hubungan energi rerata gelombang pada luasan permukaan dalam waktu tertentu yakni,  $P = \bar{E} C_g = \bar{E} C n$ . C merupakan kecepatan dari gelombang sedangkan n merupakan rasio kecepatan gelombang dengan kecepatan kelompok gelombang. Adapun persamaan kecepatan kelompok gelombang dibagi menjadi 2 kondisi, pada perairan dalam ( $d \geq \frac{L}{2}$ ) dan pada perairan dangkal ( $d < \frac{L}{2}$ ) (Rizal, 2019). Pada perairan dalam,  $C = \frac{g T_e}{2\pi}$  dan  $n = 0,5$ , persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \quad (29)$$

Serta pada perairan dangkal,  $C = \sqrt{gd}$  dan  $n = 1$ , maka persamaan kekuatan gelombang adalah:

$$P = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \sqrt{gd} \quad (30)$$

Keterangan:

- d = Kedalaman Perairan
- L = Panjang Gelombang
- $T_e$  = Parameter Periode Energi Gelombang
- P = Daya / Fluks energi gelombang (kW/m)
- $H_s$  = Tinggi gelombang signifikan
- $T_e$  = Periode energi gelombang
- $T_p$  = Periode puncak gelombang

Menurut penelitian yang dilakukan di area pesisir Bali dan pesisir Indonesia lainnya oleh Rizal *et al.*, (2020; 2019), maka  $T_e$  diasumsikan  $0,9 \times T_p$  dengan  $T_p$  adalah periode puncak gelombang. Estimasi ini digunakan ketika perhitungan energi gelombang menggunakan spektrum JONSWAP dan dapat memberikan hasil yang cukup realistis serta sesuai utamanya pada

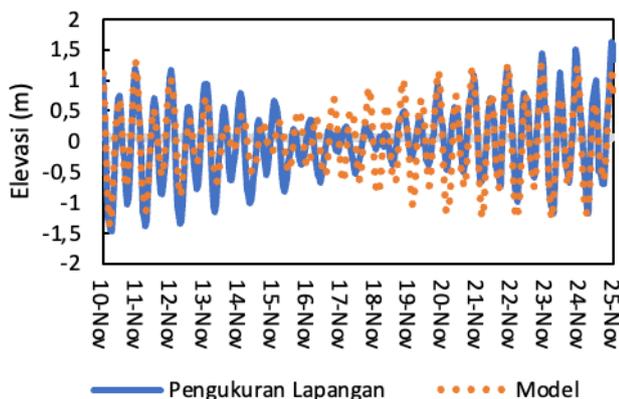
kondisi spektrum gelombang uni-modal (Karimirad, 2014; Cornett dan Zhang,2008).

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Validasi Elevasi Pasang Surut

Validasi elevasi pasang surut antara hasil model dan data hasil pengamatan dari laporan penelitian milik Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Udayana, pada bulan November tahun 2018 dapat dilihat pada Gambar 3. Terlihat pada gambar bahwa pola elevasi pasang surut hasil pemodelan dan pengamatan lapangan memiliki pola yang mirip dalam rentang waktu yang bersesuaian, yakni pola campuran cenderung semi-diurnal. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Prayogo (2021) di sekitar Pulau Bali yang menyatakan kesamaan pola pasang surut. Perbedaan antara kedua data paling terlihat pada kisaran waktu 16 hingga 21 November. Model cenderung melakukan estimasi berlebih pada perhitungan pasang surut sehingga elevasi model saat pasang memiliki nilai yang lebih tinggi serta elevasi model saat surut memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan data pengukuran lapangan.

Validasi secara statistik juga dilakukan. Perhitungan korelasi Pearson menunjukkan korelasi dalam kategori sangat kuat dengan nilai 0,824. Kemudian nilai error dapat diketahui melalui perhitungan RMSE dengan hasil sebesar 0,35 m. Sedangkan melalui indeks Willmott yang menghitung error dari model, diketahui bahwa model memiliki kinerja dengan nilai 0,70. Maka dapat dikatakan elevasi pasang surut air laut hasil model dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya.



Gambar 3. Validasi Pasang surut

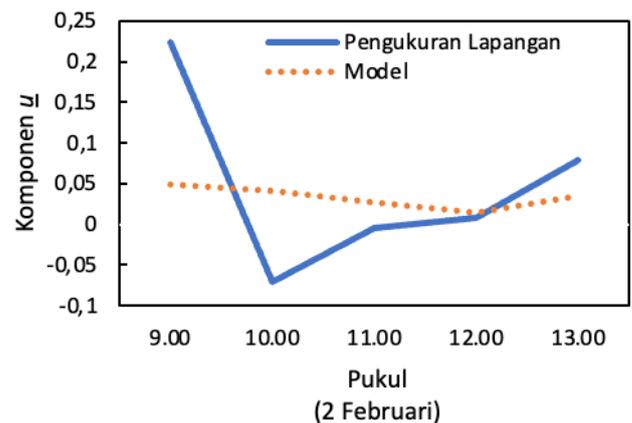
#### 3.2 Validasi Kecepatan Arus

Validasi kecepatan arus dilakukan terhadap komponen  $u$  dan komponen  $v$  antara hasil perhitungan model dan pengukuran lapangan dari penelitian tesis milik Program Studi Sains Kebumihan, Institut Pertanian Bogor pada tanggal 2 Februari 2019. Komponen  $u$  sendiri merupakan komponen arus arah Timur-Barat sedangkan komponen  $v$  adalah komponen arus arah Utara-Selatan. Perbandingan nilai kedua komponen ini antara pengukuran lapangan dengan hasil model tertuang pada Gambar 4 dan Gambar 5.

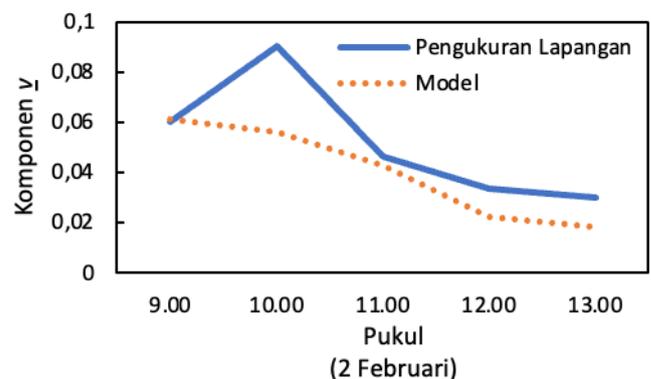
Berdasarkan Gambar 4., terlihat ada perbedaan pola nilai komponen  $u$  pengukuran lapangan dengan model. Perbedaan paling besar terlihat pada data pengukuran lapangan yang mampu mencapai nilai maksimum 0,2 dan nilai minimum -0,06. Sedangkan nilai komponen  $u$  hasil model hanya berkisar antara 0 hingga 0,05. Namun secara umum nilai komponen  $u$  cenderung menurun seiring waktu kemudian kembali meningkat baik pada hasil model atau pengukuran lapangan. Berdasarkan perhitungan,

komponen  $u$  hasil model mencapai korelasi sedang terhadap hasil pengukuran lapangan dengan skor korelasi Pearson sebesar 0,53. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Setiawan *et al.* (2020), pergerakan arus di Selat Bali didominasi oleh pergerakan komponen  $v$ . Pergerakan komponen arus arah Timur-Barat yang tidak dominan diperkirakan menjadi salah satu penyebab nilai korelasi Pearson komponen  $u$  tidak begitu tinggi. Sedangkan pada perhitungan error, tercatat Nilai RMSE adalah sebesar 0,0953 sedangkan menurut perhitungan indeks Willmott, model mampu memperhitungkan komponen  $u$  dengan skor 1.

Terlihat nilai komponen  $v$  pengukuran lapangan dan model yang tertuang pada Gambar 5., memiliki kesamaan pola yang cukup baik. Perhitungan model terhadap komponen  $v$  cenderung sedikit lebih rendah dibanding pengamatan lapangan. Namun perbedaan utama terlihat pada nilai komponen  $v$  pengukuran lapangan maksimal yang mampu mencapai 0,09 sedangkan menurut perhitungan model hanya pada kisaran 0,06. Penurunan nilai komponen  $v$  pada kedua data menunjukkan indikasi korelasi yang baik. Melalui perhitungan korelasi, didapati bahwa korelasi komponen  $v$  hasil model dan pengukuran lapangan mampu mencapai nilai 0,83 sehingga termasuk dalam kategori sangat kuat. Nilai korelasi komponen  $v$  yang lebih baik dibanding komponen  $u$  juga memperkuat penjelasan sebelumnya mengenai pergerakan komponen arus arah Utara-Selatan lebih dominan di Selat Bali. Serupa dengan perhitungan error komponen  $u$ , nilai RMSE pada komponen  $v$  hanya sebesar 0,17 dengan indeks Willmott yang juga mampu mencapai skor 1.



Gambar 4. Validasi Kecepatan Arus Pada Komponen  $u$



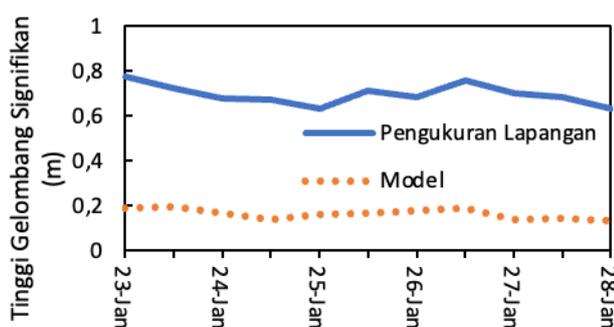
Gambar 5. Validasi Kecepatan Arus Pada Komponen  $v$

#### 3.3 Validasi Tinggi Gelombang Signifikan

Validasi tinggi gelombang signifikan dilakukan pada tanggal 23 hingga 28 Januari dan berasal dari laporan pengukuran gelombang pada penelitian yang diselenggarakan oleh Balai

Wilayah Sungai Bali Penida. Data pengukuran tinggi gelombang signifikan di lapangan direratakan tiap 12 jam dan kemudian dibandingkan dengan data hasil perhitungan model. Perbedaan kedua data ini dituangkan pada Gambar 6. Dapat terlihat bahwa pola data yang terbentuk memiliki kemiripan yaitu tinggi gelombang signifikan menurun pada tanggal 23 hingga 25 Januari, kemudian mengalami peningkatan hingga 26 Januari dan kembali menurun hingga akhir waktu validasi. Walau demikian, terlihat selisih tinggi gelombang signifikan yang cukup besar antara data pengukuran lapangan dengan data hasil pemodelan. Selisih ini berkisar pada 0,5 m, data pengukuran lapangan memiliki rentang nilai 0,6 – 0,8 m sedangkan nilai hasil model hanya memiliki rentang nilai 0,1 – 0,2 m.

Berdasarkan perhitungan korelasi Pearson, didapati bahwa nilai korelasi antara data pengukuran lapangan dan data hasil pemodelan mencapai kategori kuat dengan skor 0.71. Namun dikarenakan selisih nilai yang besar antara data pengukuran lapangan dan data hasil pemodelan, perhitungan RMSE memberikan hasil error yang cukup besar. Nilai error RMSE didapat adalah sebesar 0,53 m dan nilai error dari Indeks Willmott mendapat skor -0,8. Terdapat beberapa alasan yang dapat menyebabkan kondisi ini terjadi. Seperti kurang detailnya resolusi *grid* model atau data batimetri yang digunakan.



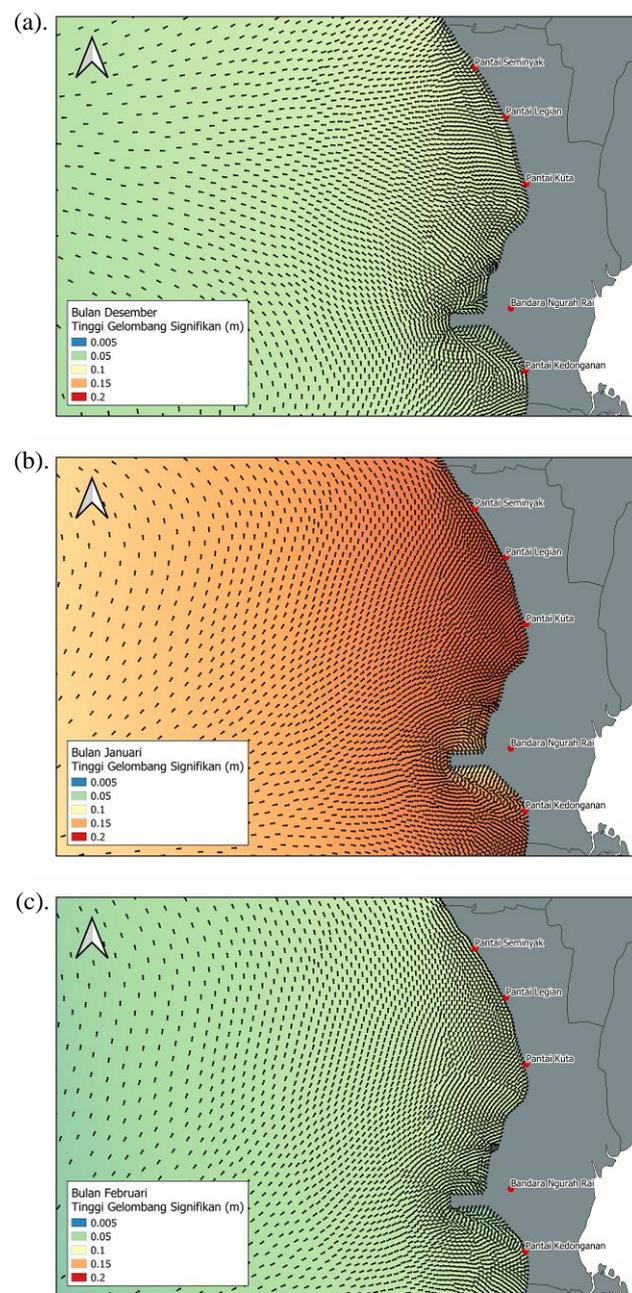
Gambar 6. Validasi Tinggi Gelombang Signifikan

### 3.4 Pola Gelombang dan Distribusi Kekuatan Gelombang di Pesisir Barat Kecamatan Kuta

Rerata tinggi gelombang signifikan beserta arah gelombangnya di pesisir barat Kecamatan Kuta pada bulan Desember, Januari dan Februari divisualisasikan pada Gambar 7. Secara umum arah pergerakan gelombang berasal dari barat daya yang kemudian menuju ke arah daratan. Ketika mencapai dekat daratan arah gelombang terbagi menjadi 2. Gelombang yang bergerak ke bagian utara landasan pacu Ngurah Rai akan bergerak kearah utara menyusuri landasan pacu dan pesisir barat Kecamatan Kuta. Sedangkan gelombang yang bergerak ke bagian selatan dari landasan pacu akan menyusuri daratan kearah selatan.

Kisaran tinggi gelombang signifikan yang direratakan berkisar dari 0,05 m hingga 0,2 m. Namun demikian dapat terlihat bahwa semakin mendekati daratan, maka tinggi gelombang signifikan semakin tinggi. Tinggi ini akan berkurang saat menjauh dari daratan. Namun terdapat pengecualian pada area disekitar landasan pacu Bandar Udara Ngurah Rai dimana tinggi gelombang signifikan pada area tersebut juga lebih rendah dibanding area lainnya yang juga berbatasan dengan daratan. Berdasar Gambar 7, diketahui bahwa area yang memiliki tinggi gelombang signifikan paling besar terdapat pada area di sekitar Pantai Kuta hingga Pantai Seminyak.

Secara umum pola pergerakan gelombang dan distribusi tinggi gelombang signifikan yang terbentuk disebabkan oleh distribusi hembusan angin yang ada di pesisir barat Kecamatan Kuta. Distribusi hembusan angin ini dapat dilihat pada Gambar 8. Hembusan angin pada area penelitian berasal dari barat atau Selat Bali menuju ke timur atau daratan. Hal ini disebabkan oleh berhembusnya angin monsun barat di Indonesia, yakni pada bulan Desember hingga Februari (Sudarto, 2011). Seiring waktu hembusan angin juga meningkat secara perlahan ketika mendekati area daratan. Maka dari itu pembangkitan gelombang dimulai pada area laut lepas (barat) yang kemudian bergerak sembari menguat menuju ke arah daratan.

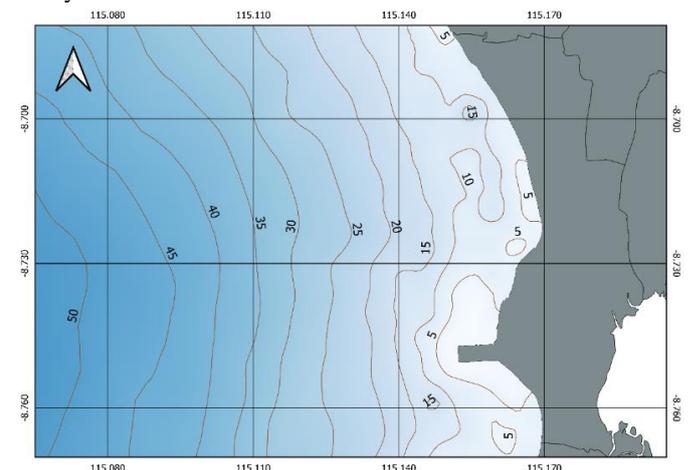


Gambar 7. Rerata Tinggi Gelombang Signifikan Dan Arah Gelombang Di Pesisir Barat Kecamatan Kuta Pada (a) Bulan Desember; (b) Bulan Januari; dan (c) Bulan Februari

Terdapat variasi bulanan yang dapat terlihat dari arah datang gelombang dan tinggi gelombang signifikan. Mengacu pada Gambar 7(a), arah gelombang datang pada Bulan Desember umumnya berasal dari selatan area penelitian cenderung ke barat daya. Hal ini dipengaruhi oleh hembusan angin di bulan

Januari juga umumnya menjadi puncak terjadi musim barat atau penghujan, sehingga hembusan angin menjadi lebih kencang dibanding pada Bulan Desember atau Februari.

Apabila memperhatikan peta batimetri yang tertuang pada Gambar 9, terlihat bahwa terdapat area di sekitar landasan pacu yang memiliki kedalaman lebih dangkal dibanding area pesisir lainnya. Terbentuk area dangkal yang menjorok ke arah laut di sekitar landasan pacu dengan kedalaman hanya pada kisaran 5 meter. Gelombang yang bergerak ke arah tersebut akan memasuki area dangkal terlebih dahulu dibanding gelombang lainnya, serta mengalami proses refraksi gelombang. Refraksi menyebabkan gerak gelombang yang terpengaruh oleh area dangkal ini berbelok menuju landasan pacu. Maka dari itu tinggi gelombang signifikan pada sekitar landasan pacu menjadi lebih kecil dibanding area lainnya dekat daratan.



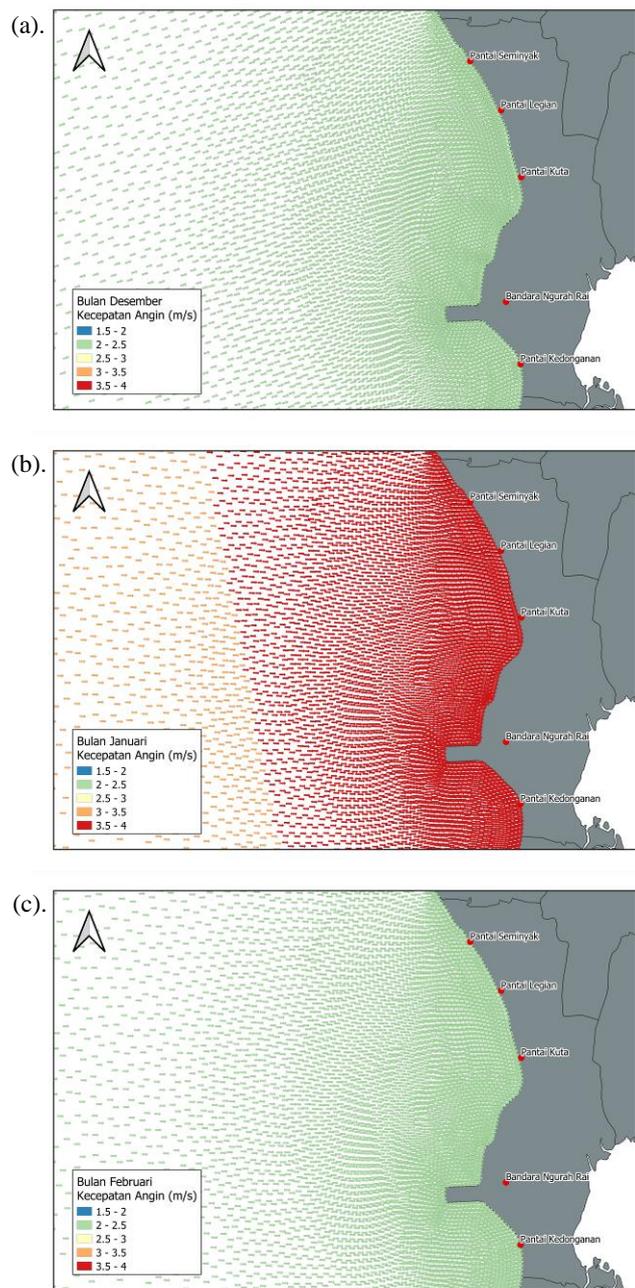
Gambar 9. Peta Batimetri di Pesisir Barat Kecamatan Kuta

Area Pantai Kuta hingga Pantai Seminyak menjadi area dengan tinggi gelombang signifikan paling tinggi disinyalir karena bentuk geografisnya yang menyerupai cekungan sehingga dapat menampung gelombang yang datang. Jika melihat arah datangnya gelombang yang berasal dari barat daya, maka area ini menjadi area terjauh yang dapat dilalui oleh gelombang. Batimetri pada area Pantai Kuta hingga Pantai Seminyak juga membantu pertumbuhan gelombang dimana kedalaman di dekat daratan masih berkisar pada 10 meter membuat gelombang tidak mengalami pendangkalan terlalu cepat.

Terdapat variasi bulanan yang dapat terlihat dari arah datang gelombang dan tinggi gelombang signifikan. Mengacu pada Gambar 7(a), arah gelombang datang pada Bulan Desember umumnya berasal dari selatan area penelitian cenderung ke barat daya. Hal ini dipengaruhi oleh hembusan angin di bulan Desember pada Gambar 8(a), berasal dari arah Barat Daya. Sedangkan pada Gambar 8(b), dan 8(c), hembusan angin di Bulan Januari dan Februari cenderung berasal dari barat. Akibatnya arah datang gelombang pada Bulan Januari dan Februari yang bergeser lebih ke arah barat dibanding pada saat Bulan Desember. Hal tersebut dapat terlihat pada Gambar 7(b), dan 7(c).

Tinggi gelombang signifikan pada Bulan Januari merupakan yang terbesar dibanding pada bulan Desember dan Februari. Variasi nilai tinggi gelombang signifikan di bulan Januari juga paling lebar dimana berkisar dari 0,1 - 0,2 m sedangkan pada Bulan Desember dan Februari hanya pada kisaran 0,05 - 0,1 m. Hal ini sejalan dengan variasi kecepatan hembusan angin di area penelitian. Kisaran kecepatan hembusan angin pada Bulan Desember dan Februari hanya pada 2 - 2,5 m/s, sedangkan pada Bulan Januari mampu mencapai 3 - 4 m/s. Hal ini disinyalir disebabkan oleh Bulan Januari juga umumnya menjadi puncak terjadi musim barat atau penghujan, sehingga hembusan angin

Desember pada Gambar 8(a) berasal dari arah Barat Daya. Sedangkan pada Gambar 8(b), dan 8(c), hembusan angin di Bulan Januari dan Februari cenderung berasal dari barat. Akibatnya arah datang gelombang pada Bulan Januari dan Februari yang bergeser lebih ke arah barat dibanding pada saat Bulan Desember. Hal tersebut dapat terlihat pada Gambar 7(b), dan 7(c).

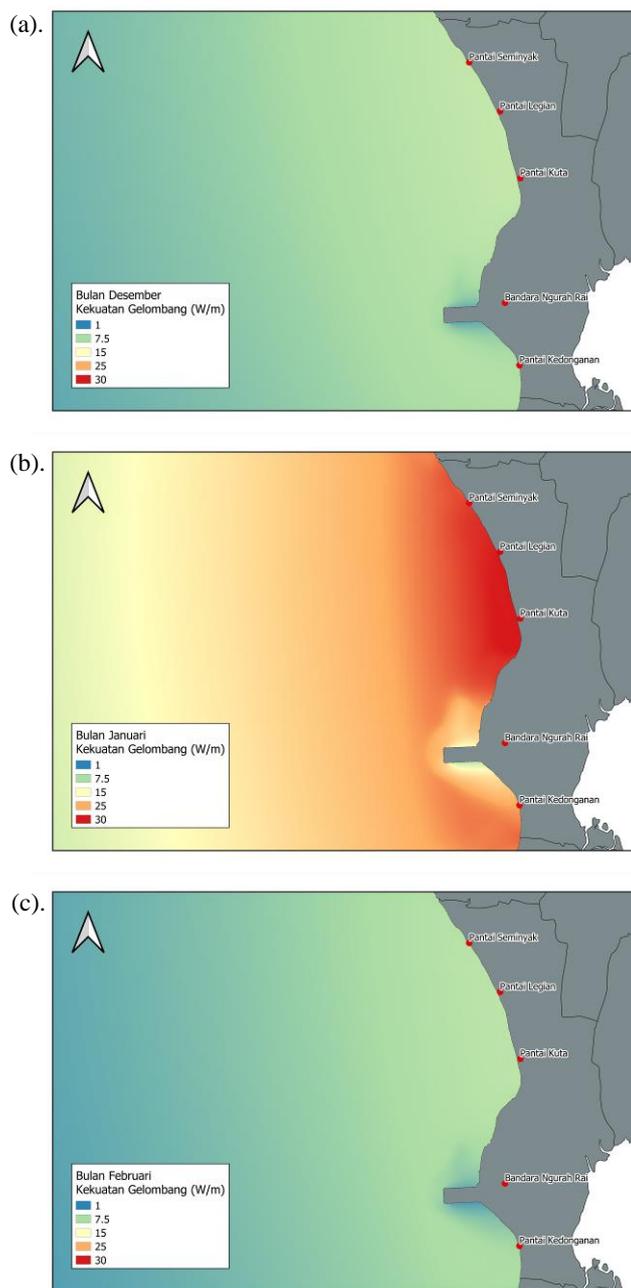


Gambar 8. Peta Distribusi Hembusan Angin di Pesisir Barat Kecamatan Kuta Pada Bulan Desember Pada (a) Bulan Desember; (b) Bulan Januari; dan (c) Bulan Februari

Variasi kisaran tinggi gelombang pada Bulan Desember, Januari dan Februari memiliki perbedaan. Tinggi gelombang signifikan pada Bulan Januari merupakan yang terbesar dibanding pada Bulan Desember dan Februari. Variasi nilai tinggi gelombang signifikan di Bulan Januari juga paling lebar dimana berkisar dari 0,1 - 0,2 m sedangkan pada Bulan Desember dan Februari hanya pada kisaran 0,05 - 0,1 m. Hal ini sejalan dengan variasi kecepatan hembusan angin di area penelitian. Kisaran kecepatan hembusan angin pada Bulan Desember dan Februari hanya pada 2 - 2,5 m/s, sedangkan pada Bulan Januari mampu mencapai 3 - 4 m/s. Hal ini disinyalir disebabkan oleh bulan

menjadi lebih kencang dibanding pada Bulan Desember atau Februari.

Kekuatan gelombang di pesisir barat Kecamatan Kuta berkisar antara 1 - 30 W/m. Pola sebaran kekuatan gelombang yang ditampilkan pada Gambar 10, serupa dengan pola tinggi gelombang signifikan. Kemiripan pola distribusi kekuatan gelombang dan tinggi gelombang signifikan dapat terjadi karena kedua komponen ini memiliki hubungan yang erat. Kekuatan gelombang paling tinggi ditemui pada area dekat dengan daratan. Area yang mampu mencapai kekuatan gelombang paling besar juga teletak pada perairan di sekitar pantai Kuta hingga pantai Seminyak. Mengingat karena area ini membentuk cekungan dan kedalaman yang tidak terlalu dangkal, kekuatan gelombang dapat terkumpul pada area ini. Variasi utama yang terlihat antara pola kekuatan gelombang pada Bulan Desember, Januari dan Februari adalah kisaran kekuatan gelombangnya. Pada Bulan Desember dan Februari, kisaran hanya 1 – 15 W/m, sedangkan pada bulan Januari bisa berkisar dari 7,5 – 30 W/m. Hal ini sejalan dengan kisaran tinggi gelombang signifikan yang juga lebih besar pada bulan Januari.



*JMRT, Volume 6 No 1 Tahun 2023, Halaman: 37-45*  
 Gambar 10. Rerata Kekuatan Gelombang Di Pesisir Barat Kecamatan Kuta Pada Bulan Desember pada (a) Bulan Desember; (b) Bulan Januari; dan (c) Bulan Februari

Area di sekitar landasan pacu Bandar Udara Ngurah Rai memiliki kekuatan gelombang yang juga lebih rendah dibanding area dekat daratan lainnya. Serupa dengan pola tinggi gelombang signifikan, rendahnya kekuatan gelombang dipengaruhi oleh area dangkal yang menjorok ke laut. Menurut Haslett (2008), ketika suatu area pesisir memiliki *headlands*, maka kekuatan gelombang akan terpusat pada *headlands* tersebut. Ujung dari landasan pacu dapat bertindak sebagai *headlands*, hanya saja kekuatan gelombang pada ujung landasan pacu cenderung rendah. Hal ini disebabkan area dangkal dimulai cukup jauh dari ujung landasan pacu, sehingga gelombang tidak langsung pecah dan membawa energi yang besar dari ujung landasan.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa kisaran rata-rata tinggi gelombang signifikan di pesisir barat Kecamatan Kuta di musim barat adalah 0,05 - 0,2 m, sedangkan kisaran rata-rata kekuatan gelombangnya adalah 1 - 30 W/m. Tinggi gelombang signifikan dan kekuatan gelombang terbesar dicapai pada Bulan Januari. Area yang dekat dengan daratan memiliki nilai tinggi gelombang signifikan dan kekuatan gelombang yang lebih besar dibanding area lainnya. Serta diketahui bahwa area yang memiliki nilai tinggi gelombang signifikan dan kekuatan gelombang paling besar terdapat pada perairan di sekitar Pantai Kuta hingga Pantai Seminyak. Pola umum gelombang yang terbentuk berasal dari arah barat daya menuju daratan dan terbagi 2, menyusuri daratan di utara landasan pacu dan daratan di selatan landasan pacu.

#### Daftar Pustaka

Barragán, J. M., de Andrés, M. 2015. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management*, 114, 11-20.

Beardsley, R. C., Chen, C., Xu, Q. 2013. Coastal flooding in Scituate (MA): A FVCOM study of the 27 December 2010 nor'easter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(11), 6030-6045.

Castelle, B., Mariou, V., Bujan, S., Splinter, K. D., Robinet, A., Sénéchal, N., & Ferreira, S. 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135-148.

Chai, T., Draxler, R. R. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250.

Chen, C., Liu, H., Beardsley, R. C. 2003. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 20(1), 159-186.

Chen, C., Beardsley, R. C., Cowles, G., Qi, J., Lai, Z., Gao, G., Stuebe, D., Xu, Q., Xue, P., Ge, J., Ji, R., Hu, S., Tian, R., Huang, H, Wu, L., Lin, H. 2012. *An unstructured-grid, finite-volume community ocean model: FVCOM user manual*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Chen, C., Huang, H., Beardsley, R. C., Xu, Q., Limeburner, R., Cowles, G. W., Sun, Y., Qi, J., Lin, H. 2011. Tidal dynamics in the Gulf of Maine and New England Shelf: An application of FVCOM. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12).

Cornett, A., Zhang, J. 2008. *Nearshore Wave Energy Resources, Western Vancouver Island, BC*. Canada: Canadian Hydraulics Centre.

- Ghosh, T. 2012. Sustainable coastal tourism: Problems and management options. *Journal of Geography and Geology*, 4(1), 163.
- Grashorn, S. 2013. Wave-current interactions in coastal areas [Disertasi]. Jerman: Fakultas Matematika dan Sains, Universitas Oldenburg
- Harley, M. D., Turner, I. L., Kinsela, M. A., Middleton, J. H., Mumford, P. J., Splinter, K. D., Phillipis, M. S., Simmons, J. A., Hanslow, D. J., Short, A. D. (2017). Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Scientific reports*, 7(1), 1-9.
- Hayatdavoodi, M., Cengiz Ertekin, R. 2016. Review of wave loads on coastal bridge decks. *Applied Mechanics Reviews*, 68(3).
- Honey, M., Krantz, D. 2007. *Global trends in coastal tourism*. Washington DC: Center on Ecotourism and Sustainable Development.
- Hilmi, E., Kusmana, C., Suhendang, E., Iskandar, I. 2017. Correlation analysis between seawater intrusion and mangrove greenbelt. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 4(2), 151-168.
- Holthuijsen, L. H. 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. England: Cambridge university press.
- Indarsih, R., Masruri, M. S. 2019. Mangrove conservation as an abatement strategy risk reduction based on ecosystem in the coastal area of the Rembang Regency. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 271(1).
- Karimirad, M. 2014. *Offshore energy structures: for wind power, wave energy and hybrid marine platforms*. New York: Springer.
- Komar, P. D. 2018. Beach processes and erosion—an introduction. In: *CRC Handbook of coastal processes and erosion*. Florida: CRC Press.
- Kordi, M. G., Ghufuron, H., 2011. *Ekosistem Lamun (Seagrass): Fungsi, Potensi, Pengelolaan*. Jakarta, Indonesia: Rineka Cipta.
- Makfiya, N., Siladharna, I. G. B., Karang, I. W. G. A. 2020. Analisis Perubahan Garis Pantai dengan Menggunakan Metode One-Line Model (Studi Kasus: Pantai Kecamatan Kuta, Bali). *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2), 196-204.
- Nur, S. H., Hilmi, E. 2021. The correlation between mangrove ecosystem with shoreline change in Indramayu coast. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 819(1).
- Park, H., Tomiczek, T., Cox, D. T., van de Lindt, J. W., Lomonaco, P. 2017. Experimental modeling of horizontal and vertical wave forces on an elevated coastal structure. *Coastal Engineering*, 128, 58-74.
- Prayogo, L. M. 2021. Pemetaan Suhu Permukaan Laut (SPL) dan Karakteristik Pasang Surut di Perairan Pulau Bali, Indonesia. *Jurnal Laot Ilmu Kelautan*, 3(1), 1-12.
- Qi, J., Chen, C., Beardsley, R. C., Perrie, W., Cowles, G. W., Lai, Z. 2009. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): implementation, validations and applications. *Ocean Modelling*, 28(1-3), 153-166.
- Ramakrishnan, R., Agrawal, R., Remya, P. G., Nagakumar, K. C. V., Demudu, G., Rajawat, A. S., Nair, B., Rao, K. N. 2018. Modelling coastal erosion: A case study of Yarada beach near Visakhapatnam, east coast of India. *Ocean & Coastal Management*, 156, 239-248.
- Rizal, A. M., Ningsih, N. S., Sofian, I., Hanifah, F., dan Hilmi, I. 2019. Preliminary study of wave energy resource assessment and its seasonal variation along the southern coasts of Java, Bali, and Nusa Tenggara waters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(1).
- Rizal, A. M., & Ningsih, N. S. 2020. Ocean wave energy potential along the west coast of the Sumatra island, Indonesia. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 6(2), 137-154.
- Setiawan, F., Prasita, V. D., Widagdo, S. 2020. Pergerakan Arus Permukaan Laut Selat Bali Berdasarkan Parameter Angin dan Cuaca. *J-Tropimar*, 1(2), 1-15.
- Sugiyono, S. 2010. *Metode penelitian kuantitatif dan kualitatif dan R&D*. Indonesia: Alfabeta Bandung.
- Thata, M. A., Puspita, A. I. D., Suriamiharja, D. A., Patittingi, F., Paotonan, C., dan Mustari, A. S. 2021. Estimation of the potential utilization of wave power surrounding Bali beach using CSP-MS. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 841(1)
- Wilks, D. S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 3<sup>rd</sup> Edition. Massachusetts: Academic press.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., Matsuura, K. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of climatology*, 32(13), 2088-2094.
- Wu, X. G., Liu, G. S., Cheng, W. L. 2011. 3D numerical simulation of sediment in the Hangzhou Bay based on FVCOM. *Hydro-science and Engineering*, 4, 86-95.
- Zhang, Z., Chen, C., Song, Z., Zhang, D., Hu, D., Guo, F. 2020. A FVCOM study of the potential coastal flooding in apponagansett bay and clarks cove, Dartmouth Town (MA). *Natural Hazards*, 103(3), 2787-2809.