

KERENTANAN PULAU SOPHIALOUSIA DI KABUPATEN LOMBOK BARAT TERHADAP PERUBAHAN IKLIM DAN KONSEP PENANGANANNYA

Kadek Windy Candrayana^{1,*}, I Gusti Agung Putu Eryani¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Denpasar, Bali, Indonesia

*Corresponding authors: windy.candrayana@warmadewa.ac.id

Submitted: 17 February 2023, Revised: 26 March 2023, Accepted: 27 April 2023

ABSTRACT: Climate change due to increasing temperatures causes changes in sea conditions. Rising sea levels and increasing the occurrence of high waves are the impacts of climate change. This condition threatens the existence of small islands, including Indonesia. One of the islands that is vulnerable to this condition is Sophialousia Island which is the southern border of Indonesia and Australia. The vulnerability of Sophialousia Island was analyzed using the Integrated Coastal Vulnerability Index (ICVI) and adding sea level rise parameters. The number of parameters reviewed are 7 (seven) parameters, namely the type of coastal slope, beach conditions, the percentage of coastal protection, storm events, rob events, sea level rise (SLR), and land use. CMS-Wave modelling is used for strategy simulation handling to reduce the risk of island vulnerability. The results of the vulnerability assessment by ICVI showed that Sophialousia Island was classified as high vulnerability due to climate change. So the recommended handling strategy is to build a floating breakwater and make a revetment. The floating breakwater reduces storm surges, and the revetment increases the island's elevation so it is resistant to SLR.

KEYWORDS: climate change; coastal vulnerability; sea level rise; small island.

ABSTRAK: Perubahan iklim yang terjadi akibat peningkatan suhu menyebabkan terjadinya perubahan kondisi laut. Peningkatan muka air laut serta peningkatan kejadian gelombang tinggi merupakan dampak akibat perubahan iklim. Kondisi ini mengancam keberadaan pulau-pulau kecil di dunia termasuk Indonesia. Salah satu pulau yang rentan terhadap kondisi ini adalah Pulau Sophialousia yang merupakan batas sisi Selatan Indonesia dengan Australia. Kerentanan Pulau Sophialousia dianalisis dengan Integrated Coastal Vulnerability Index (ICVI) serta menambahkan parameter kenaikan muka air laut. Jumlah parameter yang ditinjau adalah 7 (tujuh) parameter yaitu tipe lereng pantai, kondisi pantai, persentase pengaman pantai, persentase kejadian badai, persentase kejadian rob, kenaikan muka air laut (SLR), dan penggunaan lahan. Pemodelan CMS-Wave digunakan untuk simulasi strategi penanganan sebagai upaya menurunkan resiko kerentanan pulau. Hasil penilaian kerentanan dengan ICVI menunjukkan Pulau Sophialousia tergolong kerentanan tinggi akibat perubahan iklim. Sehingga strategi penanganan yang direkomendasikan adalah dengan pembangunan floating breakwater serta pembuatan revetment. Floating breakwater berfungsi untuk mereduksi gelombang badai, dan revetment berfungsi untuk meningkatkan elevasi pulau sehingga tahan terhadap SLR.

KATA KUNCI: perubahan iklim; kerentanan pesisir; kenaikan muka air laut; pulau kecil.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Perubahan iklim selalu terjadi selama terjadinya interaksi bumi dan matahari. Dampak dari perubahan iklim ini adalah peningkatan permukaan air laut akibat terjadinya pemanasan permukaan laut. Pemanasan ini berdampak pada mencairnya es pada Antartica, Greenland dan gunung gletser (Griggs et al., 2021). Perubahan permukaan air ini berlangsung dengan rentang waktu yang lama dan tidak dapat dihindari (Martyr-Koller et al., 2021). Kenaikan muka air laut (*Sea Level Rise*) berdampak pada terjadinya peningkatan gelombang badai (*storm surge*) dan intensitas banjir rob (IPCC, 2021). Kondisi ini berdampak pada kerentanan wilayah pesisir mengalami kerusakan infrastruktur, properti dan

ancaman terhadap keselamatan masyarakat (André et al., 2016).

Perubahan iklim ini juga berdampak pada peningkatan kerentanan pulau-pulau kecil di dunia. Negara berkembang dengan kepulauan kecil (*small island developing states*) merupakan kumpulan organisasi kepulauan kecil yang mengalami dampak akibat perubahan iklim. Organisasi ini merupakan pulau yang berada di Laut Karibia (*Caribbean Sea*), Samudra Pasific, Samudra India, Mediterania dan Laut Cina Selatan. Dampak SLR pada SIDS (*Small Island Developing States*) serupa dengan pesisir lainnya yaitu permasalahan erosi dan berkurangnya area pulau kecil akibat perubahan iklim (Monioudi et al., 2018). Perubahan iklim yang terjadi menyebabkan

peningkatan tinggi gelombang ekstrem, peningkatan energi gelombang dan muka air pasang yang berpengaruh pada peningkatan laju erosi (Thomas et al., 2020). Berdasarkan kondisi tersebut maka pembangunan peisisir pada pulau-pulau kecil perlu beradaptasi dengan perubahan iklim dan ekosistem pada Era Antroposen (Ng et al., 2019).

Ancaman dampak perubahan iklim juga terjadi di Indonesia (Pinuji et al., 2023). Indonesia memiliki 111 (seratus sebelas) pulau-pulau kecil terluar yang merupakan batas negara (Keputusan Presiden Republik Indonesia Tentang Penetapan Pulau-Pulau Kecil Terluar, 2017). Pulau-pulau ini berbatasan langsung dengan wilayah perairan negara Malaysia, Thailand, Singapura, Vietnam, Philipina, Papua New Guinea, Timor Leste dan Australia (Arsana, 2013). Dengan kondisi Indonesia sebagai negara kepulauan, sangat rentan terdampak bahaya dari bencana kenaikan muka air laut khususnya pada pulau kecil (Nabila Afifah Azuga, 2021). Saat ini pemerintah baru memulai dalam menata kondisi pulau terluar sebagai upaya mempertahankan kedaulatan negara (Malik et al., 2019). Salah satu pulau yang saat ini diperhatikan keberadaannya oleh pemerintah adalah Pulau Sophialousia. Pulau ini terletak pada sisi selatan Pulau Lombok yang merupakan titik garis terluar batas dengan Australia (Gambar 1). Kondisi pulau berupa karang yang tidak berpenghuni serta tanpa vegetasi.



Gambar 1. Lokasi dan kondisi Pulau Sophialousia

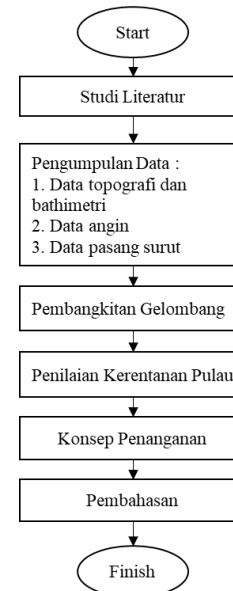
Kondisi Pulau Sophialousia saat ini tidak terdapat bangunan pengaman pantai untuk melindungi pulau dari *sea level rise* (SLR) serta kondisi gelombang tinggi yang mampu merusak mercusuar pada pulau. Penelitian ini mengkaji kerentanan Pulau Sophialousia terhadap perubahan iklim yang terjadi. Serta memberikan rekomendasi penanganan sehingga keberadaan pulau ini dapat dipertahankan untuk menjaga luas wilayah perairan Indonesia.

2 METODOLOGI

2.1 Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan menggunakan pemodelan numeris dan

penilaian kerentanan pulau. Tahapan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Penelitian

2.2 Data Penelitian

Data penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai instansi. Tabel 1 adalah kebutuhan data dan fungsi data dalam penelitian ini.

Tabel 1. Data Penelitian

Data	Sumber	Fungsi
Peta Topografi dan Bathimetri	BWS NT-I	Data dasar model numeris
Data Angin	BMKG	Pembangkitan gelombang
Pasang surut	BWS NT-I	Data input model numeris

2.3 Analisis Kerentanan Pulau

Penilaian kerentanan pesisir terhadap bencana alam dan dampak perubahan iklim merupakan alat untuk pengambilan keputusan dalam upaya penanganan (Koroglu et al., 2019). Penelitian tentang kerentanan pesisir dan pulau kecil telah banyak dilakukan dalam dekade terakhir yang berfokus pada perspektif biofisik, sosial ekonomi dan berbagai pendekatan intergratif lainnya (Nguyen et al., 2016). Penelitian terakhir terkait dengan indeks kerentanan pesisir terintegrasi (*Integrated Coastal Vulnerability Index* (ICVI)) menggunakan 6 (enam) indikator sebagai proxy penilaian kerentanan pesisir (Ng et al., 2019). Pada penelitian ini menggunakan penilaian kerentanan relatif dengan menambahkan parameter kenaikan muka air laut (*sea level rise*) yang ditunjukkan pada Tabel 2. Kerentanan total *relative* dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{Total ICVI} = a + b + c + d + e + f + g \dots\dots\dots (1)$$

dimana, a = nilai Tipe Lereng Pantai, b = nilai kondisi pantai, c = nilai persentase pengaman pantai, d = nilai persentase paparan terhadap badai, e = nilai persentase kejadian banjir rob, f = nilai *sea level rise* (SLR), g =

nilai pemanfaatan/tata guna lahan. Nilai ICVI total diklasifikasikan menjadi kerentanan relatif dari sangat rendah hingga sangat tinggi (Tabel 3).

Tabel 2. Parameter Penilaian Kerentanan

Atribut	Parameter	Tingkat Kerentanan				
		Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
		1	2	3	4	5
Biofisik	Tipe Lereng Pantai	S4 (Tebing dengan material keras)	S3 (Tebing dengan kombinasi lapisan lunak dan keras)	S2 (Tebing dengan lapisan keras, namun lunak pada bagian atas)	S1 (Keseluruhan tebing merupakan material lunak)	-
	Kondisi Pantai	Pantai dengan <i>Dune</i>	Lebar Pantai >50m	Lebar Pantai 50-15m	Tanpa Pantai	-
Gaya Luar	Pengaman Pantai (%)	>80	80-60	60-40	40-20	<20
	Paparan terhadap badai (%)	<20	20-40	40-60	60-80	>80
	Banjir Rob (%)	<20	20-40	40-60	60-80	>80
	SLR (mm/tahun)	<1	1-2	2-5	5-7	>7
Sosial Ekonomi	Tata Guna Lahan	Tidak berpenghuni	Hutan	Pertanian	Industri	Pemukiman

Sumber: Ng et al., 2019

Tabel 3. Klasifikasi Kerentanan berdasarkan Nilai Total ICVI

Total Relative ICVI	Relative Vulnerability
7-11	Sangat Rendah
12-16	Rendah
17-21	Moderate
22-26	Tinggi
>27	Sangat Tinggi

Sumber: Ng et al., 2019

2.4 Pembangkitan Gelombang (Wave Hindcasting)

Pembangkitan gelombang dilakukan karena tidak terdapat seri data pencaatan gelombang dilokasi penelitian. Hasil dari pembangkitan gelombang adalah tinggi dan periode gelombang. Tinggi gelombang merupakan faktor penting dalam desain bangunan pengaman pantai dan struktur lepas pantai (Juliani et al., 2020). Penelitian ini menggunakan metode pembangkitan gelombang dengan *Sverdrup Munk and Bretschneider (SMB) Method*. Metode SMB dipilih karena pada metode ini menghasilkan tingkat kesalahan relatif yang kecil (Silam Siregar et al., 2020). Prosedur peramalan tersebut berlaku baik untuk kondisi fetch terbatas (*fetch limited condition*) dengan Persamaan 2 dan 3, serta kondisi durasi terbatas (*duration limited condition*) pada Persamaan 4 dan 5.

$$H_{mo} = 5.112 \times 10^{-4} \cdot U_A \cdot F^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$T_m = 6.238 \times 10^{-2} (U_A F)^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

$$H_{mo} = 2.482 \times 10^{-2} \times U_A^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$T_m = 8.30 \times 10^{-1} \cdot U_A \dots\dots\dots (5)$$

dimana, H_{mo} = tinggi gelombang (m), T_{mo} = periode gelombang (s), U_A = *wind stress factor* (m/s), dan F = fetch efektif (km).

2.5 Pemodelan Numeris

Daerah pesisir merupakan lingkungan dengan kondisi yang kompleks akibat interaksi pasang surut, arus dan gelombang (Davidson-Arnott, 2009). Interaksi pada lingkungan pesisir dianalisis dengan metode spektral yaitu keseimbangan antara gaya gelombang secara numeris. Model spektral digunakan sebagai dasar pendekatan matematis pada variasi gelombang (Lai & Kim, 2020). Penelitian ini menggunakan model numeris *Coastal Modeling System (CMS)*. Persamaan *steady* digunakan pada model ini dengan propagasi gelombang tidak beraturan (*irregular wave*) akibat refraksi, dan difraksi (Larson & Krauss, 2002). Persamaan dasar yang digunakan adalah variasi dua dimensi dari energi gelombang dan efek arus horisontal gelombang seperti pada persamaan berikut (Mase, 2005).

$$\frac{\sigma(C,N)}{\sigma x} + \frac{\sigma(C_y,N)}{\sigma y} + \frac{\sigma(C_\theta,N)}{\sigma \theta} = \frac{K}{2\sigma} \left[(CC_g \cos^2 \theta N_{cy})_y - \frac{CC_g}{2} \cos^2 \theta N_{yy} \right] - bN - S \dots\dots\dots (6)$$

$$N = \frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma} \dots\dots\dots (7)$$

dimana, $E(\sigma,\theta)$ adalah spectra gelombang dua dimensi (2D wave spectral) yang mewakili energy gelombang pada masing-masing pias muka air tiap frekuensi dan interval arah datang gelombang. Difraksi dan disipasi energy gelombang termasuk dalam persamaan diatas.

2.6 Strategi Penanganan

Strategi penanganan yang dilakukan diseluruh dunia dalam menghadapi kondisi kenaikan muka air laut ini berfokus pada tiga konsep yaitu mundur (*retreat*), akomodasi (*accomodation*) dan penanganan struktur (*coastal protection*) (Pecl et al., 2021). Penelitian ini mengusulkan konsep atau strategi penanganan dampak perubahan iklim berdasarkan hasil simulasi numeris. Beberapa strategi penanganan akan disimulasikan untuk dapat mempertahankan keberadaan Pulau Sophialousia.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Pulau Sophialousia

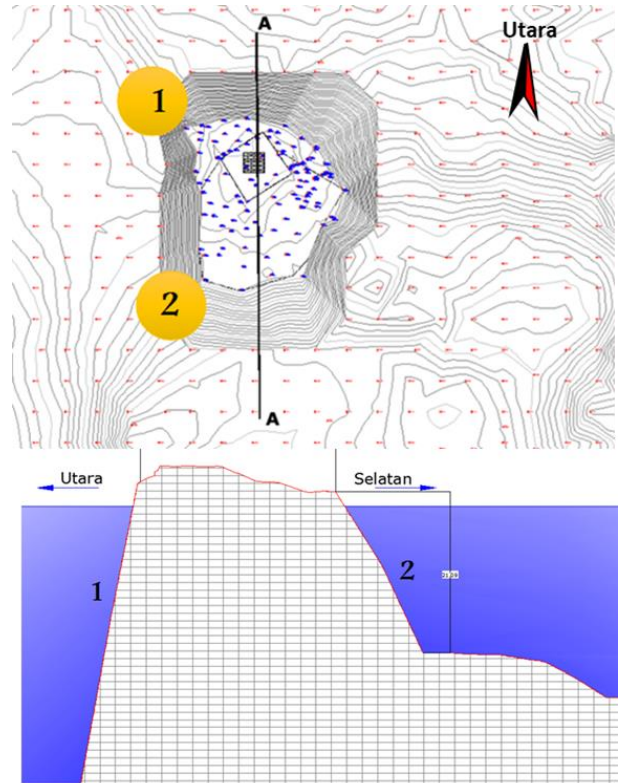
Pulau Sophialousia merupakan pulau tidak berpenghuni dengan luas 300m² dan menjadi 150m² saat pasang. Pulau ini berupa batuan andesit-basaltis tanpa vegetasi. Asal-usul kepulauan ini dan proses-proses yang dialami dalam pembentukan Pulau Sophialousia sampai sekarang masih terjadi, sangat mempengaruhi posisi, ukuran, dan bentuk pulau. Sebagian besar pulau-pulau di kawasan ini, secara geologis, masih sangat muda, dan bagian dari masa daratan lain yang lebih besar. Kerumitan kondisi geologi Nusa Tenggara disebabkan oleh posisinya di persimpangan tiga lempeng geologis yaitu lempeng Asia, lempeng Australia, lempeng Pasifik dan dua benua yaitu Asia dan Australia. Bentuk pulau pada Gambar 3 menunjukkan pada sisi Utara pulau memiliki kemiringan yang terjal.

Terdapat Mercusuar pada atas pulau sebagai sarana navigasi dan penanda kepemilikan Republik Indonesia (Gambar 4). Keberadaan infrastruktur pada pulau ini merupakan aset penting dan diperlukan penanganan serta fasilitas penunjang untuk dapat melakukan pemeliharaan pada aset tersebut.

3.2 Pembangkitan Gelombang

3.2.1 Perhitungan fetch efektif

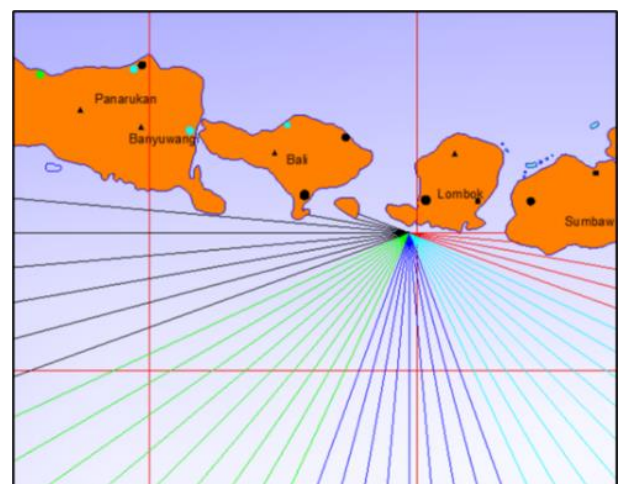
Fetch merupakan daerah pembangkitan gelombang dimana dibatasi oleh daratan disekitar titik bangkitan. Fetch yang terbentuk pada Pulau Sophialousia terbuka pada arah Barat Daya, Selatan dan Tenggara (Gambar 5).



Gambar 3. Bentuk Pulau Sophialousia



Gambar 4. Mercusuar Pulau Sophialousia



Gambar 5. Fetch Pulau Sophialousia

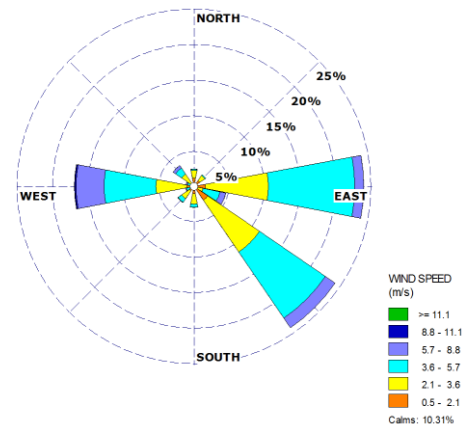
Fetch *unlimited* pada arah Barat Daya hingga Tenggara digunakan 1000 km dengan hasil perhitungan fetch arah lainnya pada Tabel 4.

Tabel 4. Fetch efektif di Pulau Sophialousia

No	Arah	Fetch Effektif	
		m	Km
1	Utara	-	-
2	Timur Laut	-	-
3	Timur	145,682	145.68
4	Tenggara	1,000,000	1,000.00
5	Selatan	1,000,000	1,000.00
6	Barat Daya	1,000,000	1,000.00
7	Barat	689,812	689.81
8	Barat Laut	-	-

3.2.2 Analisis data angin

Data angin yang digunakan diperoleh dari BMKG NTB yang menunjukkan arah angin dominan dari Timur, Tenggara dan Barat (Gambar 6). *Windrose* menunjukkan bahwa saat angin musim Timur jumlah persentase kejadian angin dari arah Timur dan Tenggara mencapai 45.28% dengan rentang kecepatan dominan 3.6-5.7m/s. Hal ini menunjukkan bahwa perairan di Pulau Sophialousia akan mengalami gelombang tinggi saat musim angin Timur atau muson Timur yang terjadi saat kemarau.



Gambar 6. Windrose Sekitar Pulau Sophialousia

3.2.3 Pembangkitan gelombang

Pembangkitan gelombang dilakukan dengan Metode SMB dengan kondisi terbatas fetch dan durasi. Tabel 5 menunjukkan tinggi dan periode gelombang dengan kedua kondisi gelombang. Kondisi gelombang tertinggi terjadi pada kondisi terbatas fetch dengan arah datang dari Tenggara. Hal ini disebabkan karena arah angin dominan dari Tenggara dan kondisi fetch yang sangat terbuka dari arah tersebut. Dari Tabel 5, hasil kondisi gelombang terbatas fetch menghasilkan nilai tinggi gelombang yang lebih besar, sehingga untuk analisis gelombang kala ulang digunakan tinggi gelombang dengan kondisi tersebut. Pemilihan kondisi gelombang ini untuk dapat mengetahui dampak gelombang ekstrem yang ditimbulkan akibat angin di perairan Sophialousia.

Tabel 5. Gelombang Pulau Sophialousia

Tahun	Kecepatan (m/s)	Arah	Fetch (km)	Fetch Limited		Duration Limited	
				H	T	H	T
2011	10.8	E	145.68	1.89	7.00	0.58	8.05
2012	9.26	E	145.68	1.94	7.06	0.62	8.27
2013	7.20	E	145.68	2.03	7.17	0.67	8.64
2014	8.23	E	145.68	1.98	7.11	0.64	8.44
2015	9.26	E	145.68	1.94	7.06	0.62	8.27
2016	11.8	SE	1000.00	4.88	13.23	0.56	7.92
2017	9.26	SE	1000.00	5.09	13.42	0.62	8.27
2018	10.2	SE	1000.00	5.00	13.34	0.59	8.12
2019	14.9	SE	1000.00	4.68	13.05	0.52	7.61
2020	10.8	E	145.68	1.89	7.00	0.58	8.05

3.2.4 Gelombang kala ulang

Gelombang kala ulang dihitung dengan 3 (tiga) metode statistik gelombang yaitu Fishet Tippet, Weibull dan Gumbel (Tabel 6).

Berdasarkan hasil perhitungan periode gelombang dengan berbagai metode tersebut, digunakan metode yang memiliki koefisien korelasi kecocokan terbaik (goodness of fit) yaitu Metode Gumbel yang menghasilkan nilai $r = 0.980$. Nilai ini mendekati angka 1 yang berarti fungsi adanya

hubungan korelasi linear antar variabel. Sehingga untuk perhitungan selanjutnya digunakan tinggi dan periode gelombang seperti pada Tabel 7.

Tabel 6. Tinggi Gelombang Kala Ulang Pulau Sophialousia

Kala Ulang (Tahun)	Metode					
	Fisher-Tippet		Weibull		Gumbel	
	H (m)	R	H (m)	R	H (m)	R
2	3.04	0.93	2.88	0.70	2.45	0.98
5	4.30	0.93	4.29	0.70	3.91	0.98
10	5.10	0.93	5.11	0.70	4.87	0.98
25	6.08	0.93	6.10	0.70	6.09	0.98
50	6.81	0.93	6.82	0.70	7.00	0.98
100	7.52	0.93	7.52	0.70	7.89	0.98

Tabel 7. Tinggi dan Periode Gelombang Kala Ulang

No	Kala Ulang	Tinggi Gelombang (m)	Periode (s)
1	2	2.45	5.37
2	5	3.91	6.73
3	10	4.87	7.63
4	25	6.09	8.76
5	50	7.00	9.60
6	100	7.89	10.43

3.3 Analisis Kerentanan Pulau

Analisis kerentanan pulau berdasarkan parameter pada Tabel 2. Penilaian parameter biofisik Pulau Sophialousia dinilai dari kondisi pulau dengan batuan keras dan tidak memiliki pantai. Tidak terdapat pengaman pantai pada pulau sehingga rentan terhadap paparan badai dan banjir rob akibat kenaikan muka air laut. Tingkat kenaikan muka air laut pada Pulau Sophialousia mencapai 4mm/tahun berdasarkan Peta Kenaikan Muka Air Laut Indonesia. Sehingga penilaian kerentanan relatif pada Pulau Sophialousia dijabarkan pada Tabel 8.

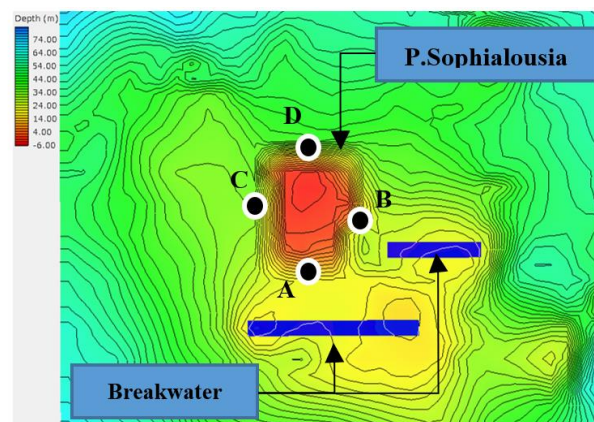
Nilai total ICVI Pulau Sophialousia pada Tabel 8 adalah 24 yang menunjukkan pulau ini memiliki kerentanan tinggi. Sehingga diperlukan penanganan untuk mempertahankan keberadaan pulau akibat ancaman perubahan iklim.

3.4 Strategi Penanganan

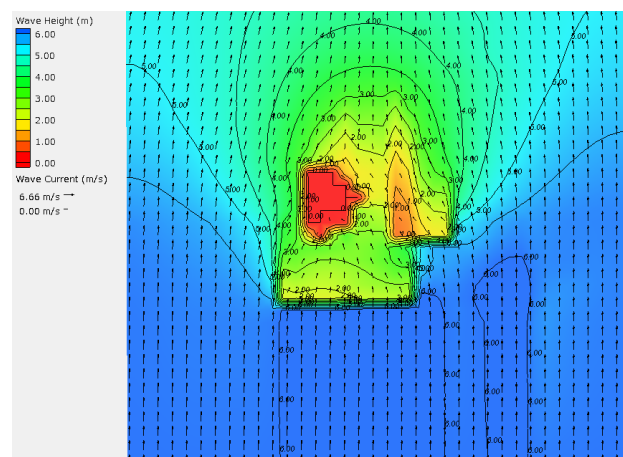
Pulau Sophialousia sangat rentan akibat gaya luar seperti banjir rob, badai dan peningkatan muka air laut

(SLR). Untuk dapat mengurangi kerentanan ini, diperlukan pengaman pantai sehingga mampu mereduksi gelombang badai dan dampak SLR. Bangunan pengaman pantai yang direkomendasikan adalah pemecah gelombang (*breakwater*) untuk mereduksi gelombang badai. *Breakwater* yang direkomendasikan adalah tipe terapung (*floating breakwater*) karena kedalaman di depan pulau mencapai 100m sehingga tidak memungkinkan dibangun *breakwater* konvensional (Gambar 7). Efektifitas *breakwater* disimulasikan dengan CMS-Wave dengan data input gelombang kala ulang 25 tahun hasil analisis dan peta topografi-bathimetri pulau.

Hasil simulasi dengan CMS menunjukkan penempatan *floating breakwater* efektif mereduksi gelombang dari arah Selatan (Gambar 8) sebesar 38% dan mengalami penurunan pada gelombang arah Tenggara (Gambar 9) menjadi 21%. Perubahan tinggi gelombang di masing-masing posisi pulau pada Gambar 7 ditampilkan pada Tabel 9.



Gambar 7. Rencana Konfigurasi *Floating Breakwater*



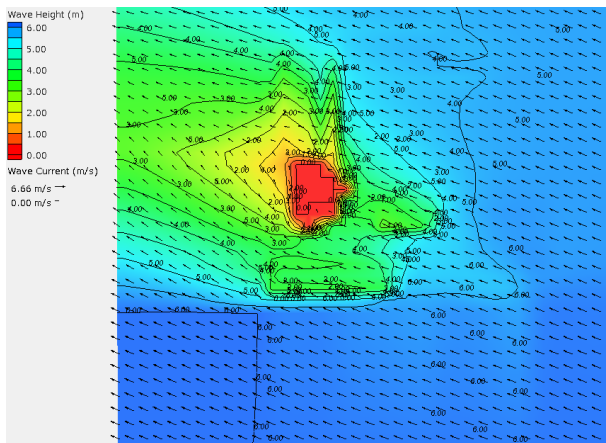
Gambar 8. Hasil Simulasi Gelombang Arah Selatan (H=6.09m, T= 8.79s)

Tabel 8. Penilaian Kerentanan Pulau Sophialousia

Atribut	Parameter	Nilai	Kerentanan	Keterangan
Biofisik	Tipe Lereng Pantai	1	Sangat Rendah	Batuan keras
	Tipe Pantai	4	Tinggi	Tidak terdapat pantai
Gaya Luar	Pengaman Pantai (%)	5	Sangat Tinggi	Tidak terdapat bangunan pantai
	Paparan terhadap badai (%)	5	Sangat Tinggi	Rentan terjadi badai
	Banjir Rob (%)	5	Sangat Tinggi	Rentan terjadi banjir rob
	SLR (mm/tahun)	3	Sedang	4mm/tahun
Sosial Ekonomi	Tata Guna Lahan	1	Sangat Rendah	Tidak berpenghuni
Total		24		

Tabel 9. Hasil CMS-Wave Penempatan *floating breakwater*

Titik	Tinggi Gelombang			
	Eksisting		Penanganan	
	Selatan	Tenggara	Selatan	Tenggara
A	2.60	2.05	1.04	1.29
B	2.66	2.66	1.55	2.39
C	2.67	1.28	2.08	0.90
D	2.11	1.37	1.59	1.22
Rerata	2.51	1.84	1.563	1.452
Max	2.671	2.661	2.08	2.39
% Reduksi	-	-	38%	21%



Gambar 9. Hasil Simulasi Gelombang Arah Tenggara (H=6.09m, T= 8.79s)

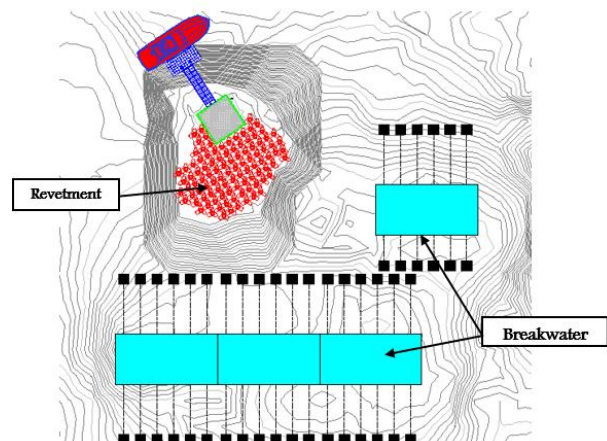
pembangunan *revetment* untuk mengantisipasi *sea level rise* (Gambar 10).

Tabel 10. Hasil Elevasi Puncak Pulau Sophialousia

No	Parameter	Nilai (m)
1	Run-Up	2.000
2	Sea level rise	0.038
3	Storm Surge	0.223
4	Freeboard	0.500
5	High Water Level	2.780
	Total	5.500

Strategi penanganan selanjutnya yang dilakukan untuk mengatasi SLR adalah dengan peninggian elevasi pulau serta penambahan *revetment*. Perhitungan mercu atau elevasi puncak pulau memperhitungkan rayapan (*run-up*), kenaikan muka air laut (*sea level rise*), badai (*storm surge*) dan jagaan (*freeboard*). Hasil analisis elevasi mercu (Tabel 10), diperoleh nilai elevasi pulau +5.50m yang menunjukkan perlu adanya peningkatan level puncak pulau yang saat ini berada di elevasi 4-5m.

Dari hasil analisis numeris yang dilakukan, direkomendasikan penanganan berupa pembangunan *floating breakwater* untuk mereduksi gelombang serta



Gambar 10. Rekomendasi Strategi Penanganan

4 KESIMPULAN

Penilaian kerentanan pulau dengan modifikasi parameter ICVI menunjukkan bahwa Pulau Sophialousia termasuk dalam kerentanan tinggi. Pulau ini memiliki indeks kerentanan tinggi akibat tidak terdapatnya bangunan pengaman pantai, sehingga pulau ini memiliki persentase paparan terhadap badai dan banjir rob sangat tinggi.

Untuk mengurangi kerentanan Pulau Sophialousia adalah dengan pembangunan *floating breakwater* untuk mereduksi tinggi gelombang. Penempatan *floating breakwater* mampu mereduksi gelombang 21% saat arah gelombang Tenggara dan 38% saat gelombang arah Selatan. Pembangunan revetment dengan elevasi puncak +5.50 m dari LWL diharapkan mampu untuk mengantisipasi *sea level rise* akibat perubahan iklim.

Rekomendasi penelitian selanjutnya direkomendasikan dalam mendesain *floating breakwater* yang mampu diaplikasikan pada kondisi bathimetri yang curam. Hal ini menjadi sangat penting karena banyak pulau di Indonesia dengan kondisi yang sama, sedangkan teknologi *floating breakwater* ini belum lazim digunakan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- André, C., Boulet, D., Rey-Valette, H., & Rulleau, B. (2016). Protection by hard defence structures or relocation of assets exposed to coastal risks: Contributions and drawbacks of cost-benefit analysis for long-term adaptation choices to climate change. *Ocean and Coastal Management*, 134, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.003>
- Arsana, I. M. A. (2013). Akankah Indonesia Kehilangan Pulau? *Jurnal Opinio Juris*, 12, 26–48.
- Davidson-Arnott, R. (2009). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Griggs, G., Borja, G., & Reguero. (2021). Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13162151>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- Juliani, V., Adytia, D., & Adiwijaya. (2020). Wave Height Prediction based on Wind Information by using General Regression Neural Network, study case in Jakarta Bay. *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICoICT49345.2020.9166305>
- Koroglu, A., Ranasinghe, R., Jiménez, J. A., & Dastgheib, A. (2019). Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean & Coastal Management*, 178, 104799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>
- Lai, Y. G., & Kim, H. S. (2020). A near-shore linear wave model with the mixed finite volume and finite difference unstructured mesh method. *Fluids*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/fluids5040199>
- Larson, M., & Krauss, N. (2002). *Numerical model for simulating longshore current*.
- Malik, F., J. Kotta, R., & Murni Rada, A. (2019). Kebijakan Penataan Pulau-Pulau Terluar Di Provinsi Maluku Utara Dalam Rangka Mempertahankan Keutuhan Negara

- Kesatuan Republik Indonesia. *Ganesh Law Review*, 1(2), 106–175. <https://doi.org/10.23887/glr.v1i2.58>
- Martyr-Koller, R., Thomas, A., Schleussner, C. F., Nauels, A., & Lissner, T. (2021). Loss and damage implications of sea-level rise on Small Island Developing States. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.05.001>
- Mase, H. (2005). Extended energy-balance-equation wave model for multidirectional random wave transformation. *Ocean Engineering*, 32, 8–9.
- Monioudi, I. N., Asariotis, R., Becker, A., Bhat, C., Dowding-Gooden, D., Esteban, M., Feyen, L., Mentaschi, L., Nikolaou, A., Nurse, L., Phillips, W., Smith, D. A. Y., Satoh, M., Trotz, U. O., Velegrakis, A. F., Voukouvalas, E., Vousdoukas, M. I., & Witkop, R. (2018). Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): the case of Jamaica and Saint Lucia. *Regional Environmental Change*, 18(8), 2211–2225. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1360-4>
- Nabila Afifah Azuga. (2021). Kajian Kerentanan Kawasan Pesisir Terhadap Bencana Kenaikan Muka Air Laut (Sea Level Rise) Di Indonesia. *Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal Of Tropical Marine Research) (J-Tropimar)*, 3(2), 65–76. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v3i2.41>
- Ng, K., Borges, P., Phillips, M. R., Medeiros, A., & Calado, H. (2019). An integrated coastal vulnerability approach to small islands: The Azores case. *Science of the Total Environment*, 690, 1218–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.013>
- Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>
- Pecl, G., Lawrence, J., Lebbe, T. B., Euzen, A., Bongarts Lebbe, T., Rey-Valette, H., Chaumillon, É., Camus, G., Almar, R., Cazenave, A., Claudet, J., Rocle, N., Meur-Férec, C., Viard, F., Mercier, D., Dupuy, C., Ménard, F., Rossel, B. A., Mullineaux, L., ... Gaill, F. (2021). Designing Coastal Adaptation Strategies to Tackle Sea Level Rise. *POLICY AND PRACTICE REVIEWS*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.740602>
- Pintuji, S., de Vries, W. T., Rineksi, T. W., & Wahyuni, W. (2023). Is Obliterated Land Still Land? Tenure Security and Climate Change in Indonesia. In *Land* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/land12020478>
- Keputusan Presiden Republik Indonesia tentang Penetapan Pulau-Pulau Kecil Terluar, Pub. L. No. Nomor 6 (2017).
- Silam Siregar, G. R., Alfari, H., Purnomo, F. M., Ginanjar, S., & Wirasatriya, A. (2020). Validation of Wave Forecasting with the Sverdrup, Munk, and Bretschneider (SMB) Method Using Easywave Algorithm. *Proceeding - AGERS 2020: IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology: Understanding the Interaction of Land, Ocean and Atmosphere: Disaster Mitigation and Regional Resilience*, 11–15. <https://doi.org/10.1109/AGERS51788.2020.9452769>
- Thomas, A., Baptiste, A., Martyr-Koller, R., Pringle, P., & Rhiney, K. (2020). Climate Change and Small Island Developing States. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 1–27. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083355>