

EVALUASI SISTEM PENGAMAN PANTAI DI BALI SELATAN UNTUK MENGATASI TANTANGAN PERUBAHAN IKLIM

Kadek Windy Candrayana^{1,*),}
I Nengah Sinarta²⁾, I Gusti Agung Putu
Eryani³⁾

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas
Teknik dan Perencanaan,
Universitas Warmadewa
windy.candrayana@warmadewa.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil Fakultas
Teknik dan Perencanaan,
Universitas Warmadewa

³Program Studi Teknik Sipil Fakultas
Teknik dan Perencanaan,
Universitas Warmadewa

ABSTRAK

Perubahan iklim ini berdampak pada pesisir Indonesia yang menyebabkan erosi dan banjir rob. Kerusakan pesisir ini berdampak signifikan pada area vital yang berupa kawasan wisata seperti pada pantai Selatan Bali. Laju erosi pada pantai Bali yang saat ini mencapai 2 m/tahun dan sangat berdampak pada keberadaan objek wisata pantai di Bali. Struktur pengaman pantai dibangun dari tahun 1990an hingga saat ini didominasi seawall dan revetment. Struktur eksisting mengalami permasalahan yaitu terjadi banjir rob dan limpasan pada mercu bangunan. Metode yang digunakan adalah dengan menganalisis perubahan tinggi muka air laut dari waktu ke waktu (time series) serta simulasi numeris dengan CMS-Wave untuk memperoleh tinggi gelombang pada struktur. Muka air ekstrem (Extreme Coastal Water Level) dihitung dari rayapan akibat tinggi gelombang, kenaikan muka air laut, pasang surut dan badai. Hasil penelitian ini menunjukkan

kenaikan muka air pada tahun 2022 menyebabkan 53.80% bangunan mengalami overtopping. Pada 20 tahun mendatang (2042) persentase bangunan yang mengalami overtopping meningkat menjadi 67.08%..

Kata Kunci : Perubahan iklim, kenaikan muka air laut, sistem pengaman pantai

ABSTRACT

This climate change impacts the coast of Indonesia, which causes erosion and tidal flooding. This coastal damage significantly affects vital areas in the form of tourist areas, such as on the south coast of Bali. The erosion rate on Bali's beaches currently reaches 2 m/year and dramatically impacts the existence of beach tourism objects in Bali. Seawalls and revetments dominate coastal protection structures built from the 1990s. The existing system is experiencing problems, namely tidal flooding and runoff at the building's crest. The method analyzes sea-level changes over time (time series) and numerical simulations with CMS-Wave to obtain wave heights in the structure. Extreme water level (Extreme Coastal Water Level) is calculated from the creep due to wave height, sea level rise, tides, and storms. The results of this study indicate that the rising water level in 2022 will cause 53.80% of buildings to experience overtopping. In the next 20 years (2042), the percentage of buildings experiencing overtopping will increase to 67.08%.

Keyword : Climate Change, Sea Level Rise, Coastal Management System

1. PENDAHULUAN

Iklim selalu mengalami perubahan selama adanya interaksi bumi dan matahari. Lama penyinaran dan jumlah radiasi yang diterima bumi bervariasi selama ribuan tahun. Perubahan iklim yang terjadi

berkaitan erat dengan permukaan air laut terkait dengan pemanasan permukaan laut. Saat suhu mengalami peningkatan, air laut meningkat akibat mencairnya es pada Antartica, Greenland dan gunung gletser (Griggs and Reguero, 2021). Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change*, kenaikan muka air laut akan berdampak pada peningkatan gelombang badai dan banjir rob (*coastal flooding*) pada area pesisir (IPCC, 2021). Area pesisir ini umumnya adalah daerah urban padat yang sangat rentan mengalami kerusakan infrastruktur, properti dan keselamatan masyarakat (André *et al.*, 2016). Karena kondisi tersebut, maka area pesisir merupakan area prioritas untuk adaptasi perubahan iklim. Tanpa adaptasi yang tepat dan efektif, maka banyak wilayah pesisir yang akan berkurang drastis (Sharaan, Iskander and Udo, 2022). Area pesisir yang berada pada dataran rendah sangat rentan mengalami bencana pesisir akibat kenaikan muka air laut (*sea level raise*). Di seluruh dunia, strategi penanganan pesisir berfokus pada tiga konsep pendekatan adaptasi yaitu mundur (*retreat*), akomodasi (*accommodation*), dan penanganan struktur (*coastal protection*) (Pecl *et al.*, 2021).

Perubahan iklim ini berdampak pada pesisir Indonesia. Sekitar 60% penduduk Indonesia tinggal pada daerah pesisir yang akan terancam akibat perubahan iklim (Djalante, Jupesta and Aldrian, 2021). Terjadi peningkatan muka air laut setiap peningkatan suhu sebesar 1.5°C . Kenaikan suhu ini berdampak pada peningkatan erosi dan hilangnya area daratan (Martyr-Koller and Schleussner, 2023). Dampak yang terjadi selain peningkatan muka air laut adalah meningkatnya laju erosi pada pesisir di wilayah Indonesia. Dampak ini berlangsung pelan dan berlanjut hingga 20 tahun mendatang. Bencana ini tidak seperti tsunami dan gempa bumi yang bisa dirasakan secara langsung dan cepat (Nurhidayah, 2021). Kerusakan pesisir ini

berdampak signifikan pada area vital yang berupa kawasan wisata seperti pada pantai-pantai di Provinsi Bali. Laju erosi pada pantai Bali yang mencapai 2 m/tahun sangat berdampak pada keberadaan objek wisata pantai di Bali (Aryastana, Ardantha and Candrayana, 2018). Kerusakan pesisir yang disebabkan oleh perubahan iklim ini telah ditangani oleh pemerintah melalui Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Penanganan yang dilakukan berupa pembuatan struktur pengaman pantai (*hard structure*) dan pengaturan regulasi melalui sempadan pantai. Dari 633.35 km panjang pantai di Bali, 107.04 km telah ditangani dengan membangun struktur pengaman pantai. Struktur pengaman pantai dibangun dari tahun 1990an hingga saat ini dan didominasi dengan struktur berupa seawall dan revetment (BWSBP, 2016).

1.1 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah “bagaimana kondisi bangunan pengaman pantai di Bali Selatan dalam menghadapi perubahan iklim”.

1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan penelitian ini adalah “Mengetahui kondisi bangunan pengaman pantai di Bali Selatan dalam menghadapi perubahan iklim”

1.3 Urgensi Penelitian

Urgensi penelitian ini adalah secara praktis sebagai informasi kepada pemerintah terkait kinerja bangunan pengaman pantai eksisting dalam menghadapi perubahan iklim. Hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi pemerintah dalam meningkatkan kinerja bangunan untuk menghadapi perubahan kenaikan muka air laut yang terjadi.

Secara teoritis, penelitian ini sebagai dasar dalam melakukan penelitian lanjutan tentang peningkatan kinerja bangunan

pengaman pantai dalam menghadapi perubahan iklim.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini dilakukan pada pantai di sisi Selatan Pulau Bali. Bali merupakan daerah tujuan wisata dengan mengandalkan keindahan pantai sebagai objeknya. Pantai pada bagian Selatan Bali saat ini berkembang menjadi daerah wisata dengan terbangunnya fasilitas penunjang wisata seperti hotel, villa dan beach bar. Perkembangan infrastruktur penunjang wisata pada daerah ini sangat rentan terhadap perubahan iklim yang menyebabkan kenaikan muka air laut. Sehingga daerah ini yang dijadikan fokus penelitian. Pantai yang menjadi kajian ini dari Pantai Sanur di Kota Denpasar hingga Pantai Lebih di Kabupaten Gianyar dengan total panjang pantai adalah 20.68 km dengan gambar sebagai berikut.



Gambar 1.
Lokasi Penelitian

2.1. Pengumpulan Data

Perubahan garis pantai pada lokasi kajian telah berlangsung sebelum studi dan telah ditangani dengan membangun perlindungan pantai berupa struktur pengaman pantai (*hard structure*) dari Pantai Padanggalak hingga Pantai Lebih dan pengisian pasir (*soft structure*) pada Pantai Sanur. Data dikumpulkan dari instansi pemerintah yang melakukan penanganan pantai yaitu Balai Wilayah

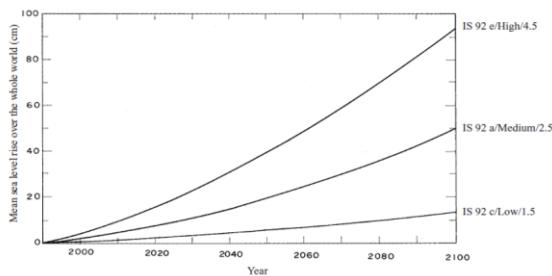
Sungai Bali Penida dengan mencari data struktur pengaman pantai yang terbangun serta data perencanaan. Data bathimetri perairan menggunakan kombinasi antara hasil pengukuran dan data bathimetri dari *General Bathymetric Chart of Ocean* (GEBCO). Data bathimetri dari GEBCO cukup akurat digunakan dalam menganalisis morfologi dasar laut (Lubis et al., 2021). Data primer yang dikumpulkan adalah data pasang surut dan kondisi bangunan pengaman pantai. Data pasang surut diperoleh dengan memasang alat pencatatan pasang surut otomatis pada beberapa wilayah yang menggambarkan kondisi pasang surut di lokasi. Pasang surut ditempatkan untuk mewakili kondisi pantai dan pada posisi yang kondisi gelombang cukup tenang agar tidak terjadi fluktuasi data (Xie, 2022). Data kejadian banjir rob diperoleh dari wawancara dengan nelayan atau masyarakat yang berada pada lokasi studi.

2.2. Analisis Pasang Surut dan Gelombang

Pasang surut merupakan pola fluktuasi muka air laut sebagai hubungan antara gaya gravitasi, posisi bumi terhadap matahari dan bulan. Data amatan pasang surut sesaat dapat digunakan untuk memprediksi muka air rerata (*mean sea level*), muka air tertinggi (*high water level*) dan muka air surut (*low water level*) dengan menggunakan Metode Least Square. Metode ini dapat menunjukkan estimasi muka air laut yang sesuai walaupun dengan data pengamatan yang singkat (Siddig, Al-Subhi and Alsaafani, 2019). Analisis hasil pengamatan pasang surut menggunakan World Tide Matlab, yang menerapkan hasil analisis harmonik kuadrat terkecil untuk membedakan komponen pasang surut, prediksi pasang surut, dengan menggunakan 35 komponen pasang surut (Boon, 2013). Persamaan yang digunakan dalam model matematika ini untuk analisis dan prediksi gelombang adalah:

$$h(t) = h_0 + \sum_{j=1}^m f_j H_j \cos(\omega_j t + u_j - K_j^*) \dots \quad (1)$$

Dimana : $h(t)$ adalah prediksi muka air pada waktu t , h_0 adalah muka air rerata, f_f adalah faktor bulan untuk konstituen ke- j , H_j adalah amplitudo rerata untuk konstituen ke- j selama 18.6 tahun siklus simpul bulan, ω_j adalah frekuensi, u_j dan k_j adalah konsanta. Hasil perubahan muka air laut pada lokasi penelitian dibandingkan dengan prediksi kenaikan muka air laut global (Gambar 2) sehingga dapat diprediksi kenaikan muka air laut pada masa mendatang.



Gambar 2.

Prediksi Kenaikan Muka Air Laut Global (Griggs, Borja and Reguero, 2021)

Gelombang merupakan elemen penting dalam model numeris pantai. Analisis gelombang berkembang dari pembangkitan gelombang dengan data angin hingga pemanfaatan data satelit. Salah satu data gelombang satelit yang *open source* adalah data dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) yang diunduh pada *ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present (copernicus.eu)*. Data dari ECMWF mampu memberikan informasi gelombang pada suatu lokasi dengan baik (Foli *et al.*, 2022). Data gelombang dari ECMWF berupa file NetCDF diolah dengan menggunakan software ODV 4. Hasilnya berupa data dalam bentuk Text (.txt). Data dengan bentuk Text (.txt) ditampilkan di microsoft excel dan dikelompokan sesuai musim sehingga

didapat gelombang signifikan selama 10 tahun terakhir. Dari data gelombang ini selanjutnya dilakukan pengolahan statistik gelombang untuk memprediksi tinggi gelombang dengan berbagai kala ulang.

2.3. Simulasi Numeris

Lingkungan pesisir dicirikan oleh proses alam yang kompleks akibat interaksi pasang surut, gelombang, dan arus (Davidson-Arnott, 2009). Untuk dapat memahami interaksi tersebut, saat ini digunakan simulasi numeris dengan didasarkan pada metode spektral yaitu persamaan keseimbangan antara aksi gelombang secara numerik. Model spektral digunakan sebagai ekspresi matematis pada variasi gelombang dengan energi dan proses disipasi (Lai and Kim, 2020). Model yang banyak digunakan adalah CMS Wave yang mengadopsi penyederhanaan persamaan *steady* pada gelombang. CMS Wave adalah model fase rerata untuk propagasi gelombang tidak beraturan (*irregular wave*) pada kondisi bathimetri yang rumit serta gelombang yang mengalami refraksi, difraksi, shoaling dan pecah secara simultan pada area pantai. Terdapat 4 (empat) persamaan gelombang yang dapat dipilih pada opsi CMS-Wave serta interaksi gelombang dan arus. Interaksi gelombang dan arus dihitung berdasarkan hubungan disperse dan hambatan gelombang akibat arus balik (Larson and Krauss, 2002).

Dasar teori dari CMS-Wave adalah persamaan keseimbangan aksi gelombang. Persamaan ini mewakili variasi dua dimensi (2D) dari energy gelombang dan memperhitungkan efek arus horizontal terhadap perilaku gelombang. Berikut adalah persamaan tersebut (Mase, 2005).

Dimana :

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \dots \dots \dots \quad (3)$$

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

2.4. Evaluasi Sistem Pengaman Pantai terhadap SLR

Evaluasi sistem pengaman pantai terhadap SLR ditinjau dari evaluasi terhadap *hard structure* dan *soft structure*.

2.4.1 Evaluasi *Hard Structure*

Penanganan berupa *hard structure* digunakan dalam strategi mempertahankan garis pantai karena merupakan solusi yang cepat pada pantai yang erosi. Jenis dari penanganan ini dapat berupa struktur kedap berupa seawall ataupun struktur permeable berupa revetment (Rashidi *et al.*, 2021). Kinerja dari *hard structure* ditinjau berdasarkan kemampuan menahan erosi dan mencegah terjadinya overtopping. Kondisi overtopping dapat menyebabkan kegagalan struktur yang selanjutnya dapat menyebabkan bencana yang lebih luas seperti banjir rob (*coastal flooding*) (Bertin, 2014). Peristiwa overtopping disebabkan oleh muka air laut ekstrem (*Extreme Coastal Water Level*) yang merupakan kombinasi antara kenaikan muka air laut, badi (*storm surge*), rayapan gelombang (*run up*) dan muka air pasang (HWL) (Melet *et al.*, 2018). Berikut adalah persamaan dalam menghitung ECWL.

Dimana SLR adalah kenaikan muka air laut (m), SS adalah storm surge (m), T adalah pasang surut (m) dan R adalah run-up gelombang. ECWL ini yang digunakan dalam menilai kinerja *hard structure* dalam mereduksi overtopping akibat SLR.

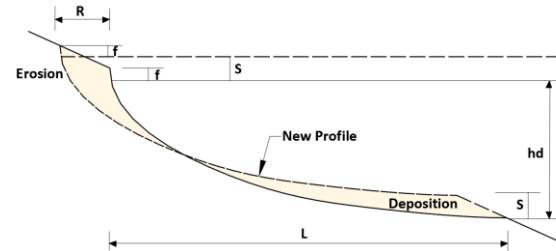
2.4.2 Evaluasi *Soft Structure*

Penanganan berupa *soft structure* seperti pembuatan gumuk pasir (*Sand dunes*) dan pengisian pasir (*beach nourishment*). Strategi ini dianggap lebih

efektif dalam menciptakan pantai alami dengan lebar pantai yang cukup untuk menunjang aktifitas pesisir (Cooke *et al.*, 2012). Penilaian kemampuan *soft structure* untuk menghadapi SLR didasarkan atas tingkat erosi yang mungkin terjadi. Perhitungan perubahan garis pantai (R), direpresentasikan dalam persamaan parabola sebagai fungsi dari muka air sesuai dengan (Crooks, 2004). Dimana persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$R = S \propto \frac{L}{h_d + F} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana R adalah kecenderungan perubahan garis pantai (m), L adalah lebar pantai hingga surut, h_d adalah muka air pasang, S adalah SLR (m) dan F adalah tinggi jagaan.



Gambar 3.
Erosi Isian Pasir Akibat SLR

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Sistem Pengaman Pantai

Metode pengaman pantai dapat dibedakan menjadi *hard* dan *soft* struktur (Hudson, Keating and Pettit, 2008). Struktur *hard* pada umumnya memberikan dampak negatif pada fasilitas dan view pantai. Struktur ini harus dipertahankan dan dipelihara untuk dapat melindungi daerah pesisir dari desain gelombang yang baru dan akibat perubahan iklim (Bayle *et al.*, 2020). Sistem pengaman pantai yang dibangun pada lokasi studi yang berupa *hard structure* berupa revetment, groin, dan breakwater, sedangkan kategori *soft structure* berupa isian pasir (*beach fill*). Kondisi *hard structure* pada lokasi studi saat ini pada beberapa ruas revetment mengalami kerusakan akibat terjadinya gelombang tinggi dan pasang tertinggi. Kejadian ini terjadi pada bulan

November-Desember dengan kondisi revetment sebagai berikut.



Gambar 4.
Kondisi *Hard Structure* di Lokasi Studi

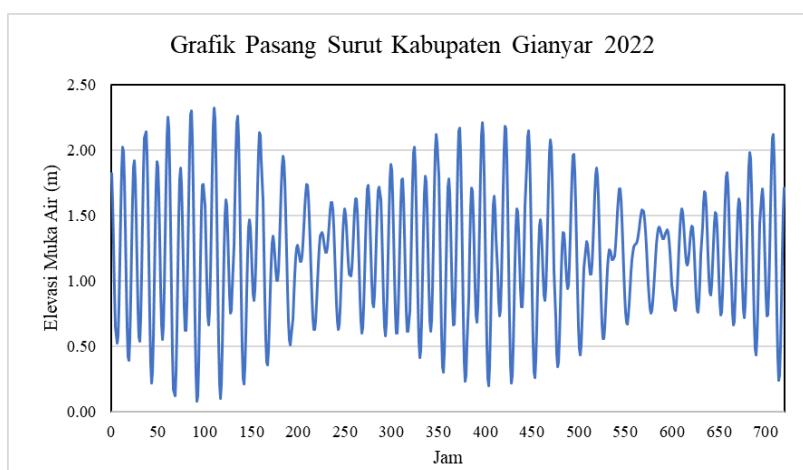
Soft structure berupa pengisian pasir merupakan penanganan kerusakan pantai yang mahal dan dapat berdampak pada ekosistem (Seymour *et al.*, 1995). Selain itu, penanganan dengan pengisian pasir memiliki umur konstruksi yang pendek tergantung dari volume pengisian pasir. Pemeliharaan rutin seperti pengisian kembali dan modifikasi profil perlu dilakukan untuk mengatasi perubahan kondisi desain (Cartwright, Brundrit and Fairhurst, 2008). *Soft structure* berupa pengisian pasir terletak di ruas Pantai Sanur. Kondisi isian pasir saat ini masih dalam keadaan stabil dinamis dimana tidak terjadi perubahan volume dan

bentuk pantai pada beberapa segment. Dari Ruas Pantai Sanur yang dilakukan pengisian pasir, terdapat satu ruas antara groin yang mengalami perubahan bentuk dan profil pantai yang signifikan. Berikut adalah kondisi perubahan kondisi profil dan garis pantai pada lokasi tersebut.

3.2 Kenaikan Muka Air Laut

Kenaikan muka air laut diperoleh dengan membandingkan perubahan muka air laut dari seri data pengamatan pasang surut. Studi ini melakukan satu pengamatan pasang surut selama 5 hari yang selanjutnya dilakukan analisis data sehingga data yang diperoleh menjadi 30 hari. Posisi pengamatan pasang surut berada didekat Pantai Lebih, Kabupaten Gianyar.

Hasil pencatatan pasang surut ditampilkan pada Gambar 5. Hasil dari analisis menggunakan World Tide Matlab, diperoleh nilai High Water Level (HWL) sebesar 3.05 m, Mean Sea Level (MSL) sebesar 1.42 m dan Low Water Level sebesar 0.00m.



Gambar 5.
Hasil Pengamatan Pasang Surut

Perbandingan perubahan muka air laut dilakukan dengan membandingkan data tahun 2000 saat proyek Pantai Sanur

yaitu *Bali Beach Conservation Project*, data tahun 2013 dan 2020 menggunakan

data dari Balai Wilayah Sungai Bali-Penida.

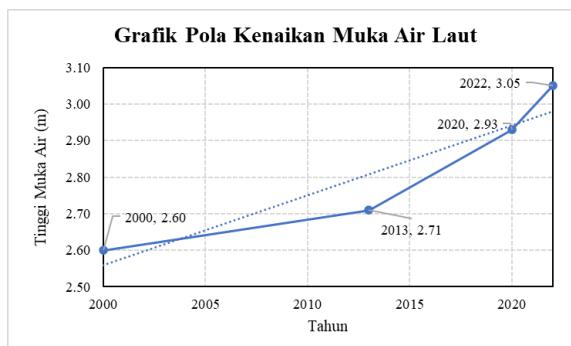
Tabel 1 merupakan nilai seri data pasang surut dari data sekunder dan hasil pengamatan.

Tabel 1
Seri Data Pasang Surut

Parameter	Time Series Pasang Surut			
	2000	2013	2020	2022
<i>High Water Level (HWL)</i>	2.60	2.71	2.93	3.05
<i>Mean Sea Level (MSL)</i>	1.30	1.35	1.41	1.42
<i>Low Water Level (LWL)</i>	0.00	0.00	0.00	0.00

Perubahan muka air laut rerata (*Mean Sea Level*) dari data yang ada menunjukkan terjadi peningkatan muka air laut 5cm pada 2013, meningkat menjadi 6cm pada tahun 2020 dan pada tahun 2022 meningkat 1cm. Jika nilai ini disuperposisi dengan grafik sea level rise dari IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) pada Gambar 2, maka diketahui bahwa kenaikan muka air laut di Pantai

Selatan Bali termasuk dalam kategori medium. Dari nilai ini selanjutnya yang digunakan dalam memprediksi kenaikan muka air laut rerata pada 20 tahun mendatang. Tahun 2042 terjadi peningkatan muka air laut pasang sebesar 45cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Tinggi muka air laut ini yang digunakan dalam menghitung ECWL.

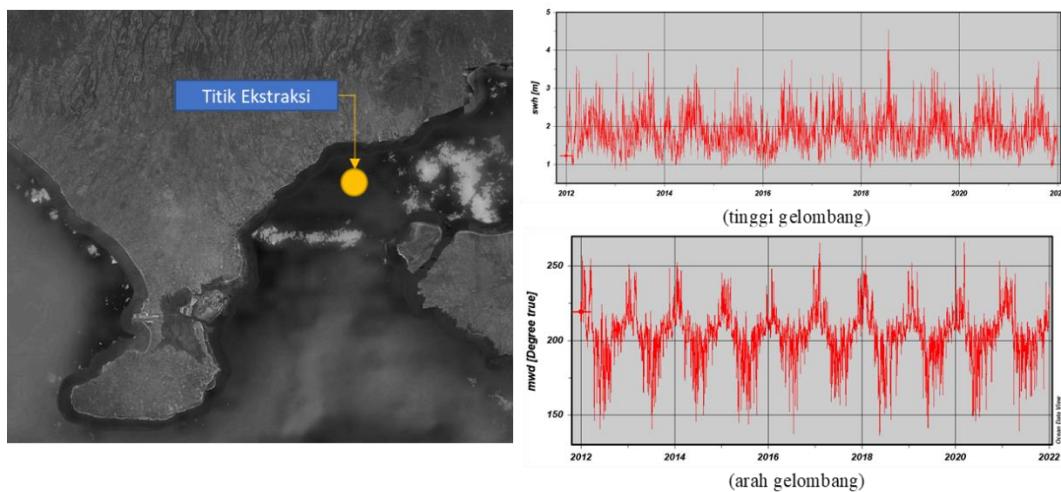


Gambar 6.
Seri Data dan Prediksi Perubahan Muka Air Laut Pasang

3.3 Simulasi Numeris

Data gelombang digunakan dari ekstraksi ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>) melalui *Ocean Data View*. Tinggi gelombang yang digunakan adalah gelombang maksimum

yang terjadi pada masing-masing tahun selama 10 tahun terakhir. Posisi ekstraksi data dan grafik tinggi gelombang signifikan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7.
Data Gelombang Lokasi Studi

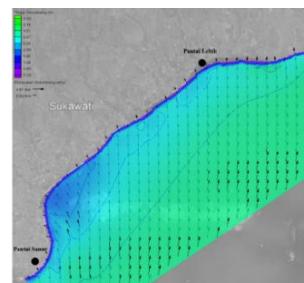
Tabel 2 adalah rekapitulasi tinggi gelombang maksimum tahunan hasil ekstraksi data ECMWF. Tinggi gelombang tiap tahunnya rata-rata berada diatas 3.00 m. Data gelombang ini yang digunakan

sebagai input pada model numeris untuk mengetahui tinggi gelombang pada masing-masing posisi bangunan pantai.

Tabel 2
Gelombang Maksimum Tahunan

No	Year	U ₁₀ (m/s)	V ₁₀ (m/s)	Wave Dir	Hs (m)	Wave Period (s)
1	2012	5.18	5.33	217.57	3.15	10.69
2	2013	4.41	6.59	218.48	3.11	11.54
3	2014	4.77	5.84	211.55	3.09	10.22
4	2015	8.36	1.36	231.82	3.07	11.18
5	2016	6.00	3.71	252.58	3.07	10.65
6	2017	5.33	4.13	227.34	3.06	11.14
7	2018	5.24	5.33	203.71	3.18	9.92
8	2019	5.01	6.58	194.03	3.19	9.52
9	2020	4.42	7.13	194.80	3.22	9.58
10	2021	8.29	1.22	228.58	3.05	10.69

Simulasi transformasi gelombang menggunakan program CMS (*Coastal Modeling System*) dengan input berupa peta bathimetri, dan spektrum gelombang hasil analisis. Domain pemodelan dilakukan dari Pantai Sanur hingga Pantai Lebih untuk mengetahui tinggi gelombang pada masing-masing posisi bangunan.



Gambar 8.
Seri Data dan Prediksi Perubahan
Muka Air

Dari hasil model transformasi gelombang seperti pada Gambar 8, dilakukan peninjauan perubahan profil gelombang pada masing-masing ruas pantai yang termasuk dalam lokasi studi. Tinggi gelombang hasil model, digunakan dalam menentukan tinggi elevasi muka air laut ekstrem (*extreme coastal water level*) sebagai penentuan evaluasi tinggi bangunan eksisting. *Extreme Coastal*

Water Level (ECWL) pada tahun 2022 ini memperhitungkan tinggi gelombang, muka air pasang (H WL) dan rayapan gelombang (*Run-up*). Sedangkan untuk prediksi ECWL pada tahun 2042 memperhitungkan gelombang kala ulang dan SLR.

Tabel 3 adalah rekapitulasi hasil perhitungan ECWL untuk tahun 2022 dan prediksi pada 20 tahun mendatang dengan parameter seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Tabel 3
Rekapitulasi Perhitungan DWL Pada Lokasi Studi

Pantai	HWL (m)	H (m)	Run Up (m)	Storm Surge (m)	Tahun 2022	Tahun 2042
					ECWL (m)	ECWL (m)
Sanur	3.05	1.24	1.364	0.070	3.51	3.91
Matahari Terbit	3.05	1.56	1.716	0.112	4.27	4.67
Padang Galak	3.05	1.86	2.046	0.159	4.38	4.78
Tangtu	3.05	1.67	1.837	0.128	5.27	5.67
Lembeng	3.05	1.58	1.738	0.114	5.31	5.71
Gumicik	3.05	1.69	1.859	0.131	5.36	5.76
Pabean	3.05	1.71	1.881	0.134	5.26	5.66
Purnama	3.05	1.81	1.991	0.150	5.33	5.73
Saba	3.05	1.74	1.914	0.139	5.39	5.79
Pering	3.05	1.67	1.837	0.128	5.24	5.64
Keramas	3.05	1.96	2.156	0.176	5.53	5.93
Masceti	3.05	1.74	1.914	0.139	5.28	5.68
Lebih	3.05	2.15	2.365	0.212	6.16	6.56

3.4 Evaluasi Sistem Pengaman Pantai

Evaluasi kinerja *hard structure* dalam menghadapi perubahan iklim ditinjau dari kondisi elevasi mercu bangunan terhadap ECWL. Penanganan *hard structure* dilokasi studi didominasi berupa revetment dari batu (*rubble mound revetment*) yang dibangun bertahap dari tahun 2007.

Tabel 4 menunjukkan pada tahun 2022 sebesar 53.80% bangunan mengalami overtopping dan pada 20 tahun mendatang

(2042) persentase bangunan yang mengalami overtopping meningkat menjadi 67.08%. Hanya 3 (tiga) ruas pengaman pantai pada tahun 2022 yang tidak mengalami limpasan/overtopping yaitu ruas Pantai Sanur, Lembeng dan Purnama. Hal ini karena pada Pantai Sanur menggunakan kombinasi antara *hard structure* dengan pengisian pasir, sedangkan pada Pantai Lembeng dan Purnama adalah bangunan baru yang dibangun pada tahun 2021. Prediksi pada

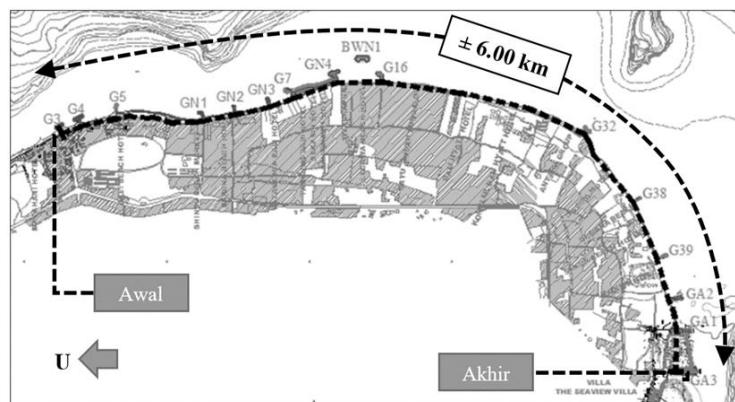
tahun 2042 menunjukkan hanya Pantai Sanur yang masih aman terhadap kenaikan muka air laut namun tinggi jagaan masih dibawah 0.5m sehingga masih dalam kategori rentan terhadap SLR.

Soft Structure yang terdapat dilokasi studi berupa pengisian pasir pada Pantai

Sanur. Pengisian pasir ini dikombinasikan dengan *hard structure* berupa groin dan breakwater seperti pada Gambar 9. Evaluasi *soft structure* dilakukan dengan prediksi perubahan garis pantai hasil isian pasir berdasarkan fungsi parabola akibat kenaikan muka air laut.

Tabel 4
Rekapitulasi Evaluasi *Hard Structure*

No	Pantai	Jenis Bangunan	Panjang Bangunan (km)	Elevasi Puncak	2022		2042	
					ECWL	Kondisi	ECWL	Kondisi
1	Sanur	Groin dan Breakwater	6.00	+4.00	3.51	Aman	3.91	Aman
2	Matahari Terbit	Revetment	0.76	+4.00	4.27	Overtopping	4.67	Overtopping
3	Padang Galak	Revetment	1.60	+4.00	4.38	Overtopping	4.78	Overtopping
4	Tangtu	Revetment	1.15	+5.00	5.27	Overtopping	5.67	Overtopping
5	Lembeng	Revetment	0.46	+5.00	5.31	Aman	5.71	Overtopping
6	Gumicik	Revetment	1.80	+5.00	5.36	Overtopping	5.76	Overtopping
7	Pabean	Revetment	0.38	+5.00	5.26	Overtopping	5.66	Overtopping
8	Purnama	Revetment	1.96	+5.00	5.33	Aman	5.73	Overtopping
9	Saba	Revetment	0.30	+5.00	5.39	Overtopping	5.79	Overtopping
10	Pering	Revetment	0.58	+5.00	5.24	Overtopping	5.64	Overtopping
11	Keramas	Revetment	0.35	+5.00	5.53	Overtopping	5.93	Overtopping
12	Masceti	Revetment	1.44	+5.00	5.28	Overtopping	5.68	Overtopping
13	Lebih	Revetment	1.45	+5.00	6.16	Overtopping	6.56	Overtopping
Total			18.23					



Gambar 9.
Sistem Pengaman Pantai Sanur

Evaluasi pada *soft structure* Pantai Sanur menggunakan metode pada Gambar 3. Segment yang ditinjau sesuai dengan Gambar 9.

Tabel 5 menunjukkan ruas pantai Sanur 20 tahun mendatang akan mengalami erosi rata-rata sebesar 2.66m.

Tabel 5
Evaluasi Erosi Pada Soft Structure Akibat SLR

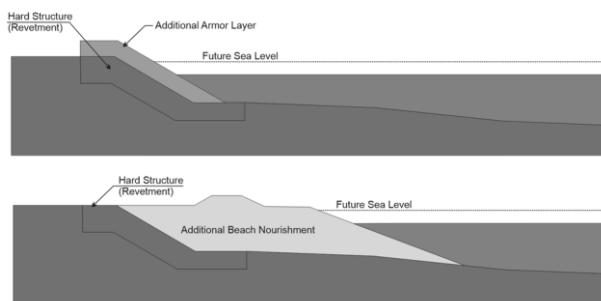
Segment	L (m)	SLR (m)	hd (m)	f (m)	R (m)
G3-G4	35.10	0.40	3.91	0.09	3.51
G4-G5	31.23	0.40	3.91	0.09	3.12
GN1-GN2	26.96	0.40	3.91	0.09	2.70
GN2-GN3	33.92	0.40	3.91	0.09	3.39
G7-GN4	20.26	0.40	3.91	0.09	2.03
GN4-G16	21.30	0.40	3.91	0.09	2.13
G32-G38	22.81	0.40	3.91	0.09	2.28
G38-G39	19.58	0.40	3.91	0.09	1.96
G39-GA2	30.12	0.40	3.91	0.09	3.01
GA2-GA1	24.26	0.40	3.91	0.09	2.43
Rerata					2.66

Tingkat erosi semakin tinggi pada segmen pantai yang memiliki profil yang landai dengan lebar daerah aktif diatas 30m. Kondisi ini dapat ditangani dengan pemeliharaan rutin dengan pengisian pasir kembali dan pembentukan kembali profil pantai pasca badi.

3.5 Rekomendasi Adaptasi

Rekomendasi adaptasi pengaman pantai untuk mengurangi pengaruh perubahan iklim disesuaikan dengan jenis

pengaman pantai. Kondisi hard structure yang berupa revetment dari hasil analisis menunjukkan keseluruhan ruas akan mengalami overtopping yang dapat menyebabkan kerusakan pada infrastruktur wisata dibelakangnya. Rekomendasi untuk meningkatkan kinerja pada hard structure dapat dilakukan dengan 2 (dua) alternatif yaitu penambahan lapisan armor untuk meningkatkan elevasi bangunan atau dengan pengisian pasir sehingga mampu mengurangi dampak rayapan gelombang.



Gambar 10.
Rekomendasi Adaptasi Pada *Hard Structure*

Alternatif penambahan lapisan armor pada revetment merupakan penanganan jangka pendek untuk mereduksi dampak SLR. Penambahan isian pasir dapat efektif mereduksi dampak SLR namun memerlukan biaya konstruksi yang besar dan memerlukan pemeliharaan rutin. Namun alternatif ini dapat memberikan nilai tambah pada pesisir karena

menyediakan area pantai yang lebar untuk aktifitas wisata seperti pada Pantai Sanur. Untuk adaptasi pada *soft structure* dapat dilakukan dengan pengisian kembali (*re-nourishment*) sehingga lebar pantai tetap terjaga untuk menunjang wisata.

4. KESIMPULAN

Peningkatan suhu pada atmosfir menyebabkan kenaikan muka air laut

secara global. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada Pantai Selatan Bali akan mengalami kenaikan muka air laut sebesar 40cm pada 20 tahun mendatang. Kenaikan muka air laut yang terjadi pada pantai studi tergolong kategori sedang (*medium projection*). Dampak dari kenaikan muka air laut menyebabkan menurunnya kinerja bangunan pengaman pantai khususnya bangunan tipe *hard structure*. Kenaikan muka air pada tahun 2022 menyebabkan 53.80% bangunan mengalami overtopping dan pada 20 tahun mendatang (2042) persentase bangunan yang mengalami overtopping meningkat menjadi 67.08%. Tipe bangunan berupa *soft structure* yaitu pengisian pasir juga mengalami dampak akibat SLR. Diprediksi akan terjadi kemunduran garis pantai rata-rata sebesar 2.66m di Pantai Sanur yang merupakan hasil pengisian pasir. Untuk meningkatkan kinerja *hard structure* direkomendasikan dengan penambahan lapisan armor atau dengan penambahan pengisian pasir. Alternatif penambahan armor perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan model fisik untuk mengetahui stabilitas susunan batu jika dilakukan penambahan armor. Rekomendasi untuk *soft structure* adalah dengan melakukan pengisian pasir kembali (*re-nourishment*) untuk menjaga elevasi dan profil pantai.

5. DAFTAR PUSTAKA

- André, C. et al. (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, pp. 173–182. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.10.003.
- Aryastana, P., Ardantha, I. M. and Candrayana, K. W. (2018) ‘Coastline change analysis and erosion prediction using satellite images’, *MATEC Web of Conferences*, 197, pp. 1–5. doi: 10.1051/matecconf/201819713003.
- Bayle, P. M. et al. (2020) ‘Performance of a dynamic cobble berm revetment for coastal protection, under increasing water level.’, *Coastal Engineering*, 159, p. 103712. doi: 10.1016/J.COASTALENG.2020.103712.
- Bertin, X. (2014) ‘A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay’, *Coastal Engineering*, 94, pp. 80–89.
- Boon, J. (2013) *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Applications, Storm Surges and Sea Level Trends*. Elsevier.
- BWSBP (2016) *Studi Updating Abrasi Pantai di Provinsi Bali*.
- Cartwright, A., Brundrit, G. and Fairhurst, L. (2008) *Global Climate Change and Adaptation A Sea-Level Rise Risk Assessment*. Cape Town.
- Cooke, B. C. et al. (2012) ‘Nourishment practices on Australian sandy beaches: A review’, *Journal of Environmental Management*, 113, pp. 319–327. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2012.09.025.
- Crooks, S. (2004) ‘The Effect of Sea-Level Rise on Coastal Geomorphology’, *Ibis*, 146, pp. 18–20. doi: doi:10.1111/j.1474-919x.2004.00323.x.
- Davidson-Arnott, R. (2009) *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. UK: Cambridge University Press.
- Djalante, R., Jupesta, J. and Aldrian, E. (2021) *Climate Change Research, Policy and Actions in Indonesia*, Springer Climate. doi: 10.1007/978-3-030-55536-8_2.
- Foli, B. A. K. et al. (2022) ‘Evaluation of ECMWF and NCEP Reanalysis Wind Fields for Long-Term Historical Analysis and Ocean Wave Modelling in West Africa’, *Remote*

- Sensing in Earth Systems Sciences*, 5(1), pp. 26–45. doi: 10.1007/s41976-021-00052-3.
- Griggs, G., Borja, G. and Reguero (2021) ‘Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise’, *Water*, 13. doi: <https://doi.org/10.3390/w13162151>.
- Griggs, G. and Reguero, B. G. (2021) ‘Coastal adaptation to climate change and sea-level rise’, *Water (Switzerland)*, 13(16). doi: 10.3390/w13162151.
- Hudson, T., Keating, K. and Pettit, A. (2008) *Delivering benefits through evidence. Coast estimation for coastal protection - summary of evidence*. Bristol.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- Lai, Y. G. and Kim, H. S. (2020) ‘A near-shore linear wave model with the mixed finite volume and finite difference unstructured mesh method’, *Fluids*, 5(4). doi: 10.3390/fluids5040199.
- Larson, M. and Krauss, N. . (2002) *Numerical model for simulating longshore current*.
- Lubis, A. et al. (2021) ‘Studi Morfologi Dasar Laut dengan Survey Batimetri di Daerah Pantai Pasar Palik, Bengkulu Utara’, *Buletin Oseanografi Marina*, 10. doi: <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i1.32691>.
- Martyr-Koller, R. and Schleussner, C.-F. (2023) ‘Coastal loss and damage for small islands’, *Nature Sustainability*. doi: 10.1038/s41893-023-01244-z.
- Mase, H. (2005) ‘Extended energy-balance-equation wave model for multidirectional random wave transformation’, *Ocean Engineering*, 32, pp. 8–9.
- Melet, A. et al. (2018) ‘Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise’, *National Climate Change*, 8, pp. 234–239.
- Nurhidayah, L. (2021) ‘Sea-Level Rise (SLR) and Its Implication on Human Security and Human Rights in Indonesia: A Legal Analysis’, in *Climate Change Research, Policy and Actions in Indonesia*. Springer, pp. 33–52. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55536-8>.
- Pecl, G. et al. (2021) ‘Designing Coastal Adaptation Strategies to Tackle Sea Level Rise’, *POLICY AND PRACTICE REVIEWS*, p. 3. doi: 10.3389/fmars.2021.740602.
- Rashidi, A. H. M. et al. (2021) ‘Coastal structures as beach erosion control and sea level rise adaptation in malaysian: A review’, *Water (Switzerland)*, 13(13), pp. 1–34. doi: 10.3390/w13131741.
- Seymour, R. . et al. (1995) ‘Beach Nourishment and Protection’, *The National Academies Press*, pp. 107–126.
- Sharaan, M., Iskander, M. and Udo, K. (2022) ‘Coastal adaptation to Sea Level Rise: An overview of Egypt’s efforts’, *Ocean & Coastal Management*, 218, p. 106024. doi: 10.1016/J.OCECOAMAN.2021.106024.
- Siddig, N. A., Al-Subhi, A. M. and Alsaafani, M. A. (2019) ‘Tide and mean sea level trend in the west coast of the Arabian Gulf from tide gauges and multi-missions satellite altimeter’, *Oceanologia*, 61(4), pp. 401–411. doi: 10.1016/J.OCEANO.2019.05.003.
- Xie, S. (2022) ‘Continuous measurement of sea ice freeboard with tide gauges and GNSS interferometric reflectometry’, *Remote Sensing of Environment*, 280, p. 113165. doi: 10.1016/J.RSE.2022.113165.



Copyright© by the authors. Licensee Jurnal Ilmiah MITSU, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike (CC BY-NC-SA 4.0) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Halaman ini sengaja dikosongkan