

ANALISIS KAJIAN GELOMBANG, ARUS, DAN SEDIMENTASI DALAM UPAYA MERESTORASI PANTAI SISI TIMUR PULAU PRAMUKA, KEPULAUAN SERIBU, JAKARTA

Alvin Yesaya¹, Bayu Wintoro²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia

²Program Studi Magister Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Email: alvinyesaya@unud.ac.id

ABSTRAK

Pulau Pramuka merupakan pulau terbesar di Kepulauan Seribu, Jakarta yang memiliki permasalahan yaitu kurangnya luasan pantai sebagai spot wisata. Pemerintah daerah berencana membuat destinasi wisata baru di sisi timur pulau dengan melakukan restorasi pantai yaitu menambah pasir di pantai (*beach nourishment*). Letaknya yang berada di tengah laut Jawa sehingga dampak lingkungan seperti gelombang, arus, dan sedimentasi harus diperhitungkan. Penelitian ini bertujuan untuk mencari skenario yang optimal dari 3 skenario setelah dilakukan *beach nourishment* yaitu skenario-1 tanpa bangunan pantai, skenario-2 menggunakan groin di kedua sisi, dan skenario-3 menggunakan groin dan membuat celah terhadap breakwater eksisting. Metode yang digunakan adalah menggunakan simulasi model numerik untuk mengetahui kondisi gelombang, arus, dan sedimentasi serta melakukan *hindcasting* untuk mendapatkan gelombang ekstrim 50 dan 100 tahunan. Model di validasi menggunakan data observasi pasang surut yang dilakukan di lapangan selama 15 hari dengan metode *Root Mean Square Error (RMSE)* sebesar 1%. Hasil simulasi gelombang 50 dan 100 tahunan paling kecil adalah skenario-2 yaitu 0.22 m dan 0.24 m. kecepatan arus terkecil pada skenario ke-3 yaitu sebesar 0.11 m/s menuju timur laut saat pasang dan 0.04 m/s menuju arah barat daya saat arus terendah. Simulasi sedimen transpor menunjukkan skenario-1 & skenario-3 terjadi erosi sedangkan skenario-2 terjadi sedimentasi. Kesimpulan dari penelitian ini adalah skenario-2 merupakan opsi terbaik untuk melakukan restorasi pantai sehingga dapat terjaga dari ancaman gelombang, arus, dan erosi.

Kata kunci: *model numerik, beach nourishment, hindcasting gelombang, simulasi hidrodinamika dan sedimen transpor*

STUDY ANALYSIS OF WAVES, CURRENTS, AND SEDIMENTATION IN EFFORTS OF RESTORING THE EASTERN BEACH OF PRAMUKA ISLAND, KEPULAUAN SERIBU, JAKARTA

ABSTRACT

Pramuka Island is the largest island in the Kepulauan Seribu, Jakarta which has a problem of the beach area for tourism. The local government plans to create a new tourist destination on the east side of the island by carrying out beach restoration by adding sand to the coastal area (*beach nourishment*). Considering this island is located in the middle of the Java Sea so the environmental impacts such as waves, currents and sedimentation must be taken into account. This study aims to find the optimal scenario of the 3 scenarios after beach nourishment, namely scenario-1 without coastal protection, scenario-2 using groins on both sides, and scenario-3 using groins plus creating a gap to the existing breakwater. The research method is using numerical model simulation to determine the conditions of waves, currents, and sedimentation also doing *hindcasting* to get the extreme waves of 50 and 100 years return period. The model was validated from tidal observation data for 15 days with the *Root Mean Square Error (RMSE)* method of 1%. The smallest magnitude of 50 and 100 years return period of wave simulation results are scenario-2 are 0.22 m and 0.24 m respectively. The smallest current speed in scenario-3 during high tide is 0.11 m/s to the northeast and 0.04 m/s to the southwest during low tide. The transport sediment simulation shows that scenario-1 & scenario-3 occur erosion while scenario-2 has sedimentation. The conclusion of this study is that scenario-2 is the best option for carrying out coastal restoration so that it can be protected from the threat of waves, current, and erosion.

Keywords: *numerical model, beach nourishment, wave hindcasting, hydrodynamics and sediment transport simulation*

1 PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan wilayah yang cukup unik dengan karakter yang spesifik dengan perubahan perubahan biologis dan geologis yang dinamis (Rudianto, 2014) sehingga kawasan pantai sangatlah penting dan vital. Wilayah pesisir juga merupakan salah satu tempat penggerak ekonomi masyarakat, khususnya penduduk kepulauan dengan mengembangkan sarana transportasi seperti pelabuhan maupun pantai sebagai daya tarik wisatawan. Pantai yang cocok untuk dijadikan objek wisata idealnya haruslah pantai hasil dari proses sedimentasi alami seperti *sandy beach* yang berada di pantai Lovinda di Bali Utara (Eryani, 2016). Adapun beberapa pertimbangan dapat dilakukan pantai secara “buatan” atau artificial dengan melakukan pengisian pasir (*beach nourishment*) yang merupakan metode paling umum yang digunakan di di berbagai pantai terkenal di dunia (Staudt et al., 2021) seperti di Dubai, Maladewa, dan Okinawa (Uda et al., 2020). Restorasi pantai dengan *beach nourishment* untuk keperluan wisata pernah dilakukan di pulau Bali yaitu pada pantai Sanur, Nusa Dua, dan Kuta volume sekitar 1,3 juta m³ melalui proyek *Bali Beach Conservation Project* yang merupakan pinjaman ODA JICA pada tahun 2000 (Onaka et al., 2013).

Permasalahan alam di kawasan pesisir pantai yang sering dijumpai adalah adanya erosi/pengikisan dan akresi/ sedimentasi (Makfiya et al., 2020) *Artificial beach* ini umumnya memiliki permasalahan erosi karena penambahan pasir mengubah kondisi kesetimbangan yang terjadi di pantai tersebut (Suhaemi & Riandini, 2013). seperti mengubah karakteristik kedalaman laut yang mengubah besar arus dan gelombang. Sebagai contoh, terjadinya yaitu adanya abrasi yang terjadi pada pantai Kuta pada tahun 2020 (BBC, 2020) dan Pantai Selagan di Nusa Dua pada tahun 2021 (Radarbali, 2022), dan juga Pantai Sanur pada tahun 2013 (Suhaemi & Riandini, 2013.). Ketiga pantai terdampak tersebut merupakan hasil pantai “buatan” hasil proyek *Bali Beach Conservation Project*. Permasalahan ini cukup berat mengingat lokasi tersebut saat ini telah menjadi objek wisata yang terkenal sehingga diperlukan penanganan lebih lanjut

Untuk menghindari kejadian serupa, maka diperlukan kajian yang komprehensif saat melakukan Perencanaan untuk merestorasi pantai dengan *beach nourishment*. Pembuatan konstruksi pengamanan pantai merupakan salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan abrasi yang nantinya mungkin terjadi setelah dilakukan restorasi pantai. Secara eksisting, Pulau Pramuka telah dikelilingi bangunan pengaman pantai untuk menahan pulau dari hantaman gelombang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Titik A menunjukkan rencana restorasi pantai untuk dijadikan lokasi wisata oleh pemerintah setempat.



Gambar 1 Bangunan pengaman pantai eksisting di Pulau Pramuka.

Penelitian ini berfokus untuk mencari skenario yang optimal dalam mengkaji kondisi lingkungan dalam ruang lingkup gelombang, arus, dan sedimentasi. Penelitian ini juga lebih berfokus untuk melihat hasil prediksi simulasi yang dilakukan selama satu bulan. Beberapa skenario yang dipaki yaitu dengan menambahkan struktur bangunan pantai seperti groin dan merekayasa bangunan pantai eksisting untuk mencari hasil yang optimal dalam Perencanaan restorasi pantai di Pulau Pramuka.

2 KAJIAN GELOMBANG, ARUS, DAN SEDIMEN

2.1 Kajian Gelombang Ekstrim

Metode yang paling umum digunakan untuk mencari karakteristik dan tinggi gelombang di suatu lokasi adalah dengan melakukan *Hindcasting* gelombang (Santoso et al., 2018). *Hindcasting* gelombang adalah teknik untuk meramal tinggi gelombang laut dengan menggunakan data angin jam-jaman kemudian data angin yang didapat dikonversi menjadi tinggi dan periode gelombang di laut. Umumnya gelombang yang terjadi di laut diakibatkan oleh gesekan angin dan permukaan air laut yang membentuk gelombang (Triatmodjo, 1999). Salah satu faktor yang memengaruhi besarnya gelombang adalah luas pembangkitan gelombang/*fetch*. Area *fetch* harus dihitung dari segala arah yang besarnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus persamaan (1) sebagai berikut:

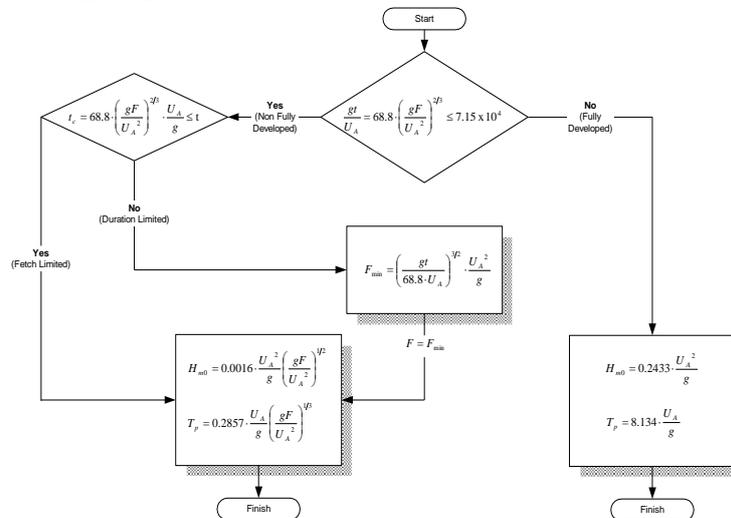
$$F_{eff} = \frac{\sum F_i \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

F_{eff} = panjang garis fetch (m)

α_i = Sudut dari garis fetch sesuai dengan mata angin

Penghitungan gelombang yang dibangkitkan angin dilakukan dengan cara hindcasting berdasarkan formulasi yang tersusun di dalam buku *Shore Protection Manual (SPM), Department of The Army, Coastal Engineering Research Center, 1984*. Pada formulasi yang dipakai berikut, gelombang estimasi didapat dalam kondisi limit fetch (*fetch-limited*) atau limit durasi (*duration-limited*). Diagram alir peramalan gelombang ditunjukkan pada diagram alir seperti pada Gambar 2



Gambar 2 Diagram Alir gelombang Hindcasting berdasarkan SPM 1984

Setelah melakukan hindcasting selama 10 tahun dalam waktu jam-jaman, gelombang periode ulang untuk 50 dan 100 tahunan dihitung menggunakan metode statistik seperti distribusi normal, distribusi Gumbel, Pearson dan Log Pearson III (Binilang, 2014). Sebaran teoritis yang digunakan dalam analisis frekuensi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Log-Pearson tipe III. Persamaan distribusi dalam analisis frekuensi untuk Log Pearson III dapat dirumuskan dengan persamaan (2) sebagai berikut:

$$\text{Log}(X_t) = \overline{\text{Log}(X)} + K S_{dev} \dots\dots\dots (2)$$

dimana

X_t = Tinggi gelombang rencana dengan periode ulang t

\overline{X} = Tinggi gelombang rata-rata

S_{dev} = Simpangan baku

K = Faktor frekuensi tergantung metode yang digunakan (tersedia pada table distribusi log pearson)

2.1 Kajian Arus dan Sedimen

Pola arus laut dan sedimentasi adalah proses dinamika di suatu perairan setempat yang memiliki karakteristik beragam sehingga memengaruhi geomorfologi pantai setempat (Soerjowo & Maryanto, 2018). Arus laut adalah perpindahan massa air dari satu lokasi ke lokasi lain secara vertikal (arah y) maupun horizontal (arah x). Arah arus juga dipengaruhi oleh gaya coriolis, yaitu tenaga rotasi bumi tergantung dari longitude dan latitude suatu daerah. Apabila berada di bumi bagian utara, arah arus dibelokkan ke kanan sedangkan pada belahan bumi selatan akan dibelokkan ke kiri di sehingga gaya yang dibuat searah jarum jam pada belahan bumi utara dan berlawanan dengan arah jarum jam di belahan bumi selatan.

Persamaan model arus perairan dangkal (DHI, 2013) terdiri dari:

a. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

b. Persamaan kekekalan momentum, dengan pengaruh angin dan pasang surut

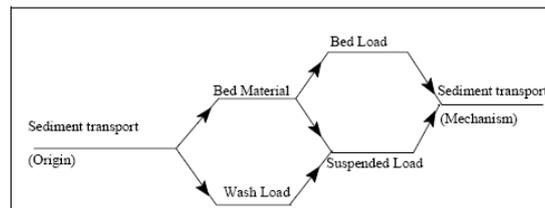
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial xy} (p_a) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

Dengan:

$h(x, y, t)$	= Kedalaman air ($=\zeta - d$, m)
$d(x, y, t)$	= Kedalaman air dalam berbagai waktu (m)
$\zeta(x, y, t)$	= Elevasi permukaan (m)
$p, q(x, y, t)$	= <i>Flux density</i> dalam arah x dan y ($m^3/s/m$)
$C(x, y)$	= Tahanan Chezy ($m^{1/2}/s$)
g	= Kecepatan gravitasi (m/s^2)
$f(V)$	= Faktor gesekan angin
$V, V_x, V_y(x, y, t)$	= Kecepatan angin dalam arah x dan y (m/s)
$\Omega(x, y)$	= Parameter Coriolis (s^{-1})
$p_a(x, y, t)$	= Tekanan atmosfer ($kg/m/s^2$)
ρ_w	= Berat jenis air (kg/m^3)
x, y	= Koordinat ruang (m)
t	= Waktu (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	= Komponen <i>effective shear stress</i>

Sedimen dapat berasal dari erosi garis pantai dan daratan yang dibawa oleh sungai, dan dari laut dalam yang terbawa arus ke daerah pantai. Transportasi sedimen adalah gerak partikel yang dibangkitkan oleh gaya yang bekerja. Transport sediment merupakan hubungan aliran air dan partikel-partikel sedimen. Sifat-sifat sedimen yang sangat penting dalam proses transportasi sedimen adalah ukuran partikel dan distribusi butir sedimen, rapat massa, bentuk, kecepatan endapan, dan ketahanan terhadap erosi. Mekanisme transportasi sedimen yang diberikan oleh Engelund-Hansen (Engelund, 1967) dengan perhitungan terbagi antara *bed load* dengan *suspended load* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Sedimen transport pada penelitian ini dilakukan perhitungan kombinasi arus dan gelombang untuk mendapatkan hasil prediksi terbaik dan sesuai dengan kondisi di lapangan.



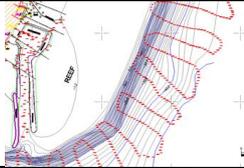
Gambar 3 Mekanisme perhitungan sedimen transpor

3 METODE

3.1 Pengambilan Data

Metode pengambilan data yang dilakukan pada penelitian kali ini adalah mengombinasikan data primer (lapangan) dengan data sekunder (referensi/literatur). Data primer yang digunakan adalah observasi pasang surut yang akan digunakan untuk memvalidasi model numerik. Selain itu data batimetri dan sedimen juga dilakukan survey lapangan. Untuk data angin diambil secara sekunder yaitu menggunakan BMKG terdekat di wilayah tinjauan (Bandara Soekarno-Hatta) karena keterbatasan data yang dimiliki di Pulau Pramuka. Detail lengkap data yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1. Kelengkapan data pada Tabel 1 sudah cukup untuk melakukan simulasi prediksi model gelombang, arus, dan sedimen.

Tabel 1. Detail Sumber Kelengkapan Data Penelitian

Data yang dibutuhkan	Sumber Data	Dokumentasi
Batimetri	Data Primer, Survei Lapangan	
Pasang Surut	Data Primer, Survei Lapangan selama 15 hari	
Sedimen	Data Primer, Pengambilan sampel di Lapangan	
Angin	Sekunder, data angin diambil dari website BMKG (http://aviation.bmkg.go.id/web/station.php?c=ID&pn=1) selama 10 tahun jam-jaman	

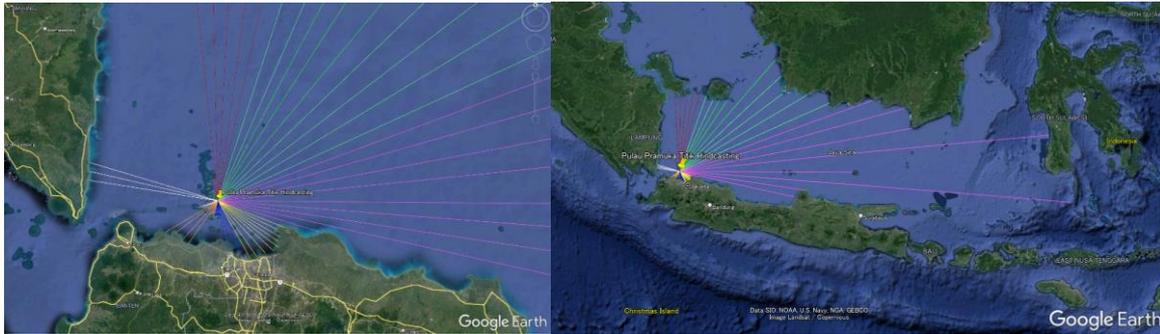
3.1 *Prediksi Gelombang, Arus, dan Sedimentasi Model Numerik*

Untuk melakukan menghitung gelombang, arus, dan rate sedimen yang berada di suatu wilayah tinjauan spasial sangatlah sulit untuk dilakukan perhitungan manual. Oleh karena itu, untuk melakukan prediksi diperlukan perhitungan secara numeris untuk membantu. Dalam penelitian ini akan digunakan perangkat lunak Mike21. Modul *Mike 21* yang digunakan pada penelitian adalah modul SW (*Spectral Wave*) untuk perhitungan gelombang dan modul *couple* HD-ST (Hidrodinamika dan Sediment Transport) untuk mensimulasikan arus dan sedimen. Mike 21 merupakan salah satu aplikasi berbasis numerik yang umum digunakan dalam pemodelan arus, gelombang, transport sediment baik area pantai laut lepas maupun daerah sungai (DHI, 2013; Sri Suharyo & Adrianto, 2018). Penggunaan *couple* model untuk gabungan sedimentasi akibat pasang surut dan gelombang merupakan metode yang tepat di wilayah Pulau Pramuka karena sedimen transpor tidak hanya dipengaruhi oleh pasang surut, tetapi juga dipengaruhi oleh gelombang. Perangkat lunak *Mike21* dapat melakukan perhitungan hidrodinamika secara persamaan matematis untuk menghitung pergerakan, perubahan, dan perilaku air sehingga kondisi pergerakan air dapat dihitung dan diprediksi. Hal ini bertujuan untuk mempermudah perhitungan dalam model numerik. Pada penelitian ini, persamaan hidrodinamika yang ditinjau adalah dua dimensi karena kedalaman yang cukup dangkal di daerah pesisir sehingga asumsi untuk besarnya arus dan sedimen tidak berbeda pada setiap kedalaman. Hal ini juga mempercepat simulasi model sehingga tidak menghabiskan waktu yang cukup lama dalam melakukan perhitungan simulasi pada penelitian ini

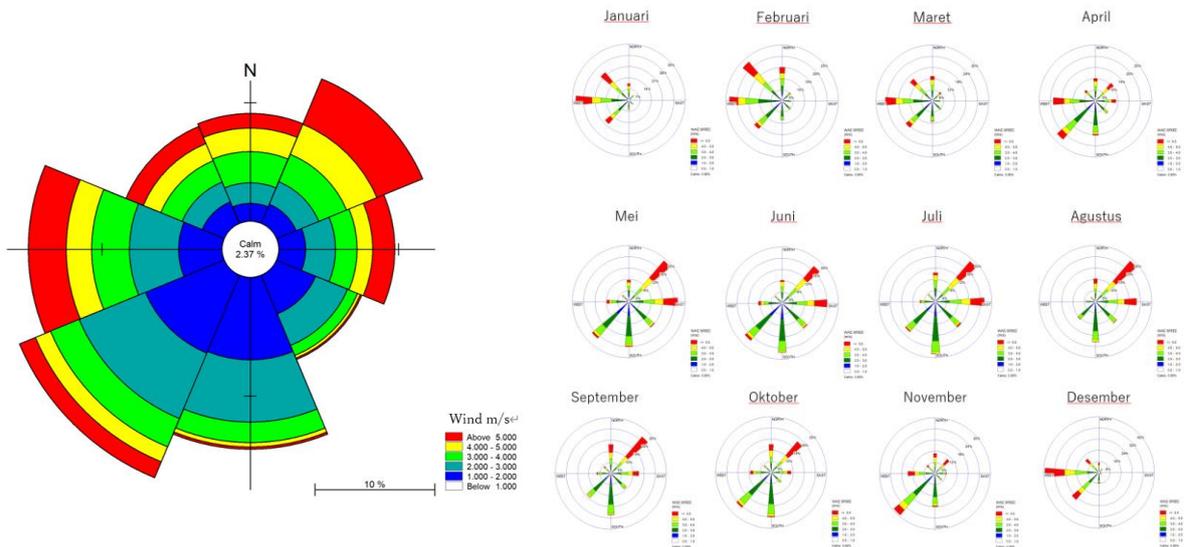
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 *Hasil Analisis Gelombang Ekstrim*

Data angin yang di ekstrak dari website BMKG disajikan dalam bentuk mawar angin (*windrose*) yang dibagi menjadi 8 arah mata angin selama 10 tahun sepanjang Juli 2012 – Juni 2022. Gambar 4 menunjukkan wilayah pembentukan *fetch* dengan menggunakan *google earth* dan tabel 1 menunjukkan rekapitulasi hasil nilai nilai *Fetch*. Gambar 5 menunjukkan mawar angin (*windrose*) sepanjang bulan dan mawar angin setiap bulannya selama 10 tahun. Terlihat intensitas angin dominan berasal dari arah barat daya dengan besar variasi 3-5 m/s. Untuk angin tiap bulannya, terlihat bahwa pada bulan November – April (musim hujan) angin dominan berasal dari barat dan barat daya sedangkan pada bulan Mei-October (musim kering) angin dominan berasal dari timur laut. Setelah mendapatkan angin jam-jaman selama 10 tahun, *fetch* Pulau Pramuka dihitung untuk 8 mata angin berbeda.



Gambar 4 Fetch hindcasting Pulau Pramuka, Jakarta dari 8 penjurus mata angin.



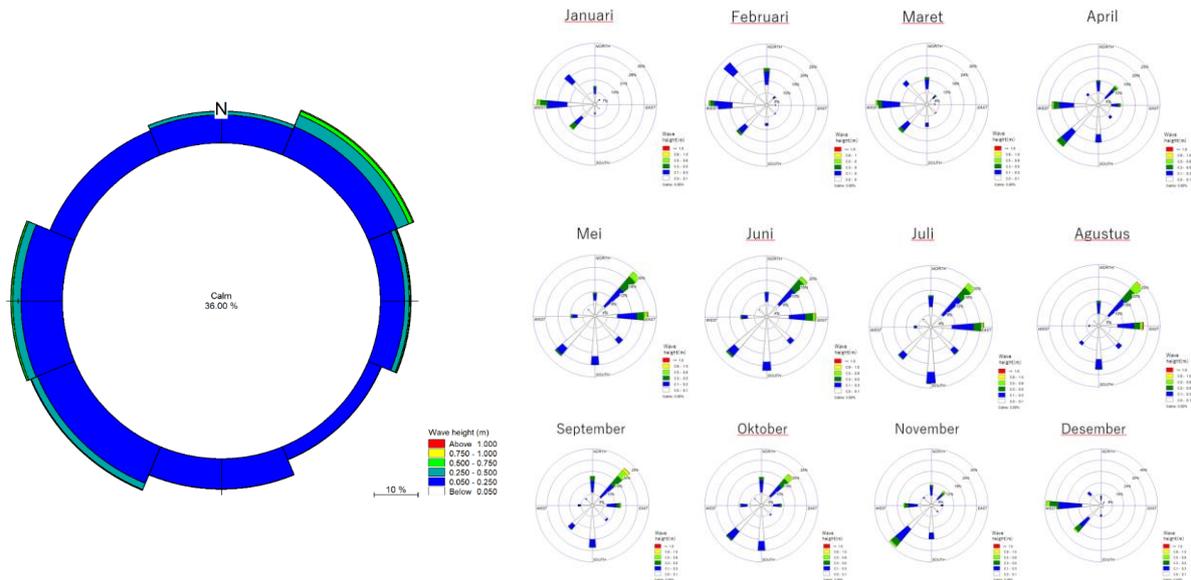
Gambar 5 Windrose sepanjang tahun (kiri) dan detail windrose setiap bulan selama 10 tahun (kanan)

Tabel 2 menunjukkan hasil rekapitulasi hasil nilai *fetch* efektif yang telah dikalkulasi menggunakan persamaan (1) untuk delapan arah mata angin. Terlihat pada tabel bahwa *fetch* pembentukan gelombang pada sisi pantai timur Pulau Pramuka memiliki nilai tiga terbesar yaitu dari arah timur, timur laut, dan utara.

Tabel 2. Hasil Rekapitulasi Nilai *Fetch* Delapan Mata Angin

Arah <i>Fetch</i> Efektif	Besar <i>Fetch</i> (m)	Arah <i>Fetch</i> Efektif	Besar <i>Fetch</i> (m)
N (Utara)	173.384	S (Selatan)	21.154
NE (Timur Laut)	447.659	SW (Barat Daya)	22.981
E (Timur)	805.165	W (Barat)	34.416
SE (Tenggara)	48.298	NW (Barat Laut)	1.560

Setelah didapatkan nilai *fetch* masing-masing arah, data angin kemudian diolah dengan alur diagram alir *hindcasting* gelombang pada Gambar 2 sehingga didapatkan besaran gelombang jam-jaman. Hasil *hindcasting* disajikan dalam bentuk mawar gelombang (*waverose*) selama 10 tahun dan diolah 10 tahun pada setiap bulannya seperti terlihat pada Gambar 6. Terlihat bahwa gelombang di dominan terjadi dari arah Timur Laut dengan besar sekitar 0,5-1 meter. Pada November – April gelombang datang dari arah barat daya dengan besar 0,6-0,8meter sedangkan pada bulan Mei – Oktober gelombang dominan berasal dari timur laut dengan besar lebih dari 1 meter. Tabel 3 menunjukkan hasil rekapitulasi nilai maksimum Tinggi gelombang (H_s) dan periode (T_s) signifikan setiap tahunnya. Terlihat gelombang tertinggi terjadi pada tahun 2017 dengan besar gelombang 2,15 meter.



Gambar 6 Waverose selama 10 tahun hasil hindcasting sepanjang tahun (kiri) dan setiap bulannya (kanan)

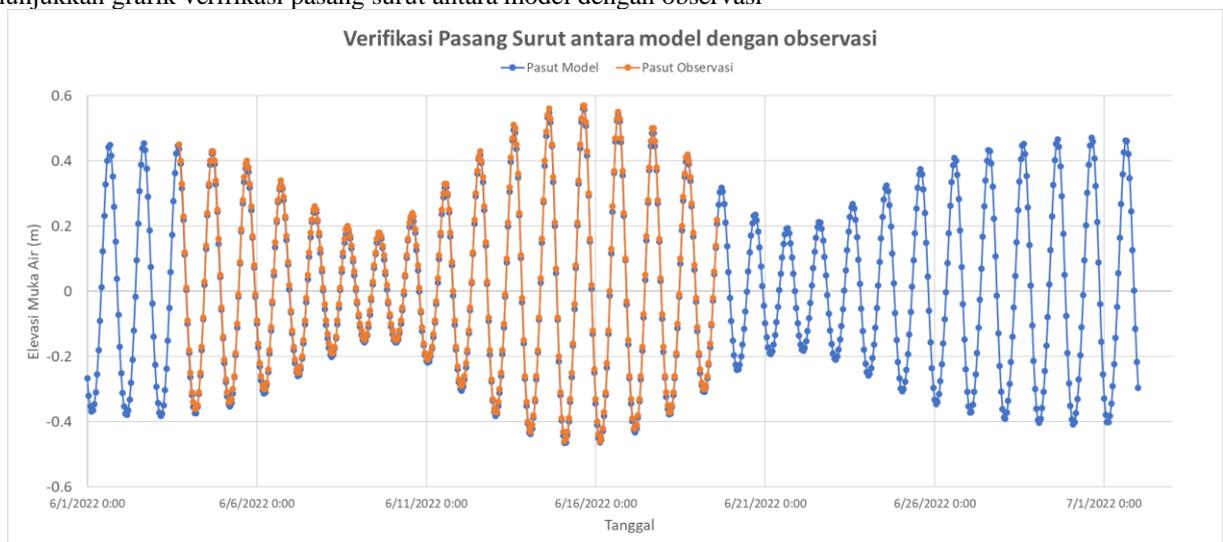
Tabel 3. Rekapitulasi Hs dan Ts maksimum hasil Hindcasting setiap tahun

Tahun	Hs (m)	Ts (s)	Tahun	Hs (m)	Ts (s)
2012	1,02	4,68	2017	2,15	7,72
2013	1,25	5,19	2018	1,12	5,00
2014	1,17	5,49	2019	1,25	5,33
2015	1,72	6,54	2020	1,25	5,49
2016	1,02	4,80	2021	1,59	6,20

Dari tabel tinggi maksimum setiap tahun, maka dilakukan analisis harga ekstrim Log Paerson III. Didapatkan tinggi gelombang dengan periode ulang 50 tahunan memiliki ketinggian gelombang sebesar 2,42 m dengan perioda gelombang sebesar 8,27 s dan untuk periode ulang 100 tahunan didapatkan tinggi gelombang sebesar 2,72 m dengan perioda gelombang sebesar 8,9 s

4.2 Hasil Verifikasi Model dengan Observasi

Model numerik yang telah dibuat perlu dilakukan verifikasi dengan kondisi aktual di lapangan agar simulasi model yang dibuat benar-benar merepresentasikan sistem kondisi hidrodinamika di lokasi penelitian. Gambar 7 menunjukkan grafik verifikasi pasang surut antara model dengan observasi



Gambar 7 Verifikasi model Elevasi Muka Air dengan pasang surut observasi lapangan

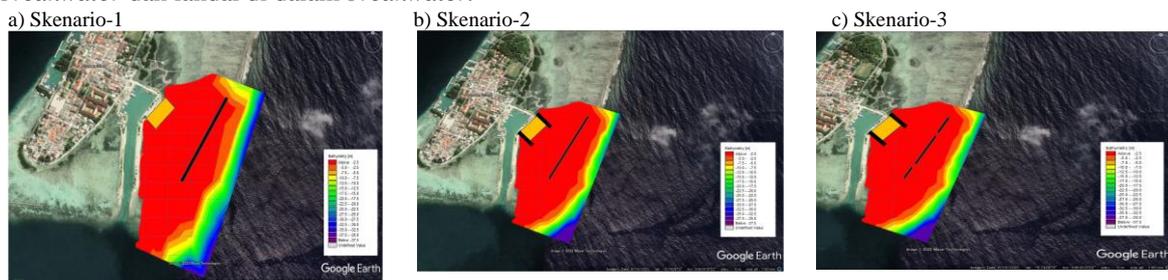
Dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) pada persamaan (6), nilai elevasi muka air dibandingkan dengan observasi selama 15 hari dengan jam-jaman sehingga jumlah N yang dibandingkan adalah sebanyak 360 data.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Prediksi} - \text{Aktual})^2}{N}} \dots\dots\dots (6)$$

maka didapatkan nilai *error* atau galat kesalahan sebesar 1%. Dengan margin *error* yang sangat kecil < 10%, maka dapat dipastikan bahwa simulasi model yang dibuat dalam penelitian ini telah merepresentasikan kondisi asli di lapangan.

4.3 Hasil Simulasi Gelombang, Arus, dan Sedimen

Penelitian ini melakukan simulasi gelombang, arus, dan sedimen dengan ketiga skenario untuk mendapatkan hasil yang paling optimal dalam melakukan restorasi pantai timur Pulau Pramuka. Gambar 8 menunjukkan ketiga skenario dengan warna kotak kuning merupakan rencana *beach nourishment* dan warna hitam merupakan *breakwater* eksisting. Ketiga skenario tersebut adalah skenario-1 tanpa bangunan pantai, skenario-2 menggunakan groin, dan skenario-3 dengan melubangi *breakwater* eksisting. Secara umum batimetri di daerah timur dekat *breakwater* memiliki kedalaman dibawah -2.5 meter sedangkan dibagian luar *breakwater* memiliki batimetri cukup dalam sekitar 10-15 meter. Profil kemiringan di wilayah ini cukup curam di luar *breakwater* dan landai di dalam *breakwater*.

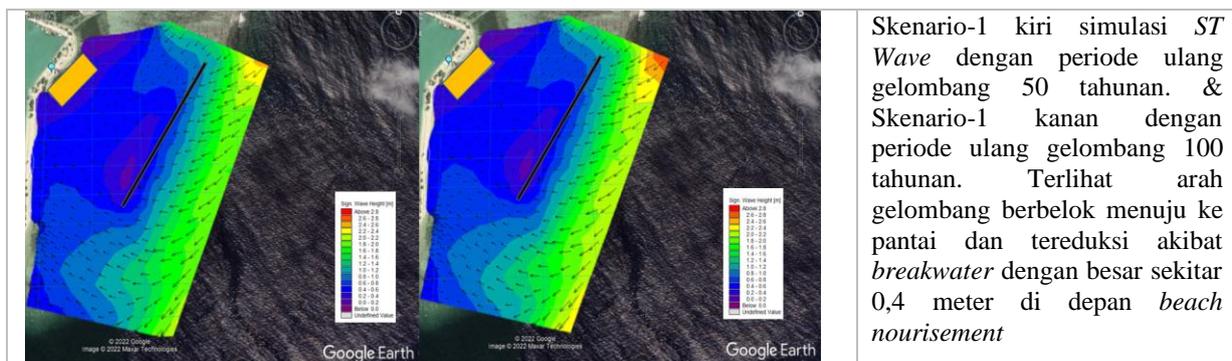


Gambar 8 Batimetri dengan ketiga skenario yaitu skenario-1 *beach nourishment* tanpa pengaman pantai, skenario-2 *beach nourishment* dengan pengaman pantai groin, dan skenario-3 dengan groin dan melubangi *breakwater* eksisting

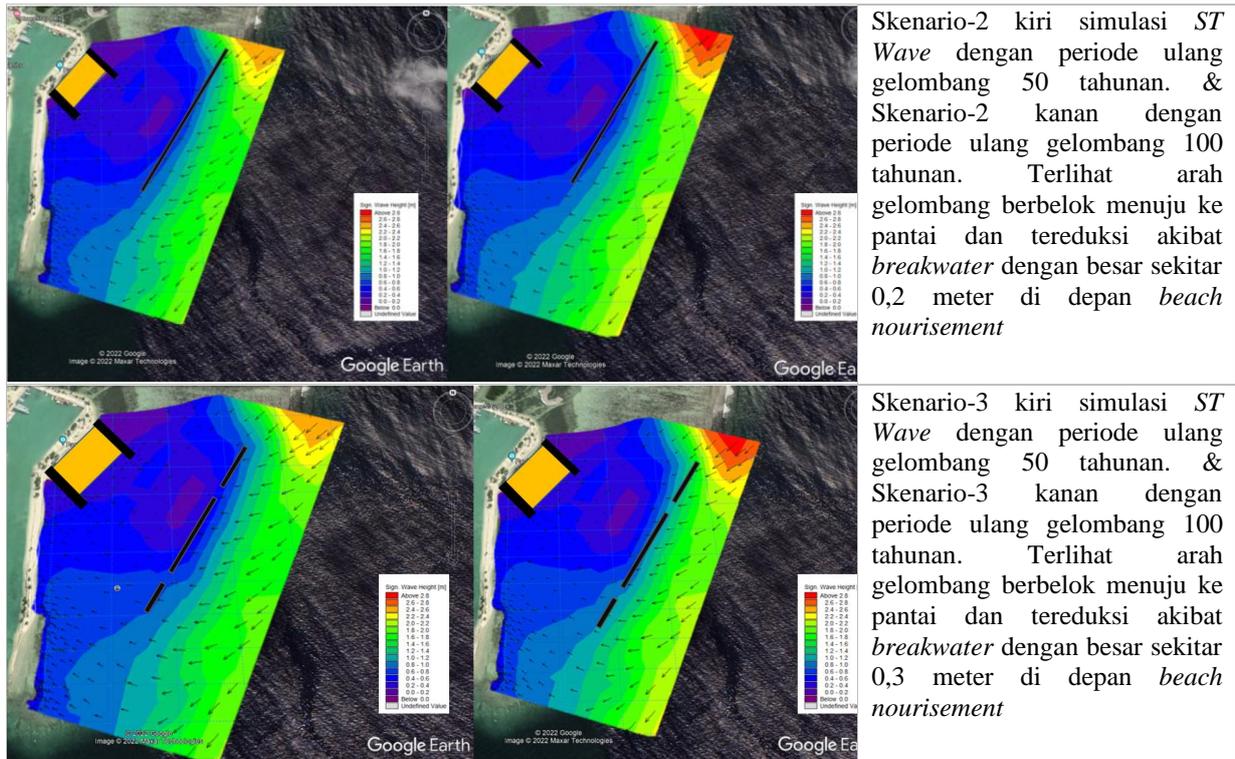
Simulasi dilakukan dengan ketiga skenario untuk gelombang dengan modul *Spectral Wave (ST Wave)* dan hidrodinamika secara *couple* dengan modul *Hydrodynamic and Sand Transport (HD-ST)* selama 1 bulan. Model gelombang ekstrem diperlukan dalam karena asumsi hindcasting gelombang berada di laut lepas, sedangkan data yang kita ingin ketahui adalah gelombang yang telah ditransformasi akibat adanya *refraksi* dan *shoaling*.

Tabel 4 menunjukkan hasil model gelombang yang terjadi di daerah tinjauan lokasi dengan menggunakan *boundary condition* gelombang laut lepas untuk gelombang extreme 50 tahunan dan 100 tahunan untuk keempat skenario. Arah gelombang datang dari timur laut sebagai gelombang dengan intensitas terbanyak yang dinyatakan dari *waveroses*. Tabel 5 menunjukkan hasil simulasi gelombang *Hydrodynamic (HD)* yang di *capture* saat pasang tertinggi (kiri) dan surut terendah (kanan). Tabel 6 menunjukkan hasil simulasi *Sand Transport (ST)* yang disimulasikan selama 1 bulan.

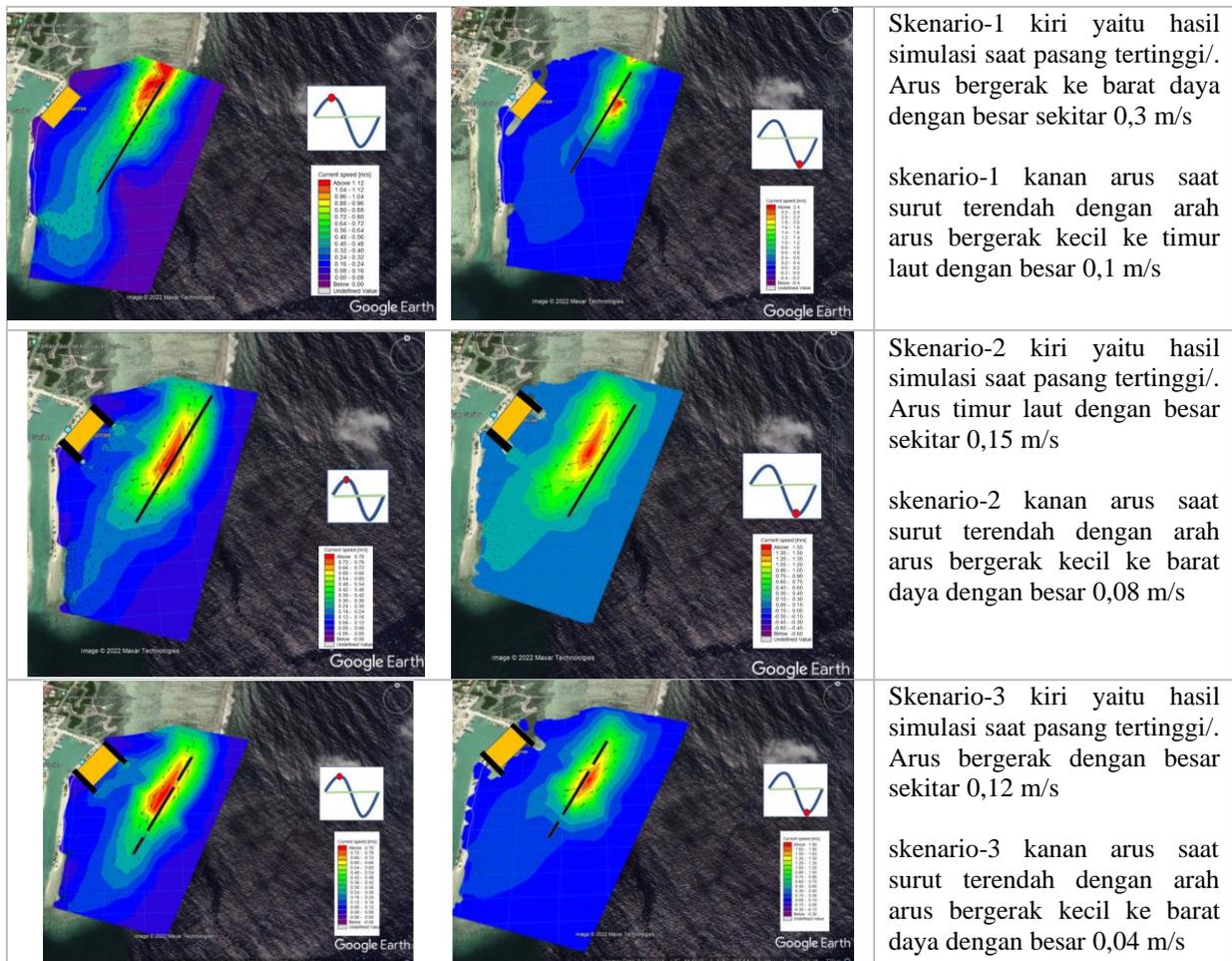
Tabel 4. Hasil simulasi gelombang *ST Wave* untuk periode ulang 50 tahunan dan 100 tahunan



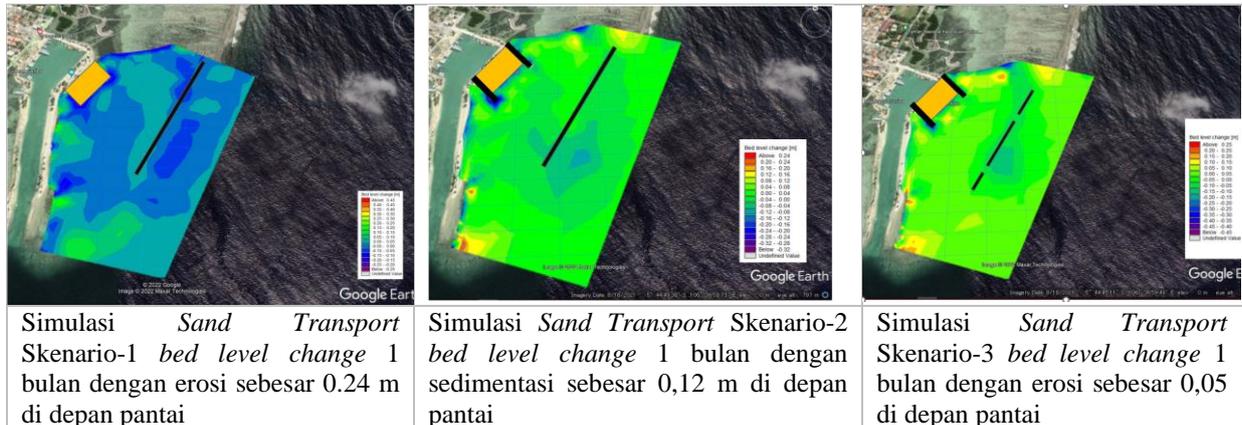
Skenario-1 kiri simulasi *ST Wave* dengan periode ulang gelombang 50 tahunan. & Skenario-1 kanan dengan periode ulang gelombang 100 tahunan. Terlihat arah gelombang berbelok menuju ke pantai dan tereduksi akibat *breakwater* dengan besar sekitar 0,4 meter di depan *beach nourishment*



Tabel 5. Hasil simulasi modul *Hydrodynamic* (HD) saat pasang tertinggi (kiri) dan surut terendah (kanan)



Tabel 6. Hasil simulasi modul *Sand Transport* selama 1 bulan



Tabel 7 menunjukkan hasil rekapitulasi hasil simulasi model numerik gelombang, arus dan sedimen di sisi timur pantai Pulau Pramuka. Terlihat pada hasil simulasi, skenario-1 tanpa menggunakan pengaman pantai, gelombang dan arus yang terjadi cukup besar dibandingkan dengan skenario lainnya. Simulasi sedimen juga menunjukkan terjadinya erosi tanpa bangunan pengaman pantai. Hal ini menunjukkan skenario-1 mendapatkan hasil yang kurang memuaskan untuk jangka panjang. Hal ini berbeda dengan skenario-2 dengan menambah groin di samping *beach nourishment* yang menunjukkan hasil simulasi terkecil untuk gelombang dan terjadinya penumpukan sedimen pada simulasi *sand transport*. Skenario-3 mendapatkan hasil terkecil untuk arus, dan nilai tinggi gelombang diantara skenario-1 dan skenario-2. Akan tetapi sedimen yang terjadi yaitu erosi. Oleh karena itu Skenario-2 dengan menggunakan groin di sisi *beach nourishment* merupakan opsi terbaik untuk restorasi pantai di sisi timur Pulau Pramuka

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Simulasi Model Numerik Gelombang, Arus, dan Sedimen

Analisis Skenario	Gelombang	Arus	Sedimen
Skenario-1	0,32 m (50 tahunan) 0,40 m (100 tahunan)	0,3 m/s barat daya saat pasang 0,1 m/s timur laut saat surut	-0,20 m/bulan (erosi)
Skenario-2	0,22 m (50 tahunan) 0,24 m (100 tahunan)	0,15 m/s timur laut saat pasang 0,08 m/s barat daya saat surut	0,12 m/bulan (sedimentasi)
Skenario-3	0,26 m (50 tahunan) 0,30 m (100 tahunan)	0,12 m/s timur laut saat pasang 0,04 m/s barat daya saat surut	-0,05 m/bulan (erosi)

5 KESIMPULAN

Hasil penelitian analisis kajian gelombang, arus, dan transpor sedimen dengan metode simulasi model numerik, didapatkan skenario-2 merupakan skenario terbaik untuk mendapatkan hasil optimal untuk dilakukan restorasi pantai di sisi timur Pulau Pramuka. Penambahan groin di sisi *beach nourishment* dapat menahan erosi yang terjadi akibat oleh interaksi gelombang dan arus. *Breakwater* eksisting harus dijaga karena memiliki kontribusi yang cukup signifikan dalam menahan energi gelombang yang terjadi di sisi timur pulau. Saran untuk penelitian kedepannya adalah melakukan kajian terhadap eksisting bangunan pengaman pantai seperti melakukan studi kerusakan yang terjadi. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat juga memperbesar waktu simulasi menjadi setahun untuk kajian arus dan sedimentasi untuk melihat kecenderungan sedimentasi yang terjadi sepanjang tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Binilang, I. A. 2014. *Analisis Karakteristik Gelombang Di Pantai Kecamatan Belang Kabupaten Minahasa Tenggara. TEKNO SIPIL* Volume 12 No.60 April 2014.
- CERC. 1984. *Shore Protection Manual. Vol. 1, CERC Dept. of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington.*
- DHI. 2013. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Sand Transport Module Scientific Documentation* hal 14
- Eryani, I.G. 2016. *Karakteristik Dan Metode Penataan Pantai Lovina. PADURAKSA, Universitas Warmadewa* Volume 5 Nomor 1, hal.10 – 19.
- Makfiya, N., Siladharma, I., Gede, W., & Karang, 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.

- Onaka, S., Endo, S., dan Uda, T. 2013. Bali Beach Conservation Project and Issues Related to Beach Maintenance After Completion of Project. *Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2013)* Bali, Indonesia, hal. 198-203.
- Rudianto, R. 2014. Analisis Restorasi Ekosistem Wilayah Pesisir Terpadu Berbasis Co-Management: Studi Kasus Di Kecamatan Ujung Pangkah Dan Kecamatan Bungah, Kabupaten Gresik. *Research Journal of Life Science*, 1(1), 54-67.
- Santoso, K., Putra, I. D. N. N., & Dharma, I. G. B. S. (2018). Studi Hindcasting Dalam Menentukan Karakteristik Gelombang dan Klasifikasi Zona Surf Di Pantai Uluwatu, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(1), 119.
- Soerjowo, P. A., & Maryanto, T. I. (2018). Kajian Pola Arus Laut dan Distribusi Sedimen Di Perairan Pantai Muara Kamal Jakarta Utara. *Jurnal Rekayasa Hijau*, Volume 1 No 1.
- Sri Suharyo, O., & Adrianto, D. 2018. Studi Hasil Running Model Arus Permukaan Dengan Software Numerik Mike 21/3 (Guna Penentuan Lokasi Penempatan Stasiun Energi Arus Selat Lombok-Nusapenida). *Applied Technology and Computing Science Journal*, Vol 1No 1, hal 30–38.
- Staudt, F., Gijnsman, R., Ganal, C. et al. 2021. The sustainability of beach nourishments: a review of nourishment and environmental monitoring practice. *Journal of Coastal Conservation* Vol 25 article 34
- Suhaemi., Riandini, F. 2013. Dinamika Garis Pantai Sanur Bali Akibat Adanya Struktur Sejajar Pantai. *Jurnal Teknik Hidraulik* Vol. 4 No.1, hal. 79-90.
- Tim penyusun BBC Indonesia. 2020. Bali hadapi abrasi Pantai Kuta yang 'parah' dan 'sangat fatal', mencapai puluhan meter. <https://www.bbc.com/indonesia/majalah-54473957> .Diakses pada tanggal 20 Desember 2022
- Tim penyusun radarbali. 2022. Dihantam Omba <https://radarbali.jawapos.com/bali/17/01/2022/dihantam-ombak-pantai-selagan-nusa-dua-berantakan/k>, Pantai Selagan Nusa Dua berantakan.. Diakses pada tanggal 21 Desember 2022
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*. Beta Offset, Yogyakarta.
- Uda, T., Date, A., Onaka, S., Ichikawa, S. 2020. Lessons Learned from the Construction of Artificial Beaches in Okinawa. *International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC) 2019*. Springer, Singapore.