

# KARAKTER ARUS PASUT DI PERAIRAN PULAU PUTRI, NONGSA, BATAM BERDASARKAN PEMODELAN HIDRODINAMIKA 2D

## *THE CHARACTER OF TIDAL CURRENTS IN PUTRI ISLAND WATERS, NONGSA, BATAM BASED ON 2D HYDRODYNAMIC MODELLING*

Putri Wibawanti<sup>1\*</sup>, Aniq Taofiqurohman<sup>1</sup>, Nineu Yau Gerhaneu<sup>2</sup>, Subiyanto<sup>1</sup>, Ibnu Faizal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran

<sup>2</sup>Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Djunjunan No. 236 Bandung

\*putri17023@mail.unpad.ac.id

Diterima : 14-07-2022, Disetujui : 05-12-2022

### ABSTRAK

Pulau Putri merupakan pulau kecil terdepan bagian dari Nongsa, Batam yang sempat terancam hilang akibat perubahan garis pantai besar-besaran. Arus dan pasang surut ini merupakan parameter oseanografi yang penting diketahui dalam menganalisis karakteristik perairan. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan arus pasang surut di perairan Pulau Putri. Pada penelitian ini digunakan pendekatan numeris 2D dengan menggunakan model Delft3D-FLOW. Simulasi dimulai pada Maret-Mei 2020 Validasi model dengan data elevasi muka air laut menghasilkan nilai yang baik, yaitu dengan RMSE 0,135 dan bias 0,018. Adapun validasi komponen pasang surut menunjukkan selisih yang kecil yaitu 0 - 8 cm untuk amplitudo dan 0° - 9° untuk fase. Berdasarkan simulasi, pasang surut di Pulau Putri termasuk tipe condong semidiurnal dan termasuk perairan *microtidal* dan sedikit *mesotidal* dengan tunggang pasut kurang dari 2 - 2,5 m. Hasil model arus pasut menghasilkan nilai rata-rata residu 0,1 m/s dan rata-rata arus pasang surut yang dapat mencapai 0,5 m/s. Pola pergerakan arus pasut yang dihasilkan adalah *bidirectional*, yaitu dari barat menuju timur dan tenggara.

**Kata kunci:** Pulau Putri, Model 2D, dan Delft3D-FLOW

### ABSTRACT

*Putri Island is a small-frontier island part of Nongsa, Batam was in danger of being lost due to massive coastal evolution. Currents and tides are included in oceanographic parameters that are important to study in analyzing waters characteristics. This study aims to make ocean tidal current around Putri Island waters. This study was using a 2D numerical approach in Delft3D-FLOW model. The simulation time started from March - May 2020. Validation of model using elevation data produces an acceptable value, the RMSE and bias 0.135 and 0.018 respectively. Comparably with the tidal components shows small difference, 0 - 8 cm and 0° - 9° amplitude and phase respectively. Based on the simulation, the tidal in Putri Island shows the mixed predominantly semi-diurnal type and microtidal and a bit mesotidal category with tidal range less than 2.5 m. The model result of tidal currents show an average of each velocity 0.5 m/s (the tidal currents) and 0.1 m/s (the residuals). The pattern of tidal current shows two-way movement (bidirectional), from the westward to the eastward and souteastward.*

**Keyword:** Putri Island, 2D Hydrodynamic Model, and Delft3D-FLOW

## PENDAHULUAN

Pulau Putri merupakan salah satu dari 19 pulau kecil terdepan di daerah perbatasan negara yang berlokasi di Provinsi Kepulauan Riau (Pasal 60 Peraturan Daerah Provinsi Kepulauan Riau Nomor 1 Tahun 2017). Pulau ini sempat terancam hilang akibat perubahan garis pantai yang cukup signifikan. Berdasarkan penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016), luas Pulau Putri menyusut di tahun 2016 menjadi 24.266 m<sup>2</sup> yang sebelumnya memiliki luas 131.374 m<sup>2</sup> di tahun 2000. Namun, di tahun 2019 melalui proyek Gurindam 12, Pulau Putri telah direklamasi dan dibangun *revetment* baru di sekeliling pulau.

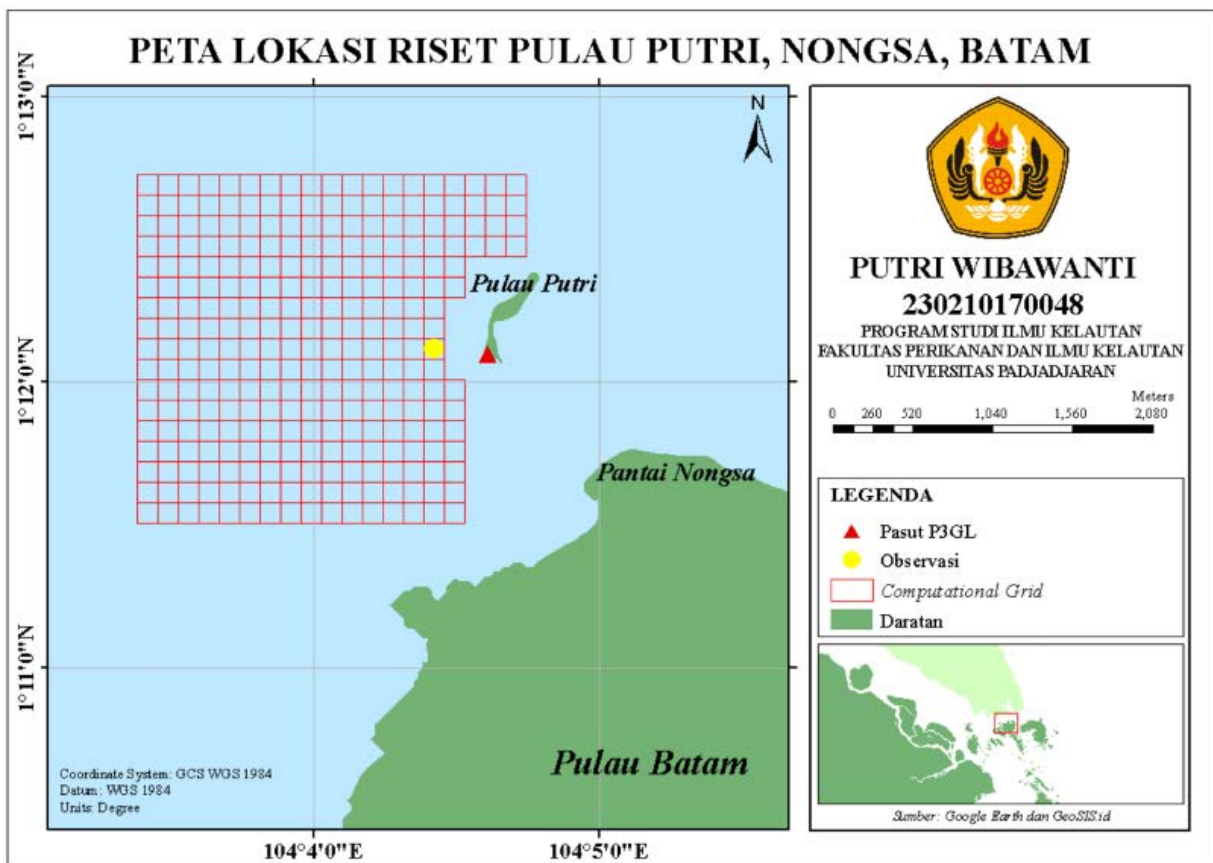
Berdasarkan penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016), pasang surut atau pasut yang berada di perairan Pulau Putri termasuk ke dalam campuran dominan semidiurnal. Sedangkan untuk arus cenderung dipengaruhi oleh kondisi pasang surut. Sehingga pada penelitian ini hanya berfokus pada arus yang dibangkitkan pasang surut saja (barotropik). Asumsi arus barotropik ini adalah kondisi dimana densitas bersifat konstan dan perbedaan temperatur diabaikan, sehingga arus dibangkitkan oleh pasang surut (Mustikasari, dkk., 2015). Di daerah pesisir, skala arus barotropik ini dianggap lebih besar energinya dibandingkan laut terbuka sehingga pasut memiliki peran yang penting pada daerah pesisir (Solano, dkk., 2020). Pada penelitian yang lebih lanjut, arus pasut juga dapat dihubungkan dengan potensi energi arus yang mampu menggantikan penggunaan energi gas alam

(Burić, dkk., 2021) dan juga untuk menyimulasikan fenomena *upwelling* (Mustikasari, dkk., 2015).

Model hidrodinamika berupa arus dan pasang surut di Pulau Putri ini dilakukan dengan pendekatan numeris melalui model 2D di Delft3D-FLOW yang diselesaikan dengan metode beda hingga. Kajian model hidrodinamika ini menggunakan teknik peniruan kondisi hidrodinamika sebenarnya yang dapat menghasilkan prediksi dari berbagai skenario dan hasil analisis atau hitungannya dapat terkontrol. Pemodelan kondisi hidrodinamika ini menggunakan *software* Delft3D dengan berlakunya persamaan kontinuitas dan kekekalan momentum.

Beberapa penelitian mengenai Pulau Putri adalah penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016) mengenai perubahan garis pantai dengan citra satelit dari tahun 2000-2016, Hernawan, dkk. (2018) mengenai karakteristik pantai dan bahaya abrasi, dan Geurhaneu dan Susantoro (2020) mengenai analisis kanal-kanal OLI untuk pemetaan batimetri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menampilkan karakter arus pasut di Perairan Pulau Putri dengan pendekatan model numerik menggunakan *software* Delft3D-FLOW.

Adapun penelitian-penelitian model hidrodinamika pasang surut dengan metode serupa adalah Budiman, dkk. (2014) mengenai arus pasang surut Teluk Mayalibit dengan menggunakan Fortran 90 yang hasil keluarannya disimulasikan oleh Matlab dan Surfer, Mustikasari, dkk. (2015) mengenai pola arus barotropik musiman 3D dengan pendekatan volume hingga, Susanti, dkk. (2019)



Gambar 1. Peta Lokasi Pulau Putri

mengenai pola pasut dengan model 2D di perairan Teluk Tambelan dengan Princeton Ocean Model, dan Putra, dkk. (2021) mengenai pola arus Perairan Kemujan di Delft3D-FLOW. Secara garis besar, pendekatan yang digunakan pada penelitian ini serupa dengan metode yang digunakan oleh Budiman, dkk. (2014) dan Susanti, dkk. (2019), dimana model hidrodinamika 2D ini hanya membutuhkan data batimetri dan pasang surut sebagai masukan model yang utama. Penelitian tersebut juga menggunakan metode beda hingga sebagai penyelesaian solusi, namun perhitungan dilakukan dengan *software* yang berbeda.

## METODE PENELITIAN

### Tempat dan Waktu Penelitian

Studi model hidrodinamika pasang surut dan arus ini dilakukan di perairan pesisir yang menghadap langsung daratan Singapura atau bagian barat Pulau Putri, Nongsa, Batam, dengan batas wilayah model 104,0563° - 104,755° BT dan 1,1918° - 1,2122° LS (**Gambar 1**).

Adapun waktu simulasi dimulai dari Maret 2021 hingga Februari 2022. Pada peta domain model (**Gambar 2**), batas *open boundary* ditandai oleh garis berwarna biru, sedangkan yang tidak ditandai garis biru adalah *close boundary*. *Close boundary* ini ditentukan oleh titik nol dari *sounding* batimetri.

### Dataset

Data yang digunakan dalam masukan model meliputi batimetri (resolusi spasial dan temporal secara berurutan adalah 20 x 120 m dan 7 detik) dan pasang surut. Batimetri didapat dari tim P3GL melalui metode

pemeruman dengan menggunakan *single beam echo sounder* yang dipasang di samping kapal. Data ini telah dikoreksi dengan data pasang surut. Pasang surut sebagai data validasi didapat dari P3GL yang diamati dengan menggunakan *peilschaal* pada titik koordinat 1,201659° LS; 104,076863° BT. Pengambilan data pasang surut ini dilakukan pada pengamatan 15 piantan, yaitu pada tanggal 14 - 28 Mei 2014 (Hernawan, dkk., 2018). Proses pembangunan model hidrodinamika 2D dilakukan dengan *software* Delft3D-FLOW (Putra, dkk., 2021) dan program T Tide Matlab R2014a (Budiman, dkk., 2014; Tarya, dkk., 2018, Susanti, dkk., 2019) untuk perhitungan komponen pasut yang akan dihasilkan oleh model.

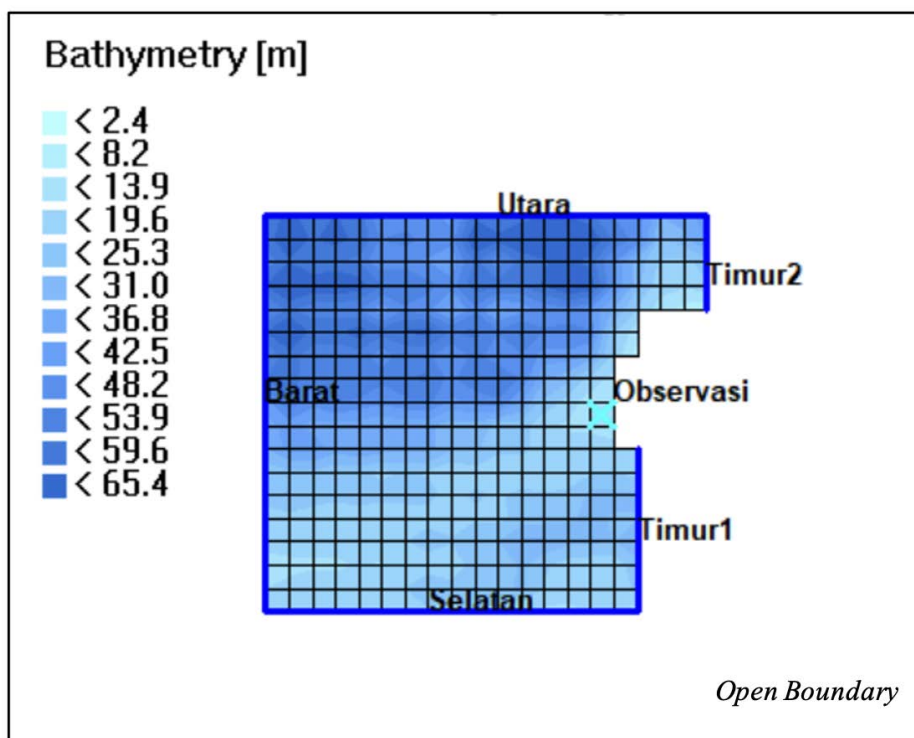
Pada hal ini, T Tide hanya mengeluarkan 6 komponen pasut untuk data yang dihasilkan oleh model (*O1, K1, N2, M2, M4, MS4*). Umumnya konstanta pasut yang paling dominan adalah *M2*, contohnya pada Selat Malaka (Rizal, dkk., 2012), Perairan Pulau Putri (Hernawan, dkk., 2018), dan Perairan Segara Anakan (Tarya, dkk., 2018).

### Persamaan Model

Persamaan kontinuitas dalam model 2D yang dirata-ratakan terhadap kedalaman adalah sebagai berikut (Deltares, 2021):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)V]}{\partial y} = Q \dots \dots (1)$$

dengan nilai *U* dan *V* merupakan kecepatan rata-rata terhadap kedalaman,



Gambar 2. Domain Model

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u \, dz$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v \, dz \dots \dots (2)$$

Kemudian nilai  $Q$  mempresentasikan *inlet* dan *outlet* pada model,

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d\sigma + P - E \dots \dots (3)$$

Pada persamaan di atas  $\zeta$  adalah elevasi muka air (m),  $d$  adalah kedalaman di bawah datum (m),  $Q$  sumber atau buangan air global per unit area (m/s) dengan  $q_{in}$  dan  $q_{out}$  sebagai sumber air lokal dan buangan lokal per unit volume, sedangkan  $P$  dan  $E$  adalah sumber air non lokal dari presipitasi dan evaporasi. Pada penelitian ini, nilai  $P$  dan  $E$  dianggap 0 sehingga sumber air non-lokal bersifat *impermeable*.

Adapun untuk persamaan momentum dalam model 2D yang berlaku di Delft3D adalah sebagai berikut,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + fV = -\frac{1}{\rho} P_u + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(d + \zeta)} + F_u$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = -\frac{1}{\rho} P_v + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho(d + \zeta)} + F_v \dots \dots (4)$$

Pada persamaan (4) terdapat suku-suku ruas kanan berupa  $\tau_{sx}$  atau  $\tau_{sy}$  dan  $\tau_{bx}$  atau  $\tau_{by}$ , yang secara berturut-turut menggambarkan tegangan pada permukaan (*surface*) dan dasar (*bottom*). Pada penelitian ini tegangan permukaan dapat diabaikan karena tidak digunakannya data angin. Secara sederhana persamaan tegangan geser dasar (*the bed stresses*) dapat ditulis sebagai berikut

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2} = c_f U \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g V \sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2} = c_f V \sqrt{U^2 + V^2} \dots \dots (5)$$

Pada persamaan (5)  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),  $C_{2D}$  adalah koefisien tegangan geser dasar dan  $C_{2D}^2$  adalah koefisien *Chézy* 2D ( $m^{1/2}/s$ ). Namun, dalam penelitian ini koefisien *Chézy* 2D diubah menjadi *Manning* secara otomatis dalam perhitungan pada Delft3D-FLOW.

Selanjutnya, suku  $F_u$  dan  $F_v$  pada ruas kanan menggambarkan tegangan *Reynolds* horizontal sebagai pengaruh dari fluktuasi kecepatan (turbulensi) yang bergantung pada jenis alirannya. Pada konsep viskositas

*eddy*, tegangan *Reynolds* telah digambarkan dengan nilai viskositas *eddy* (Deltares, 2021). Pada Delft3D persamaan tegangan *Reynolds* dengan  $\overline{v_H}$  sebagai koefisien viskositas *eddy* horizontal (viskositas horizontal), dapat ditulis secara sederhana menjadi:

$$F_u = v_H \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|$$

$$F_v = v_H \left| \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right| \dots \dots (7)$$

dan persamaan tekanan untuk densitas  $\bar{\rho}$  yang konstan, gaya tekanan pada persamaan momentum dapat ditulis sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} P_u = g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{1}{\rho} P_v = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \dots \dots (8).$$

### Skenario Model

Domain model yang digunakan adalah dua jenis syarat batas, yaitu batas tertutup dan terbuka dengan tipe *water level* berupa masukan data konstanta harmonik. Sedangkan untuk nilai kekasaran dasar *Manning* yang digunakan dihasilkan dari uji sensitivitas untuk menghasilkan nilai kekasaran dasar yang baik (Tarya, dkk., 2018) (**Tabel 1**). Dikarenakan fokus penelitian ini hanya pada arus dan pasang surut, asumsi barotropik ini tidak membutuhkan stratifikasi data seperti pada asumsi baroklinik. Sehingga dalam hal ini, perairan akan selalu memiliki densitas yang konstan (Li, dkk., 2021).

Waktu *running* model dilakukan pada bulan Maret hingga Mei 2020. Dikarenakan dalam hal ini arus dipengaruhi oleh gaya tarik bumi-bulan-matahari, pergerakan arus pasut ini akan bersifat periodik dan tidak dipengaruhi oleh musim (tidak digunakan data angin). Sehingga waktu *running* tiga bulan dianggap sudah cukup dengan asumsi satu bulan pertama adalah waktu stabil yang dibutuhkan model. Selain itu, untuk memvalidasi ketepatan parameter yang digunakan, dilakukan pula *running* model dengan data pasut *time-series* hasil observasi lapangan oleh P3GL.

Pada batas-batas terbuka model skenario dimasukkan nilai konstanta pasut untuk membangkitkan pasang surut oleh Delft3D-FLOW (**Tabel 2**). Konstanta pasut ini didapatkan dari data lapangan pada penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016).

Proses validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pasang surut model pada waktu yang sama dengan data observasi. Pada model MAM, JJA, SON, dan DJF, data akan divalidasi dengan membandingkan nilai RMSE dan hasil konstanta pasang surut yang dihitung di program T Tide. Validasi juga akan dilakukan dengan menghitung

nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) dan bias yang dihitung secara *time series*.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \dots \dots \dots (3.31)$$

$$Bias = |\overline{A_t} - \overline{F_t}| \dots \dots \dots (3.32)$$

dengan  $A_t$  adalah nilai observasi dan  $F_t$  adalah nilai hasil model.

data observasi disajikan pada Tabel 3. Adapun hasil perbandingan grafik elevasi muka air laut dapat dilihat pada Gambar 3. Validasi yang baik menunjukkan bahwa skenario model sudah cukup stabil sehingga dapat dilakukan simulasi dengan waktu simulasi berikutnya. Hal ini didukung oleh interpretasi dalam Putra, dkk. (2021), yaitu nilai 0 - 0,21 m termasuk kategori *error* yang rendah dan oleh penelitian Li, dkk. (2021) yang menghasilkan RMSE pada 4 model dengan masing-

Tabel 1. Asumsi dalam Skenario Model

No.	Parameter	Keterangan
1	Luas Domain	2,538 x 2,271 km
2	$\Delta x, \Delta y$	135 x 135 m
3	Time step	0,03 menit
4	Local time zone	GMT +7
5	Initial conditions	Water level = 0 m
6	Densitas air ( <i>uniform</i> )	1025 kg/m <sup>3</sup>
7	Roughness ( <i>uniform</i> )	Manning ( <i>n</i> ) = 0,17 m <sup>-1/3</sup> s
8	Viskositas Eddy Horizontal ( <i>uniform</i> )	1 m <sup>2</sup> /s

Tabel 2. Komponen Pasang Surut (Sumber: Geurhaneu dan Susantoro, 2016)

Keterangan	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4
A (cm)	76,55	22,63	12,29	5,20	51,82	24,60	17,10	0,67	1,52
g (°)	285	342	290	342	71	25	71	288	28

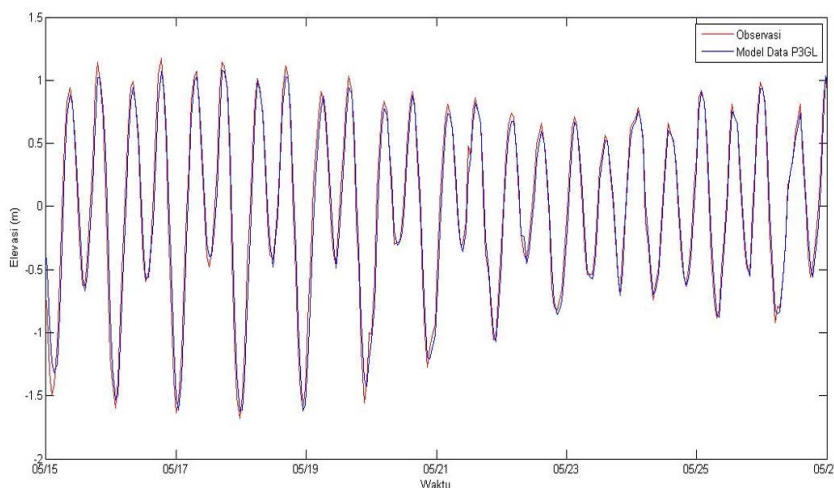
## HASIL

### Validasi Model

Proses validasi dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan membandingkan data pasang surut observasi langsung P3GL dengan skenario model P3GL (waktu simulasi yang disamakan dengan waktu pengambilan data) dan membandingkan konstanta pasut hasil model tiap musim yang telah dihitung pada program T Tide dengan konstanta pasut penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016) (Tabel 2). Hasil validasi data model P3GL dengan

Tabel 3. Perbandingan Hasil Parameter Statistika antara Observasi P3GL dengan Model

Parameter Statistika	Observasi	Model
Max	1,172 m	1,076 m
Min	-1,678 m	-1,622 m
Rata-rata	0,002 m	-0,001 m
Tanggung Pasut	2,81 m	2,68 m
RMSE	0,135	
Bias	0,018	



Gambar 3. Hasil Perbandingan Elevasi Muka Air pada Tanggal 14 - 28 Mei 2014 di Pulau Putri, Batam

masing nilai 0,19 m, 0,23 m, 0,27 m, 0,27 m.

Hasil perbandingan konstanta pasut model dengan data jurnal Geurhaneu dan Susantoro (2016) menunjukkan hasil yang sangat baik, yaitu dengan selisih yang cukup kecil (Tabel 4). Hasil konstanta pasut juga menunjukkan bahwa perairan Pulau Putri memang dominan M2. M2 merupakan salah satu komponen semidiurnal utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan.

Tabel 4. Perbandingan Konstanta Pasang Surut Model dengan Data Jurnal Geurhaneu dan Susantoro (2016)

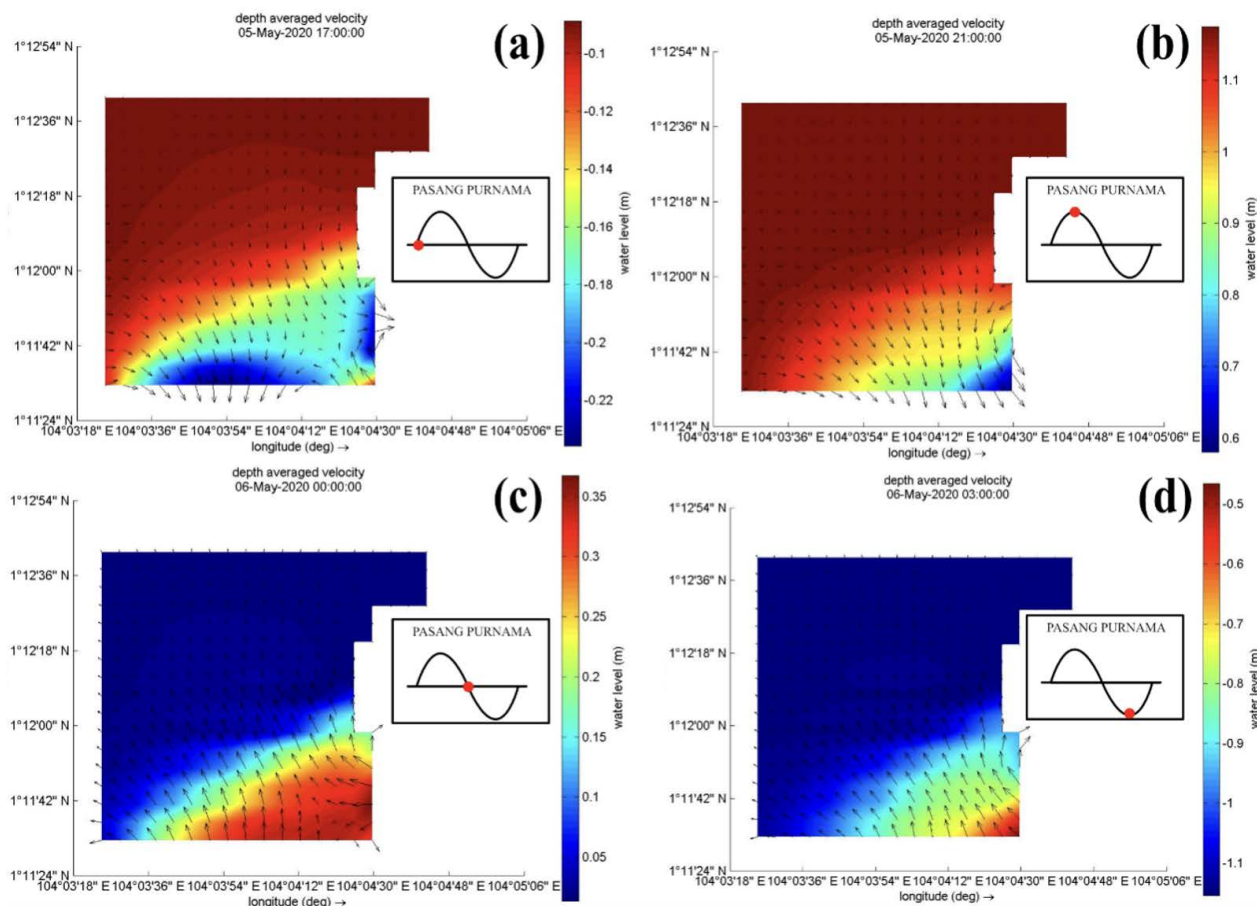
Konstanta	A (cm)	g (°)	Selisih A (cm)	Selisih g (°)	Konstanta	A (cm)	g (°)	Selisih A (cm)	Selisih g (°)
O1	24,48	25	0,12	0,00	M2	69,44	288	7,11	3,00
K1	44,04	62	7,78	9,00	M4	1,43	287	0,76	1,00
N2	12,32	291	0,03	1,00	MS4	1,48	27	0,04	1,00

**Pola Pergerakan Pasang Surut**

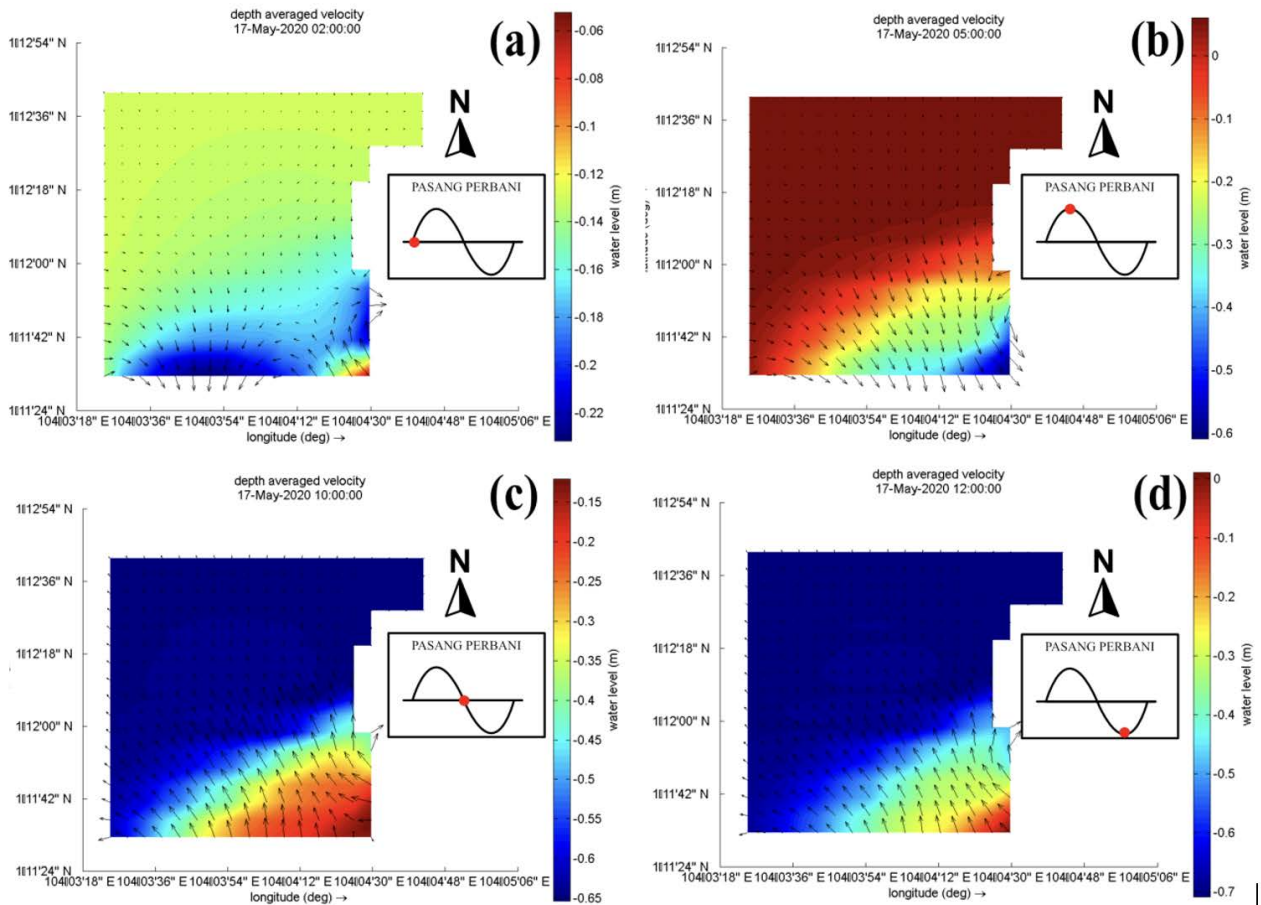
Berdasarkan perhitungan bilangan *Formzahl* dihasilkan nilai *Formzahl* untuk bulan Maret, April, dan Mei secara berturut-turut adalah 0,85; 0,84; dan 0,83; artinya pasang surut yang terjadi disekitar Pulau Putri adalah tipe campuran condong semidiurnal ( $F = 0,25 - 1,5$ ). Hal ini juga sesuai dengan jurnal penelitian Geurhaneu dan Susantoro (2016) yang memperoleh bilangan *Formzahl* sebesar 0,77 yang berada di tipe pasang surut campuran condong semidiurnal. Selain itu, pasang surut pada titik observasi (**Gambar 2**) menunjukkan kondisi pasang pada elevasi muka air laut tertentu cenderung akan menghasilkan elevasi muka air laut yang sama pada hari berikutnya dengan keterlambatan waktu sekitar 1 jam. Pasang surut ini memang tidak terjadi pada waktu yang sama setiap

harinya, melainkan akan terjadi 50 menit lebih lambat dari hari sebelumnya. Hal ini dipengaruhi oleh orbit bulan yang mengelilingi bumi (Webb, 2017).

Hasil simulasi model yang diambil pada bulan Mei 2020 menunjukkan kondisi pasang purnama, elevasi muka air laut pada saat pasang dapat mencapai 1,1 m dengan terendahnya 0,6 m. Pada saat pasang surut menuju pasang (**Gambar 4 a**), perairan sekitar Pulau Putri sudah mendapatkan elevasi muka air laut tertinggi lebih dulu dari area bagian selatannya. Sedangkan pada saat kondisi menuju dan saat surut (**Gambar 4 c dan d**), elevasi muka air laut pada perairan menuju Pantai Nongsa, yaitu menuju timur pada area komputasi, cenderung lebih tinggi. Namun pada kondisi ini, Pulau Putri tetap mendapatkan elevasi muka air laut yang jauh lebih tinggi daripada elevasi muka air laut yang menuju pantai



Gambar 4. Hasil Elevasi Muka Air Laut Beserta Arah Arus pada Saat Pasang Purnama Dibulan Mei; (a) Menuju pasang, (b) Puncak pasang, (c) Menuju surut, (d) Puncak surut



Gambar 5. Hasil Elevasi Muka Air Laut Beserta Arah Arus pada Saat Pasang Perbani Dibulan Mei; (a) Menuju pasang, (b) Puncak pasang, (c) Menuju surut, (d) Puncak surut

Nongsa. Panah-panah yang terdapat pada **Gambar 4** menunjukkan arah arus pasang surut yang terbentuk. Kondisi pasang menyebabkan arus menuju pantai (timur dan tenggara) sedangkan pada saat kondisi surut arus akan berbalik kembali ke laut lepas, yaitu menuju barat pada area komputasi. Apabila dilihat dari anak panah yang menunjukkan arah arus, dari keseluruhan gambar menunjukkan arus berbelok ke Pantai Nongsa, sehingga pada Pulau Putri, terlihat arus cenderung bergerak sejajar pantai. Dari keseluruhan hasil simulasi pada tiap bulan juga menunjukkan pola yang sama namun hanya berbeda angka elevasi muka air laut dan kecepatan arus (**Gambar 4**).

Pada kondisi pasang perbani untuk bulan Mei (**Gambar 5**) menunjukkan pola yang sama dengan pasang purnama untuk arah arusnya. Hal yang membedakannya terletak pada elevasi yang dihasilkan, dimana elevasi tertinggi hanya dapat mencapai  $-0,02$  m dengan elevasi terendahnya  $-0,65$  m. Pada hal ini hanya ditampilkan model simulasi untuk bulan Mei dikarenakan model arus pasut barotropik tanpa stratifikasi akan selalu menghasilkan pola yang sama (mengikuti pola pasut), kemudian dipilih pada bulan Mei diasumsikan bahwa pada waktu simulasi tersebut model sudah dianggap stabil.

### Pola Pergerakan Arus

Pada penelitian ini kecepatan arus yang didapatkan merupakan kecepatan arus yang sudah dirata-ratakan terhadap kedalaman (*depth averaged velocity*). Arus yang dihasilkan cenderung dipengaruhi pasang surut dimana nilai residu yang dihasilkan memiliki nilai rata-rata  $0,1$  m/s dan arus pasang surut  $0,5$  m/s yang diambil pada titik observasi. Kecepatan arus pada kondisi pasang cenderung lebih rendah dibanding pada saat kondisi surut (**Tabel 5**).

Tabel 5. Perbandingan Kecepatan Arus pada saat Pasang dan Surut

Tanggal	Kecepatan (m/s)	
	Pasang	Surut
12/03/2020	0,50	0,74
20/03/2020	0,55	0,71
08/04/2020	0,46	0,70
18/04/2020	0,51	0,65
05/05/2020	0,44	0,68
17/05/2020	0,55	0,80
18/04/2020	0,51	0,65
05/05/2020	0,44	0,68
17/05/2020	0,55	0,80

Arah arus yang digambarkan model menunjukkan pergerakan *bidirectional* berupa arah menuju dan keluar pantai (**Gambar 4 dan 5**). Arus yang berada di sekitar Pulau Putri cenderung lebih kecil dibandingkan arus yang menuju perairan antara Pantai Nongsa dan Pulau Putri (arah selatan dan tenggara). Hal ini dapat disebabkan air akan seperti dipaksakan masuk pada area yang kecil, sehingga kecepatan arus menuju perairan yang lebih sempit cenderung meningkat dibandingkan area yang lebih luas (Webb, 2017). Pada beberapa kasus, kecepatan arus terendah yang dapat mencapai kondisi diam adalah ketika terjadinya perubahan arah dan pada saat menuju pasang atau surut (*slack water*).

## PEMBAHASAN

Pasang surut Pulau Putri memiliki kategori dominan *microtidal* (kisaran  $< 2$  m) dan sedikit *mesotidal* (kisaran 2 - 2,5 m) dikarenakan tunggang pasutnya berada di rentan 0,23 - 1,35 m. Sedangkan pada saat pasang purnama, nilai tunggang pasutnya berkisar dari 1,29 - 2,47 m. Dalam pengkajian lebih lanjut pada daerah pesisir, tunggang pasut ini perlu diperhatikan. Mengingat kenaikan tunggang pasut juga dapat menyebabkan luapan/banjir yang lebih besar di daerah pesisir serta ancaman lainnya yang berhubungan dengan lingkungan pesisir dan aktivitas marine (Li, dkk., 2021). Seperti pada daerah *macrotidal* (kisaran  $> 3$  m), memungkinkan untuk terjadinya genangan permanen atau banjir berkala. Sebaliknya, daerah dengan kondisi *microtidal* ini dianggap cukup aman sehingga cocok untuk dijadikan tempat rekreasi. Informasi mengenai tunggang pasut ini juga dapat berguna untuk perencanaan bangunan pantai ataupun pelabuhan.

Pasang surut juga akan memengaruhi arus, dimana nilai residu yang kecil menandakan bahwa arus dominan dibangkitkan pasang surut. Hal ini juga dapat ditandakan dari arah arus yang dihasilkan yang umumnya bersifat *bidirectional*. Penelitian ini tidak melibatkan pengaruh angin, sehingga residu yang dihasilkan diasumsikan adanya efek topografi yang dominan. Selain angin, arus residu juga dapat disebabkan oleh pengaruh gaya lain seperti efek *coriolis* dan viskositas *eddy*. Akan tetapi, area yang tergolong kecil menyebabkan efek *coriolis* kurang berpengaruh karena memiliki nilai yang konstan. Pada Delft3D rangka model *cartesian* dengan dimensi kurang dari  $\sim 500 \times \sim 500$  km dan pada lintang sedang  $\left[ (|\phi| > 40^\circ)^0 \right]$ , *coriolis* akan dianggap konstan (Deltares, 2021). Sedangkan untuk viskositas *eddy* horizontal yang digunakan pada model ini tidak digunakan stratifikasi sehingga sepanjang area komputasi juga dianggap konstan.

Pada hasil model arus, kecepatan arus maksimum tidak melebihi 1,5 atau bahkan 2 m/s. Pola arus yang dihasilkan pada penelitian ini mirip dengan yang dihasilkan oleh Putra, dkk. (2021) pada penelitiannya di Perairan Kemujan, Karimunjawa, yaitu memiliki pola arus 2 arah. Meskipun pada model Putra, dkk. (2021)

dilibatkan data angin, namun ada kemungkinan bahwa angin tidak akan memiliki pengaruh signifikan dalam model hidrodinamika 2D ini. Karena hal ini sudah pernah dilakukan sebelumnya dengan data angin *time-series* dan *uniform* untuk setiap *grid*. Pada Delft3D, ketika aliran fluida vertikal diabaikan atau homogen (hidrodinamika 2D), maka berlaku pendekatan *depth-averaged* yang artinya pada hal ini arus telah dirata-ratakan terhadap kedalaman. Sedangkan pada model 3D, variasi terhadap arah vertikal akan terlihat signifikan, dimana variasi ini dibangkitkan oleh angin salah satunya (Deltares, 2021). Maka dari itu, pada penelitian ini tidak melibatkan data angin seperti yang telah dilakukan oleh Budiman, dkk. (2014) dan Susanti, dkk. (2019).

Serupa dengan Putra, dkk. (2021) yang juga merupakan perairan dekat pantai dengan tipe model barotropik, sehingga juga dihasilkan pola arus dominan pasang surut yang sangat jelas. Pergerakan pasang surut yang bersifat periodik, menyebabkan pasang surut dapat diprediksi. Begitu pula pada arus pasang surut. Hal ini dapat dilihat dari pola pergerakan arus pasut yang terlihat selalu sama. Selain itu, sama halnya dalam penelitian Putra, dkk. (2021), apabila diperhatikan arah arus cenderung sejajar terhadap *closed boundary* ketika melewati *closed boundary* dan akan tampak seperti keluar masuk pada *open boundary*. Hal ini dikarenakan pada area *open boundary* terjadi pertukaran aliran fluida antara perairan di luar area komputasi dengan fluida pada area komputasi. Sedangkan pada *closed boundary*, dianggap tidak terjadi pertukaran fluida, sehingga fluida akan diteruskan sejajar garis *closed boundary*.

Arus umum yang dipengaruhi pasang surut ini juga berpengaruh terhadap kecepatan arus itu sendiri, dimana kecepatan arus maksimum terjadi pada saat surut. Sebaliknya kecepatan arus akan menurun pada saat kondisi pasang. Perbandingan kecepatan saat pasang dan surut disajikan pada **Tabel 5**. Tanggal pasang dan surut yang disajikan merupakan kondisi saat purnama dan perbani tertinggi di setiap bulan.

## KESIMPULAN

Pemodelan arus pasut hidrodinamika 2D yang telah dilakukan dengan pendekatan barotropik dapat menghasilkan pola arus pasut yang cukup baik meskipun tanpa adanya stratifikasi pada model. Pasut Pulau Putri memiliki nilai *Formzahl* 0,85; 0,84; dan 0,83 untuk masing-masing bulan Maret hingga Mei secara berurutan. Selain itu pasut di perairan Pulau Putri dominan oleh konstanta pasut *M2* dengan tunggang pasut berkisar 0,23 - 1,35 m (perbani) dan 1,29 - 2,47 m (purnama). Adapun kecepatan rata-rata arus yang dihasilkan pada titik observasi adalah 0,5 m/s untuk arus pasut dan 0,1 m/s untuk arus residu dengan kecepatan arus yang meningkat pada saat surut dan menurun di saat pasang. Dihasilkan pula arah arus pasut yang bergerak secara *bidirectional* dengan arah yang cenderung sejajar pada saat melewati *closed boundary*.



## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan serta kepada seluruh anggota tim penelitian Pulau Putri, Nongsa, Batam atas sumber data lapangan yang digunakan dalam penelitian ini.

## DAFTAR ACUAN

- Budiman, Asep Sandra, Alan F. Koropitan, I Wayan Nurjaya. 2014. Pemodelan Hidrodinamika Arus Pasang Surut Teluk Mayalibit Kabupaten Raja Ampat Provinsi Papua Barat. *Depik*. Vol. 3. No. 2. Hal. 146-156.
- Burić, Melita, Sanja Grgurić, Hrvoje Mukulčić, Xuebin Wang. 2021. A Numerical Investigation of Tidal Current Energy Resource Potential in a Sea Strait. *Energy*. Vol. 234. hal. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121241>.
- Deltares. 2021. *Deltares Manual Book: Hydro-Morphodynamics*. Deltares: Netherland.
- Geurhaneu, N. Y., dan T. M. Susantoro. 2016. Perubahan garis pantai berdasarkan data penginderaan jauh di Pulau Putri, Nongsa, Kota Batam, Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Geologi Kelautan*. 14 (2):79-90.
- \_\_\_\_\_. 2020. Analisis Kanal-kanal Landsat 9 Operational Land Imager (OLI) untuk Pemetaan Batimetri di Sekitar Pulau Putri, Kota Batam. *Jurnal Geologi Kelautan*. Vol. 18. No. 1.
- Hernawan, Undang, Nineu Yayu, dan Godwin Latuputty. 2018. Karakteristik Pantai dan Bahaya Abrasi di Pulau Putri, Nongsa, Batam. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*. Vol. 3. No. 2. Hal 137 – 153.
- Li Wenguo, Bernhard Mayer, Thomas Pohlmann. 2021. The Influence of Baroclinity on Tidal Ranges in the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol 250. ISSN 0272-7714. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107126>.
- Mustikasari, Eva, Lestari Cendikia Dewi, Aida Heriati, dan Widodo Setiyo Pranowo. 2015. Pemodelan Pola Arus Barotropik Musiman 3 Dimensi (3D) untuk Mensimulasikan Fenomena Upwelling di Perairan Indonesia. *J. Segara*. Vol. 11. No. 1. Hal. 25-35.
- Peraturan Daerah Provinsi Kepulauan Riau Nomor 1 Tahun 2017. *Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Kepulauan Riau Tahun 2017-2037*.
- Putra, Yolansyah Rahmat, Elis Indrayanti, Dwi Haryo Ismunarti, Gentur Handoyo, dan Aris Ismanto. 2021. Pola Arus Perairan Kemujan, Karimunjawa pada Musim Peralihan II dengan Menggunakan Model Delft3D. *Indonesia Journal of Oceanography (IJOCE)*. Vol. 03. No. 03. Hal. 83-98. ISSN:2714-8726.
- Susanti, Fratiwi, Desti Ardiani, Yulianti, Muliadi, Arie Antasari Kushadiwijiyanto. 2019. Pola Pasang Surut Komponen Diurnal di Perairan Teluk Tambelan Provinsi Kepulauan Riau. *Prisma Fisika*. Vol. 7. No. 2. Hal. 94 - 100.
- Solano, M., M. Canals, S. Leonardi. 2020. Barotropic Boundary Conditions and Tide Forcing in Split-Explicit High Resolution Coastal Ocean Models. *Journal of Ocean Engineering and Science* 5. pg. 249-260.
- Rizal, Syamsul, Peter Damm, Mulyadi A. Wahid, Jurgen Sundermann, Yopi Ilhamsyah, Taufiq Iskandar, dan Muhammad. 2012. General Circulation in the Malacca Strait and Andaman Sea: A Numerical Model Study. *American Journal of Environmental Science*. No. 8. vol. 5. pg. 479-4788.
- Tarya, Ayi, Larasati C. Sunaringati, dan Nining Sari Ningsih. 2018. Identifikasi Pengaruh Kerapatan Mangrove terhadap Dinamika Pasang Surut di Segara Anakan, Cilacap, Jawa Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan dan Perikanan IV 2018*.
- Webb, P. 2017. *Introduction to Oceanography*. Online OER textbook. <https://webboceanography.pressbooks.com>

