

Pemodelan Arus dan Muatan Padatan Tersuspensi di Perairan Estuari Muara Bengawan Solo Ujung Pangkah Gresik

Zainul Hidayah^{1,2*}, Minkhatul Maula¹, Maulinna Kusumo Wardhani^{1,3}

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Kelautan dan Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura

²Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Trunojoyo Madura

Jl. Raya Telang No 02 Kamal Bangkalan Madura 69162 Jawa Timur, Indonesia

³Program Doktor Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Kampus ITS Keputih Sukolilo Kota Surabaya 60111 Jawa Timur

Email: zainulhidayah@trunojoyo.ac.id

Abstrak

Ujung Pangkah merupakan muara dari Sungai Bengawan Solo yang merupakan salah satu sungai terpanjang di Indonesia. Secara administrasi, daerah ini masuk kedalam wilayah Kecamatan Ujung Pangkah Kabupaten Gresik. Aliran Sungai Bengawan Solo yang bermuara di perairan estuari ini membawa sedimen yang terlarut dalam bentuk Muatan Padatan Tersuspensi (MPT) yang persebarannya dipengaruhi oleh pergerakan arus. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola sirkulasi arus di perairan estuari Ujung Pangkah Gresik dan menganalisis pengaruh pergerakan arus dan pasang surut terhadap sebaran MPT. Simulasi model hidrodinamika digunakan pada penelitian ini dengan input data utama adalah pasang surut dan batimetri. Hasil penelitian menjelaskan bahwa model hidrodinamika yang diperoleh untuk menjelaskan pergerakan arus pasang surut dengan kecepatan berkisar antara 0,12 -0,38 m/s. Pola sebaran menunjukkan bahwa konsentrasi MPT yang tinggi umumnya terjadi pada saat kondisi perairan surut, sedangkan pada saat kondisi pasang, nilai konsentrasi MPT cenderung rendah. Pada saat kondisi surut terendah, hasil simulasi menunjukkan konsentrasi MPT yang tinggi (360 - >440 mg/l) tepat di mulut sungai dan menyebar ke bagian utara muara. Sementara itu, di bagian timur dan selatan muara, konsentrasi MPT relatif lebih rendah, berkisar antara 80–240 mg/l. Model hidrodinamika yang diperoleh cukup baik untuk menjelaskan pergerakan arus dan MPT (MAPE <20%).

Kata kunci : Ujung Pangkah, arus, muatan padat tersuspensi, pemodelan, hidrodinamika

Abstract

Modelling of Current and Total Suspended Solids in Bengawan Solo Estuary Ujung Pangkah Gresik

Ujung Pangkah is the estuary of the Bengawan Solo River which is one of the longest rivers in Indonesia. Administratively, this area is included in the Ujung Pangkah District, Gresik Regency. The flow of the Bengawan Solo River into the estuary carries dissolved sediments in the form of suspended solids which distribution is influenced by current movements. This study aims to determine the pattern of current circulation in the Ujung Pangkah estuary and analyze the effect of current and tidal movements on the distribution of suspended solids. Hydrodynamic model simulation is used in this study with the main data inputs are tides and bathymetry. The results of the study explain that the hydrodynamic model explain the movement of tidal currents with velocities ranging from 0,12 to 0,38 m/s. The distribution pattern shows that high suspended solids concentrations generally occur during low tide conditions, whereas during high tide conditions, suspended solids concentrations tend to be low. At the lowest low tide, the simulation results show high suspended solids concentrations (360 to >440 mg/l) at the estuary and distributed to the northern part of the estuary. Meanwhile, in the eastern and southern parts of the estuary, suspended solids concentrations were relatively lower, ranging from 80–240 mg/l. The hydrodynamic model obtained in this study was sufficient to explain the current movement and MPT (MAPE <20%).

Keywords : Ujung Pangkah, current, suspended solids, modelling, hydrodynamics

PENDAHULUAN

Kawasan perairan estuari adalah salah satu bagian wilayah pesisir yang memiliki karakteristik semi tertutup, terhubung dengan laut dan secara konstan mendapatkan pasokan air tawar yang berasal dari sungai. Oleh karena itu, kawasan perairan estuari merupakan tempat bercampurnya massa air dengan sifat-sifat fisik yang berbeda terutama salinitas (Arvianto *et al.*, 2016; Tejakusuma, 2005). Dinamika kondisi oseanografi di perairan semi tertutup seperti estuari dan teluk dipengaruhi oleh arus yang ditimbulkan oleh pasang surut (Budiman *et al.*, 2014). Sifat perairan estuari yang cenderung tenang dan jauh dari pengaruh gelombang menyebabkan material padat tersuspensi seperti sedimen yang terbawa aliran sungai mudah diendapkan.

Aliran sungai yang bermuara di perairan estuari tidak hanya membawa sedimen, namun senyawa-senyawa kimia yang dapat mempengaruhi kualitas air. Kandungan *Total Suspended Solid* (TSS) yang tinggi menyebabkan perairan estuari umumnya keruh, sementara pencampuran massa air sungai dan laut menyebabkan nilai salinitas perairan berkisar antara 0,5 psu sampai dengan 32 psu. Selain itu, tingginya kandungan bahan organik menyebabkan rendahnya konsentrasi oksigen terlarut (Surbakti *et al.*, 2018). Kondisi lingkungan perairan estuari yang cukup ekstrim tentu saja berpengaruh terhadap struktur komunitas biota perairan yang hidup di dalamnya terutama plankton dan benthos (Fathur *et al.*, 2019; Syafarina *et al.*, 2018).

Ujung Pangkah merupakan muara dari Sungai Bengawan Solo yang merupakan salah satu sungai terpanjang di Indonesia. Secara administrasi, daerah ini masuk kedalam wilayah Kecamatan Ujung Pangkah Kabupaten Gresik. Berdasarkan data pemantauan yang dilakukan oleh LAPAN menggunakan citra satelit tahun 2010 sampai dengan 2015, jenis tutupan lahan di kawasan ini relatif tetap dan didominasi oleh tambak dan hutan mangrove (Anggraini *et al.*, 2017). Namun, kawasan Ujung pangkah memiliki dinamika akresi yang sangat tinggi. Hal tersebut ditunjukkan berdasarkan pengamatan citra satelit periode tahun 2006 sampai dengan 2016 yang menunjukkan adanya akresi akibat proses sedimentasi seluas $\pm 411,38$ Ha (Prasetyo *et al.*, 2017). Lebih lanjut, pendangkalan di daerah sekitar muara sungai dapat berakibat buruk pada ekosistem di estuari dan pantai, dan seiring bertambahnya waktu dapat merubah garis pantai

(Banjarnahor *et al.*, 2016; Suharyo & Hidayah, 2019). Dampak dari pendangkalan juga dapat berakibat pada perubahan pola arus di perairan tersebut yang merupakan hasil interaksi arus dengan kondisi fisik garis pantai dan topografi dasar perairan (Kamat *et al.*, 2014). Tingginya aktivitas manusia dan industri yang membuang sampah atau bahan pencemar lain berdampak terhadap kualitas air di badan sungai maupun muara sungai. Beberapa parameter yang umumnya digunakan untuk menilai kualitas air antara lain adalah muatan padat tersuspensi dan kandungan oksigen terlarut (DO), sementara pengaruh pencampuran massa air tawar dan air laut dijelaskan dengan nilai salinitas. Selanjutnya, pergerakan atau distribusi massa air dengan karakteristik yang berbeda-beda tersebut dipengaruhi oleh pergerakan arus yang dapat dipelajari melalui model hidrodinamika.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola sirkulasi arus di perairan estuari Ujung Pangkah Gresik dan menganalisis pengaruh pergerakan arus dan pasang surut terhadap sebaran muatan padat tersuspensi (MPT). Pendekatan yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan pemodelan hidrodinamika yang umum digunakan untuk mensimulasikan pergerakan arus dan gelombang pada waktu tertentu di perairan laut dan pesisir. Penggunaan pemodelan hidrodinamika diantaranya telah digunakan untuk mempelajari karakteristik arus permukaan di wilayah semi tertutup seperti teluk, muara sungai dan selat (Arvianto *et al.*, 2016; Kamat *et al.*, 2014; Milasari *et al.*, 2021; Sri Suharyo & Adrianto, 2018) maupun perairan terbuka (Baharuddin *et al.*, 2017; Budiman *et al.*, 2014). Selanjutnya, penggunaan model hidrodinamika bermanfaat untuk perencanaan struktur bangunan pantai dan pelabuhan, instalasi kabel atau pipa bawah laut dan sebagai data masukan bagi pengelolaan kawasan pesisir dan pulau kecil (Adibhusana *et al.*, 2016; Amirullah *et al.*, 2014; Hidayah *et al.*, 2019; Ichsan *et al.*, 2017).

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian ini adalah di perairan estuari Pangkah Wetan dengan koordinat -06°.8876 LS dan 112°.6179 BT yang masuk kedalam wilayah Kecamatan Ujung Pangkah (Gambar 1). Lokasi ini berjarak kurang lebih 35 kilometer ke arah utara dari Kota Gresik, Provinsi Jawa Timur. Secara morfologis, lokasi penelitian adalah sebuah wilayah delta yang terbentuk akibat

endapan sedimen di muara Sungai Bengawan Solo. Masyarakat di lokasi penelitian pada umumnya memiliki mata pencarian sebagai nelayan atau petambak yang sangat bergantung kondisi alam wilayah pesisir. Kawasan ini juga terkenal karena keberadaan hutan mangrove seluas 1.554,27 Ha yang ditetapkan sebagai Kawasan Ekosistem Esensial (KEE) oleh Pemerintah Provinsi Jawa Timur pada tahun 2021. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2020 hingga bulan Januari 2021 yang meliputi tahapan pengambilan data lapang, analisis laboratorium dan pembuatan model hidrodinamika.

Pengambilan Data Lapang dan Analisis Muatan Padat Tersuspensi (MPT)

Pengambilan data lapang berupa sample air dilakukan di lokasi penelitian untuk mengukur nilai MPT di 20 titik pengamatan (Gambar 1). Selain itu, dilakukan pula pengukuran arus permukaan dengan menggunakan instrumen *current meter*. Alat tersebut dipasang pada titik koordinat 112.62338° BT dan -6.88147° LS. Pengambilan data lapang dilakukan selama 24 jam dari tanggal 20 hingga 21 Desember 2020. Nilai MPT ditentukan melalui analisis sample air dengan menggunakan metode Gravimetri yang dilakukan di Laboratorium Oseanografi Prodi Ilmu Kelautan Universitas Trunojoyo Madura. Analisis Gravimetri yang dilakukan menggunakan kertas saring (*glass-fiber filter*) Whatman Grade 934 AH dengan ukuran pori (*particle retention*) 1,5 µm. Data hasil pengukuran lapang ini selain digunakan untuk menggambarkan kondisi perairan estuari Ujung Pangkah, juga bermanfaat untuk input dan validasi hasil pemodelan.

Pemodelan Arus Permukaan Laut dan MPT

Simulasi pemodelan hidrodinamika pada penelitian ini menggunakan software Mike 21

dengan modul hidrodinamika (HD). Pembatasan area pemodelan dilakukan menggunakan domain *flexible mesh* yang dibuat dari data batimetri lokasi penelitian yang berasal dari peta Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau Kecil (RZWP3K) Provinsi Jawa Timur. Selain itu, input pada modul HD adalah data pasang surut yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang diambil selama 30 hari, dari tanggal 15 Desember 2020 hingga 14 Januari 2021.

Selanjutnya untuk pemodelan MPT menggunakan Modul ECOLab pada Mike 21, data input yang digunakan adalah hasil pemodelan arah dan kecepatan arus pada modul HD. Selain itu, digunakan juga data debit air sungai Sungai Brantas yang mengarah ke muara Ujung Pangkah. Data tersebut diperoleh dari Badan Pengelola Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung (BPDAS-HL) Brantas. Nilai rata-rata debit air sungai Brantas di muara Ujung Pangkah pada bulan Desember-Januari 2021 adalah tercatat sebesar $173,12 \pm 57,14 \text{ m}^3/\text{detik}$. Pemodelan dilakukan di muara sungai dengan data MPT yang digunakan adalah hasil pengukuran lapang di 20 titik pengamatan (Gambar 1). Simulasi dilakukan per 1 jam sesuai dengan durasi data pasang surut yang diatur dalam *720 time step*. Persamaan matematika yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti formula 1-4.

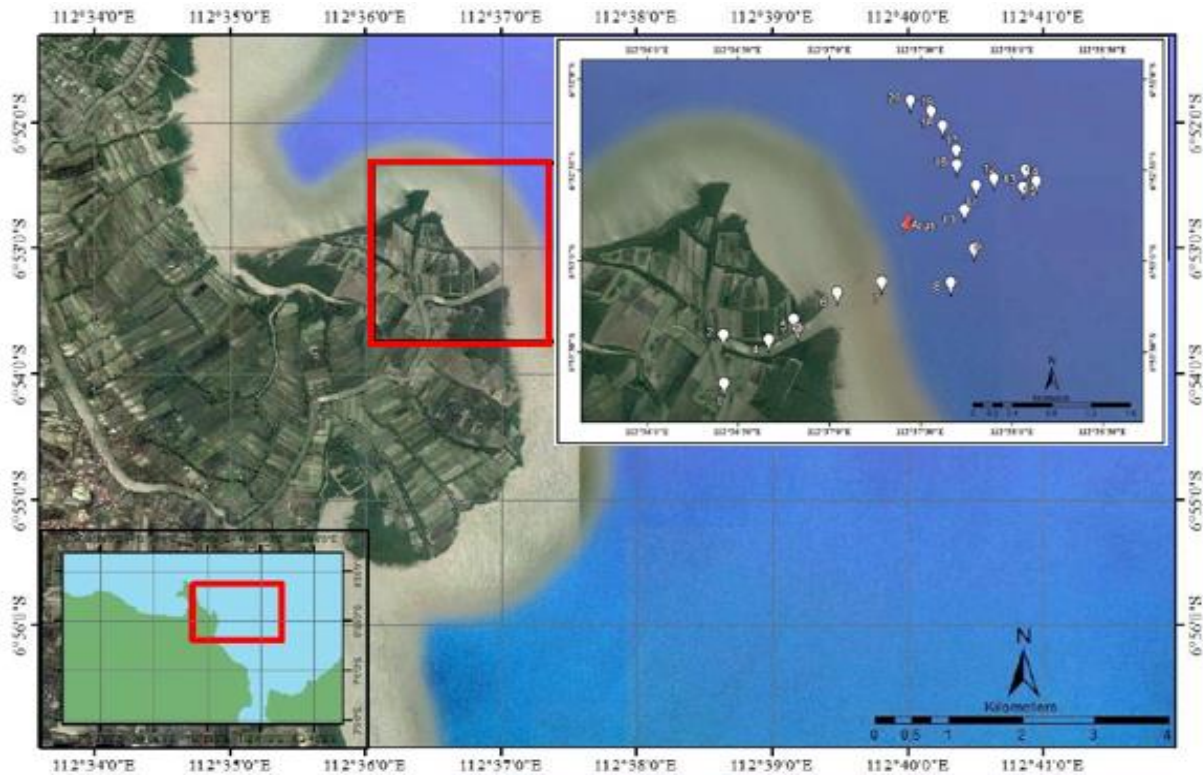
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

Momentum pada sumbu X dan Y dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (3)$$

Keterangan : $h(x, y, t)$ = kedalaman air (m); $V, V_x, V_y(x, y, t)$ = komponen angin (m/s); $d(x, y, t)$ = variasi kedalaman perairan per waktu (m); $\Omega(x, y)$ = parameter coriolis (s^{-1}); $\zeta(x, y, t)$ = ketinggian muka air (m); $p_a(x, y, t)$ = tekanan atmosfer (kg/m^2); $p, q = XY$ densitas flux ($\text{m}^3/\text{s/m}$); ρ_w = densitas air (kg/m^3); $C(x, y)$ = chezy barrier ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}$); x, y = koordinat; g = gaya gravitasi (m/s^2); t = waktu (s); $f(V)$ = faktor gesekan angin; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = komponen tegangan geser



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Persamaan yang digunakan pada model ECO Lab

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = Dx \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Dy \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Dz \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Sc + Pc \quad (4)$$

Keterangan : *c* = konsentrasi variabel ECOlab; *u, v, w* = komponen arus; *Dx* = koefisien dispersi pada arah *x*; *Dy* = koefisien dispersi pada arah *y*; *Dz* = koefisien dispersi pada arah *z*; *Sc* komponen source dan sink; *Pc* = proses ECOlab

Validasi Hasil Pemodelan

Validasi hasil pemodelan dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan dari hasil simulasi. Pada penelitian ini, akurasi hasil simulasi ditentukan melalui perhitungan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Nilai MAPE diperoleh dengan membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapang. Sebuah model dapat dinyatakan akurat/ valid bila nilai MAPE < 20%. Selanjutnya bila nilai MAPE berkisar antara 20-50% maka model dapat dinyatakan cukup valid/wajar, sedangkan bila nilai MAPE > 50% maka model dianggap tidak valid

(Chen, 2003). Persamaan yang digunakan untuk menghitung MAPE mengikuti formula 5 :

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{Y_i - Y}{Y} \right|}{N} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan : *Y_i* = nilai hasil simulasi model; *Y* = nilai hasil pengukuran lapang; *N* = jumlah data; *I* = urutan data

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pasang surut yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data yang berasal dari dari BIG (<http://tides.big.go.id/pasut/>) untuk periode bulan Desember tahun 2020. Selanjutnya analisis data pasang surut dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Least Square* (Gambar 2). Hasil analisis menunjukkan bahwa tipe pasut yang terjadi di perairan Ujung Pangkah adalah *diurnal* (bilangan Formzahl = 4,33). Analisis lanjutan juga menunjukkan beberapa nilai yaitu MSL = + 1,875 m, HHWL = + 2,935 m, MHWL = + 2,554 m, LLWL = + 0,818 m.

Tipe pasang surut air laut diurnal yang terjadi di lokasi penelitian menunjukkan bahwa

selama 24 jam terjadi 1 kali pasang dan 1 kali surut. Kondisi pasang surut di Laut Jawa merupakan hasil interaksi antara massa air laut yang berasal dari Samudra Pasifik dan Samudra Hindia yang lalu masuk ke Laut Jawa dari timur. Sedangkan massa air laut yang berasal dari Laut Cina Selatan masuk ke Laut Jawa dari arah barat melalui Selat Karimata (Budi & Pamungkas, 2017; Pamungkas, 2018). Oleh sebab itu, akibat interaksi yang kompleks dan kondisi geografis yang berbeda, terdapat variasi tipe pasang surut di wilayah pesisir utara Pulau Jawa Utara *diurnal* (tipe pasut harian tunggal) dan *mixed-tide prevailing diurnal* (tipe pasut campuran condong harian tunggal).

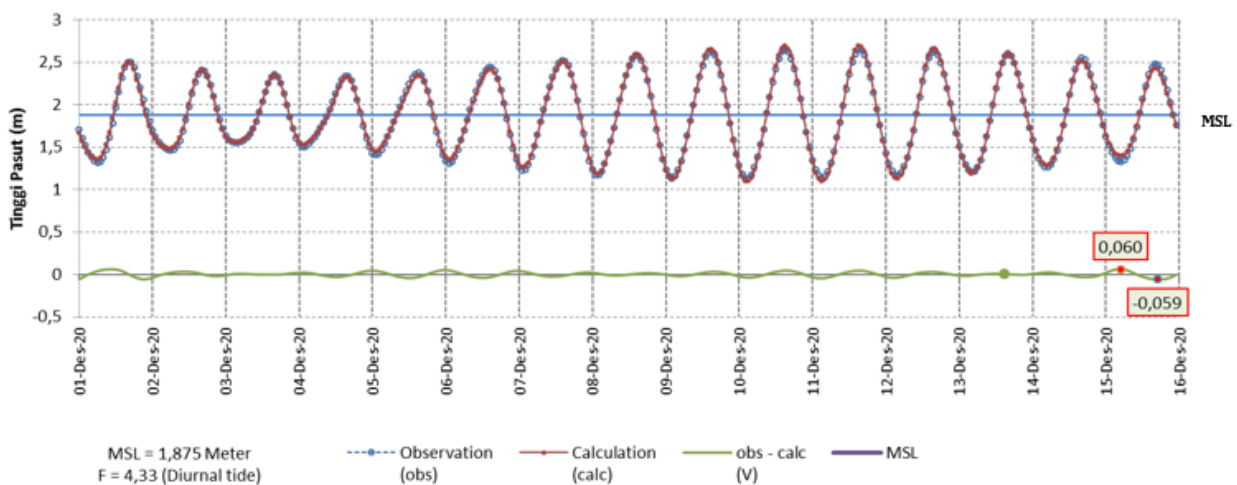
Simulasi Model Arus

Untuk mengetahui pola pergerakan arus di perairan estuari Ujung Pangkah dilakukan simulasi arus dengan pemodelan hidrodinamika. Seperti umumnya perairan pesisir yang terletak di muara sungai, pergerakan arus di Ujung Pangkah sangat dipengaruhi oleh pasang surut. Kecepatan dan arah arus pasang surut berubah-ubah secara periodik dalam suatu selang waktu tertentu sesuai dengan siklus pasang surut yang terjadi di lokasi perairan tersebut. Pada simulasi ini, pola arus diamati saat kondisi surut terendah, surut menuju pasang, pasang tertinggi dan pasang menuju surut. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada kondisi surut terendah (Gambar 3a), arus di perairan estuari Ujung Pangkah bergerak dari muara sungai menuju ke laut dengan kecepatan berkisar antara 0,12 m/s hingga 0,38 m/s. Sementara itu di perairan laut lepas arus dominan bergerak dari arah timur laut menuju

tenggara. Selanjutnya saat kondisi surut menuju pasang (Gambar 3b) pola pergerakan arus di muara sungai terlihat tidak beraturan. Hal ini terjadi karena kedudukan air yang mulai bergerak kearah laut lepas dan bercampur dengan massa air yang keluar dari muara sungai. Sedangkan arus yang terjadi di luar muara sungai terlihat mulai berbalik arah dari tenggara menuju ke barat laut. Pada kondisi ini, kecepatan arus berkisar antara 0,1 m/s hingga 0,38 m/s. Pola arus selanjutnya berdasarkan Gambar 3c adalah kondisi saat pasang tertinggi, yang menunjukkan pergerakan massa air laut bergerak memasuki muara sungai dengan kecepatan berkisar antara 0,24 m/s hingga 0,58 m/s. Sementara itu, di luar muara sungai pola arus pada kondisi pasang tertinggi serupa dengan kondisi saat surut menuju pasang, yaitu bergerak dari tenggara menuju barat laut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kecepatan arus saat pasang tertinggi. Selanjutnya, pada saat kondisi pasang menuju surut terlihat bahwa massa air bergerak dari muara sungai menuju ke laut lepas dengan kecepatan berkisar antara 0,1 m/s hingga 0,24 m/s. Arah pergerakan arus di laut lepas pada kondisi ini memperlihatkan massa air bergerak dari arah timur laut menuju tenggara (Gambar 3d).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada saat pasang arus bergerak menuju muara sungai Bengawan Solo, sebaliknya pada saat surut arus bergerak keluar muara sungai menuju ke laut. Salah satu faktor yang mempengaruhi pergerakan arus keluar muara sungai pada saat surut adalah debit sungai. Tingginya debit akan membuat arus yang menuju keluar muara menjadi bertambah kuat. Kondisi ini normal ditemukan di perairan



Gambar 2. Hasil Analisis Pasang Surut Perairan Ujung Pangkah

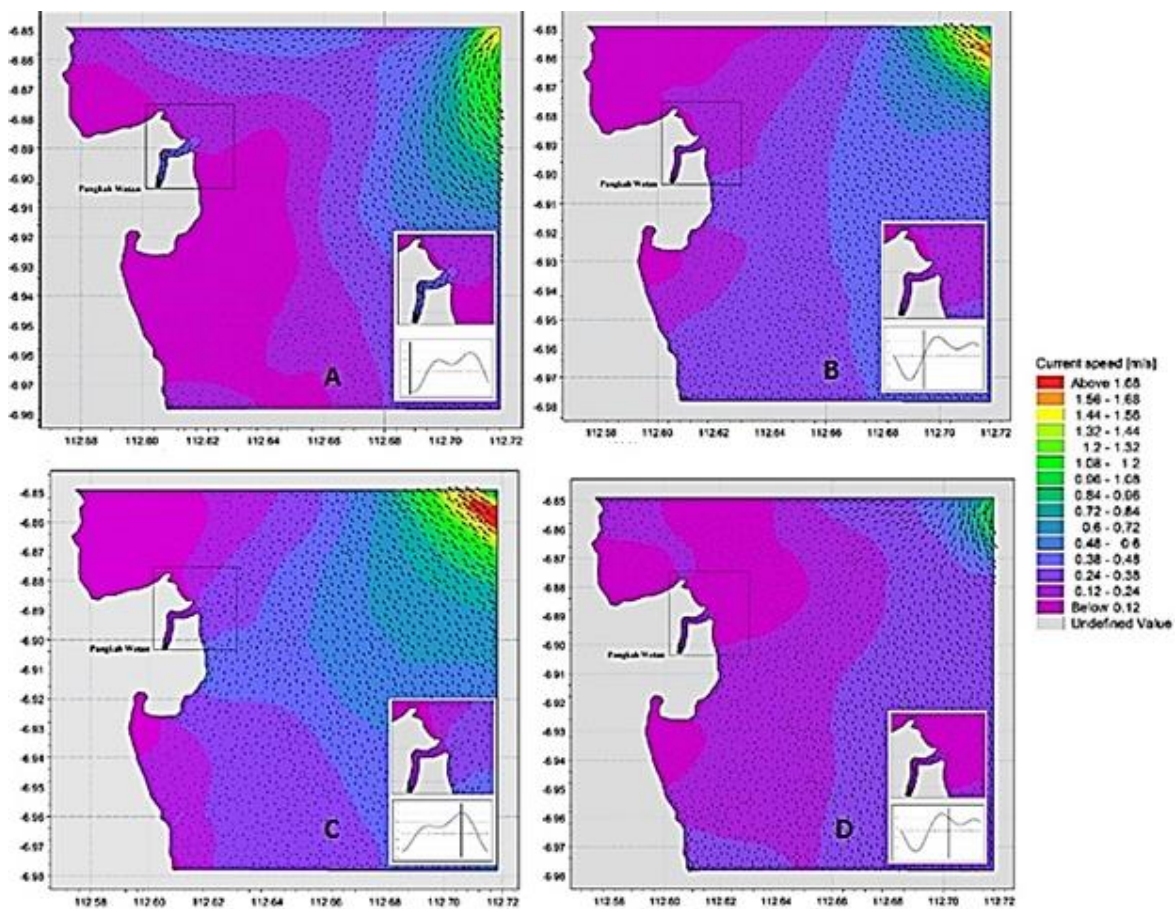
muara sungai seperti yang terjadi di muara sungai Malalayang Teluk Menado dan Muara Sugihan Banyuasin (Kamat *et al.*, 2014; Surbakti *et al.*, 2018). Selain itu pergerakan arus saat pasang dan surut dipengaruhi pula oleh elevasi muka air. Perairan semi tertutup seperti teluk atau muara sungai pada saat pasang memiliki elevasi muka air yang lebih rendah dibandingkan daerah diluar nya. Pada saat puncak periode pasang tertinggi elevasi di dalam dan di luar teluk memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Sebaliknya saat periode surut terjadi fenomena yang bertolak belakang, dimana elevasi muka air di sekitar muara menjadi lebih tinggi daripada elevasi muka air di luar muara sungai (Budiman *et al.*, 2014).

Validasi model dilakukan dengan membandingkan data arus hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan yang dilakukan menggunakan alat current meter (Gambar 4). Akibat keterbatasan kemampuan alat yang digunakan, maka validasi hanya dilakukan untuk kecepatan arus saja. Hasil validasi menunjukkan

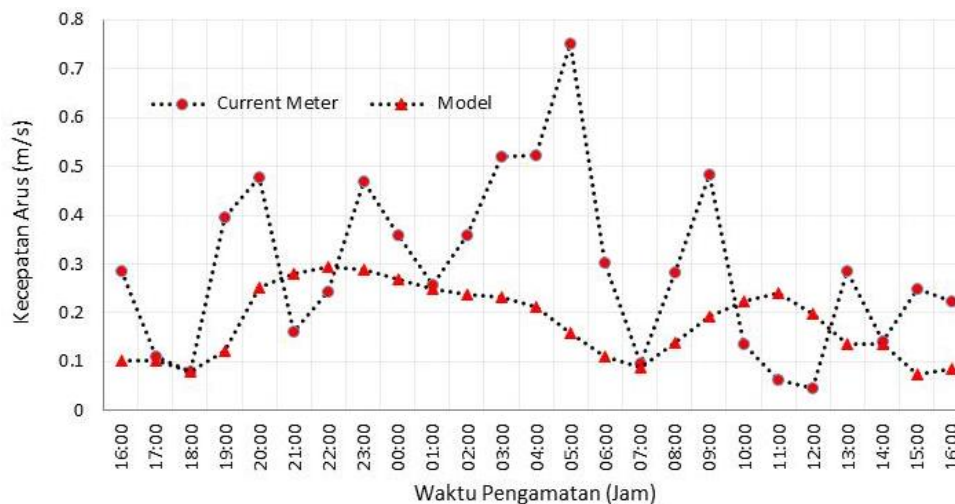
nilai MAPE = 43,18% yang menunjukkan bahwa simulasi kecepatan arus pada model hidrodinamika dapat dianggap cukup valid/wajar ($20\% < \text{MAPE} < 50\%$) (Chen, 2003).

Simulasi Model Distribusi Muatan Padatan Tersuspensi

Nilai konsentrasi MPT (mg/l) menunjukkan kandungan material organik atau anorganik yang berada di kolom air sebelum mengendap di dasar perairan. Pada perairan estuari atau muara sungai seperti di Ujung Pangkah, padatan tersuspensi berasal dari hasil erosi batuan, lapisan tanah atau limbah yang terbawa air sepanjang aliran sungai. Secara kualitatif, tingginya nilai muatan padat tersuspensi dapat diamati melalui tingkat kekeruhan perairan. Semakin keruh warna air, maka diperkirakan kandungan padatan tersuspensi nya tinggi. Sedimen yang tersuspensi pada perairan memiliki pengaruh terhadap kualitas perairan tersebut dan dapat berakibat buruk pada metabolisme biota laut. Baku mutu nilai MPT yang



Gambar 3. Hasil Simulasi Pola Arus pada Kondisi (a) Surut Terendah; (b) Surut Menuju Pasang; (c) Pasang Tertinggi; (d) Pasang Menuju Surut



Gambar 4. Perbandingan Data Kecepatan Arus (m/s) Hasil Simulasi dan Pengukuran Current Meter

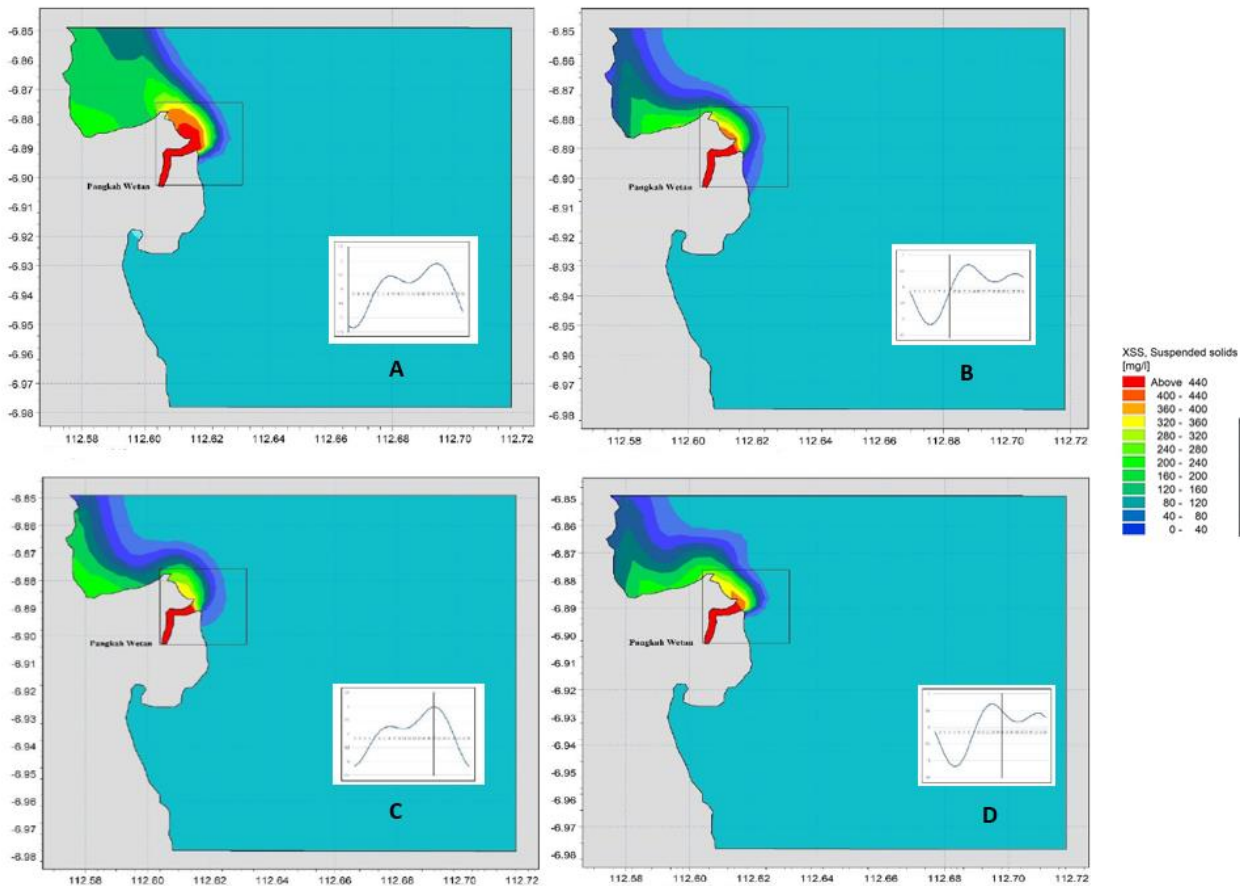
normal di suatu perairan adalah 80 mg/l untuk pelabuhan, 20 mg/l untuk wisata bahari dan 10 mg/l untuk biota air laut (KepMen LH No 51 Tahun 2004). Oleh karena itu, hasil pengukuran menunjukkan bahwa kandungan MPT di perairan estuari Ujung Pangkah telah melewati baku mutu.

Hasil simulasi model ECOLab menunjukkan adanya dinamika pola sebaran MPT pada kondisi pasang dan surut (Gambar 5). Pada saat kondisi surut terendah, hasil simulasi menunjukkan konsentrasi MPT yang tinggi (360 mg/l hingga >440 mg/l) tepat di mulut sungai dan menyebar ke bagian utara muara. Sementara itu, di bagian timur dan selatan muara, konsentrasi MPT relatif lebih rendah, berkisar antara 80 mg/l – 240 mg/l. Tingginya konsentrasi MPT pada kondisi surut terendah disebabkan oleh pergerakan arus air yang bergerak keluar muara sungai, sehingga perairan muara lebih dominan dipengaruhi oleh massa air sungai yang keruh. Pada saat kondisi surut menuju pasang, seiring dengan Bergeraknya arus air laut ke arah muara, terlihat bahwa massa air dengan konsentrasi MPT tinggi mulai terdorong masuk ke muara dan berlanjut hingga kondisi pasang tertinggi. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi MPT di mulut sungai dari >440 mg/l menjadi sekitar 360 mg/l. Selanjutnya pada kondisi pasang menuju surut seiring dengan arah arus yang mulai menjauhi muara sungai, nilai MPT berangsur naik kembali. Sementara itu, untuk bagian lain dari muara sungai Ujung Pangkah, yaitu di sebelah utara nilai MPT relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan pada

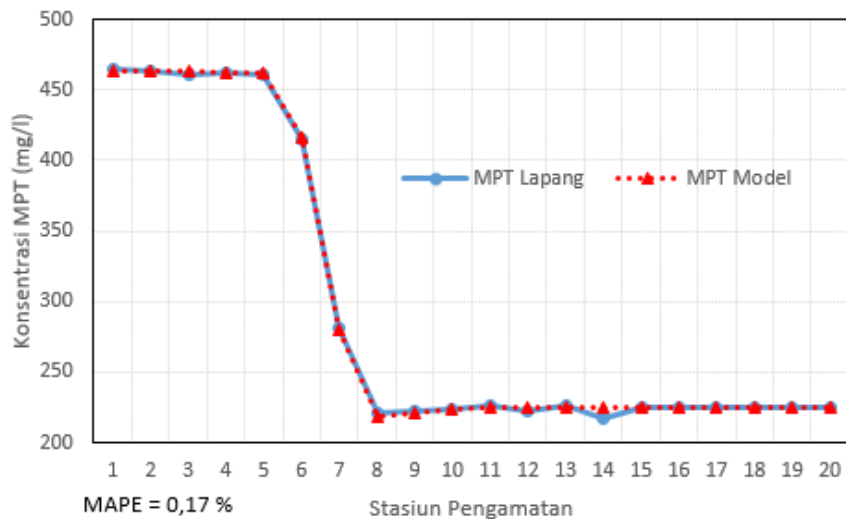
kondisi pasang dan surut yaitu berkisar antara 120–240 mg/l.

Pola yang dihasilkan dalam simulasi model ECOLab secara jelas menunjukkan pengaruh arus pasang surut terhadap sebaran MPT di muara sungai. Kandungan MPT yang tinggi di muara sungai ditimbulkan oleh pengaruh arus yang mengakibatkan terjadinya pengadukan di perairan dangkal. Pada perairan yang dangkal, pergerakan arus dan gelombang akan mengerosi substrat lunak di dasar perairan dan terbawa searah dengan arus. Hasil yang diperoleh pada simulasi ini tampaknya menjadi pola umum yang terjadi di muara sungai, hal tersebut terkonfirmasi melalui beberapa penelitian sebelumnya seperti misalnya di muara sungai Silugonggo Pati Jawa Tengah, muara sungai Porong Jawa Timur dan muara sungai Banyuasin Sumatera Selatan (Arvianto *et al.*, 2016; Damayanti & Hernawan, 2014; Simbolon *et al.*, 2015).

Perbandingan antara hasil pengukuran konsentrasi MPT di lapangan dengan hasil simulasi model ditunjukkan pada Gambar 6. Konsentrasi MPT berdasarkan hasil pengukuran di 20 titik pengamatan menunjukkan nilai yang cukup tinggi yaitu rata-rata $295,95 \pm 107,86$ mg/l, sementara hasil simulasi model menunjukkan nilai konsentrasi MPT rata-rata $296,46 \pm 107,82$ mg/l. Selanjutnya diperoleh nilai MAPE sebesar 0,59 % yang menunjukkan bahwa hasil simulasi model sangat baik untuk menggambarkan sebaran MPT di lokasi penelitian (MAPE < 20%). Hasil simulasi berikutnya menunjukkan terjadinya fluktuasi konsentrasi MPT pada saat kondisi pasang surut seperti yang disajikan pada Gambar 7.



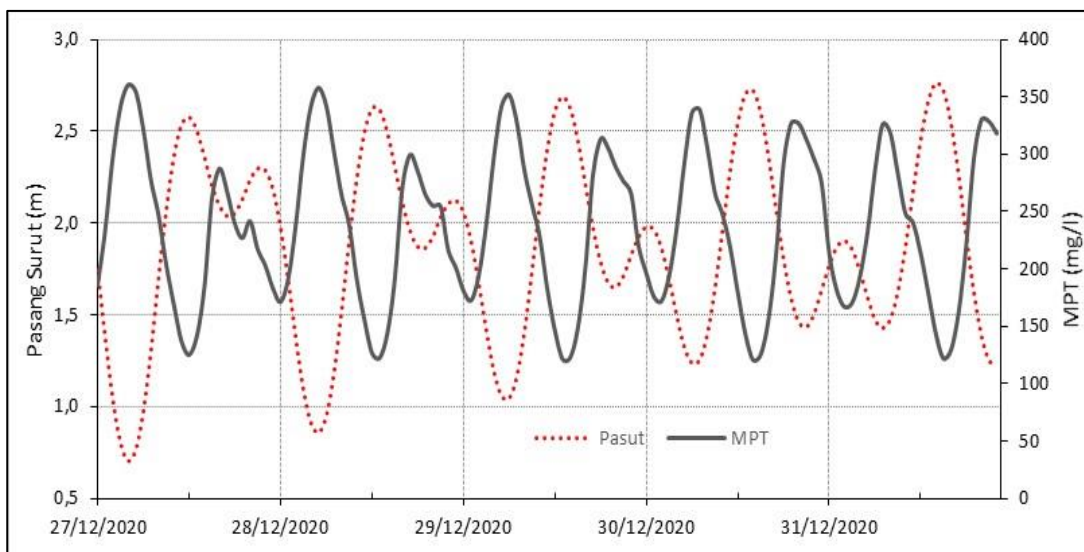
Gambar 5. Hasil Simulasi Pola Sebaran MPT (mg/l) pada Kondisi (a) Surut Terendah; (b) Surut Menuju Pasang; (c) Pasang Tertinggi; (d) Pasang Menuju Surut



Gambar 6. Perbandingan Hasil Pengukuran MPT *In-Situ* dan Simulasi Model

Pola sebaran konsentrasi MPT yang ditampilkan pada gambar diatas menunjukkan bahwa nilai MPT yang tinggi umumnya terjadi pada saat kondisi perairan surut. Sedangkan pada

saat kondisi pasang, nilai konsentrasi MPT cenderung rendah. Hasil simulasi ini sesuai dengan pola yang ditemukan oleh beberapa penelitian lainnya di daerah perairan muara sungai Kesunean



Gambar 7. Konsentrasi MPT di Perairan Ujung Pangkah pada Kondisi Pasang dan Surut

Cirebon, Pulau Topang Provinsi Riau dan Selat Lombok (Gurning *et al.*, 2016; Jewlaika & Nurrachmi, 2014; Sinaga *et al.*, 2020). Nilai konsentrasi MPT yang tinggi pada saat surut dapat disebabkan oleh adanya arus yang cukup kencang dan mengaduk dasar perairan yang terjadi saat permukaan air turun. Hal tersebut dapat dijelaskan melalui simulasi model yang menunjukkan kecepatan arus pada saat surut atau surut menuju pasang lebih tinggi dibandingkan saat kondisi pasang. Akibatnya, substrat dasar perairan yang didominasi oleh partikel halus akan terangkat dan berada pada kolom perairan untuk waktu yang cukup lama sebelum kembali mengendap.

Sebaran kondisi MPT berkaitan erat dengan kondisi beberapa parameter kualitas air lainnya seperti kekeruhan dan kecerahan. Konsentrasi MPT yang tinggi akan membuat kondisi perairan menjadi keruh dan menyebabkan kecerahan perairan menjadi rendah. Kondisi ini umum ditemukan di perairan muara sungai ataupun perairan dengan dominasi substrat yang berlumpur. Perairan keruh dengan MPT yang tinggi kurang ideal untuk dijadikan sebagai lokasi penangkapan ikan atau budidaya perikanan. Namun kekeruhan perairan yang tinggi tidak bisa langsung digunakan sebagai indikator bahwa perairan tersebut mengalami pencemaran. Hal ini karena sebagian besar partikel tersuspensi diakibatkan oleh proses pengadukan substrat dasar oleh arus dan gelombang. Oleh karena itu, pada perairan alami bahan-bahan tersuspensi tidak bersifat toksik,

namun bila terdapat dalam konsentrasi yang berlebihan maka akan menghambat proses alami yang terjadi di perairan. Tingginya material yang tersuspensi di kolom perairan akan menghambat daya penetrasi cahaya matahari ke dalam perairan. Hal ini berpengaruh signifikan terhadap kemampuan fitoplankton untuk melakukan fotosintesis. Oleh karena itu, perairan dengan kekeruhan yang tinggi cenderung memiliki produktivitas primer yang rendah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi model hidrodinamika dapat disimpulkan bahwa pergerakan arus dan sebaran MPT yang terjadi di perairan estuari Ujung Pangkah sangat dipengaruhi oleh pasang surut. Kecepatan arus tertinggi terjadi pada saat kondisi surut dan surut menuju pasang dengan kecepatan berkisar antara 0,12 m/s hingga 0,38 m/s. Massa air bergerak menjauhi muara sungai ke arah utara dan timur laut pada saat surut, dan sebaliknya pada saat pasang arah arus menuju dan masuk ke muara sungai dari arah tenggara dan barat laut. Model hidrodinamika yang diperoleh untuk menjelaskan pergerakan arus dan MPT cukup baik dengan MAPE untuk kecepatan arus = 43,18% dan MAPE untuk MPT = 0,59%. Konsentrasi MPT yang tinggi (>400 mg/l) terjadi pada saat kondisi perairan surut atau surut menuju pasang. Tingginya nilai MPT menyebabkan perairan Ujung Pangkah memiliki kekeruhan tinggi dan tingkat kecerahan perairan yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adibhusana, M.N., Hendrawan, I.G., & Karang, I.W.G.A. 2016. Model Hidrodinamika Pasang Surut di Perairan Pesisir Barat Kabupaten Badung, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 2(2):54-59. doi: 10.24843/jmas.2016.v2.i02.54-59
- Amirullah, A.N., Sugianto, D.N., & Indrayanti, E. 2014. Kajian Pola Arus Laut Dengan Pendekatan Model Hidrodinamika Dua Dimensi Untuk Pengembangan Pelabuhan Kota Tegal. *Journal of Oceanography*, 3(4):671–682.
- Anggraini, N., Marpaung, S., & Hartuti, M. 2017. Ujung Pangkah Shoreline Change Analysis Using Edge Detection Method and Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing and Digital Image Processing Journal*, 14(2):65–78.
- Arvianto, S.E., Satriadi, A., & Handoyo, G. 2016. Pengaruh Arus terhadap Sebaran Sedimen Tersuspensi di Muara Sungai Silugonggo Kabupaten Pati. *Jurnal Oseanografi*, 5(1), 116–125.
- Baharuddin, Hamzah, A., & Paharuddin. 2017. Pemodelan Simulasi Arus Pasang Surut Di Laut Flores. *Jurnal Oseanografi*, 3(1):177–188.
- Banjarnahor, B., Atmodjo, W., & Hariyadi. 2016. Sebaran Sedimen Tersuspensi Di Perairan Muara Sungai Bengawan Solo, Gresik, Jawa Timur. *Journal of Oceanography*, 5(4):554–562.
- Budi, W., & Pamungkas, A. 2017. Perbandingan Karakteristik Oseanografi Pesisir Utara. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan Dan Perikanan, September*, p.191–202.
- Budiman, A.S., Koropitan, A.F., & Nurjaya, I.W. 2014. Pemodelan Hidrodinamika Arus Pasang Surut Teluk Mayalibit Kabupaten Raja Ampat Provinsi Papua Barat. *Depik*, 3(2):146-156 doi: 10.13170/depik.3.2.1536
- Chen, R.J.C., Blommfield, P & Fu, J.S. 2003. An Evaluation of Alternative Forecasting Methods to Recreation Visitation. *Journal of Leisure Research*, 35(4):441-454.
- Damayanti, H.O., & Hernawan, U. 2014. Pola Penyebaran Sedimen Tersuspensi Berdasarkan Analisis Debit Maksimum Dan Minimum di Muara Sungai Porong, Kabupaten Pasuruan. *Widyariset*, 17(2):291–302.
- Fathur, M., Yona, D., & Hikmah, S. 2019. Health Risk Assesments of Heavy Metals of Perna Viridis from Banyuurip Waters in Ujung Pangkah Gresik. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 3(2):135–143.
- Gurning, R.H., Rochaddi, B. & Widada, S. 2016. Pengaruh Arus terhadap Muatan Padat Tersuspensi di Muara Sungai Kesunean Cirebon. *Jurnal Oseanografi*, 5:512–521.
- Hidayah, Z., Romadhon, A., & Witjarnoko, Y. 2019. Penilaian Kerentanan Wilayah Pesisir Selatan Pulau Bawean terhadap Kenaikan Muka Air Laut. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 20(2):87-94. doi: 10.22146/jfs.36109
- Ichsan, M. N., Anesya, V., Nugroho, P., & Nugroho, H. 2017. Perencanaan Perlindungan Pantai Tanjung Nipah Kalimantan Tengah. *Karya Teknik Sipil*, 6(1):304–313.
- Jewlaika, Lady, & Nurrachmi, I. 2014. Studi Padatan Tersuspensi di Perairan Pulau Topang kabupaten Kepulauan Meranti Provinsi Riau. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 19(2):53–66.
- Kamat, Y.N., Kalangi, P.N.I., & Sompie, M.S. 2014. Pola arus permukaan saat surut di sekitar muara Sungai Malalayang, Teluk Manado. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Perikanan Tangkap*, 1(2):99–104. doi: 10.35800/jitpt.1.0.2014.6177
- Milasari, A., Ismunarti, D.H., Indrayanti, E., & Muldiyatno, F. 2021. Model Arus Permukaan Teluk Lampung pada Musim Peralihan II dengan Pendekatan Hidrodinamika. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3):259–268. doi: 10.14710/buloma.v10i3.38293
- Pamungkas, A. 2018. Karakteristik Parameter Oseanografi (Pasang-Surut, Arus dan Gelombang) di Perairan Utara dan Selatan Pulau Bangka. *Buletin Oseanografi Marina*, 7(1):51–58.
- Prasetyo, A., Santoso, N., & Prasetyo, L.B. 2017. Kerusakan Ekosistem Mangrove Di Kecamatan Ujung Pangkah Kabupaten Gresik Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Silviculture Tropika*, 8(2):130–133. doi: 10.29244/j-sil trop.8.2.130-133
- Simbolon, F., Surbakti, H., & Hartoni. 2015. Analisis Pola Sebaran Sedimen Tersuspensi Menggunakan Teknik Penginderaan Jauh Di Perairan Muara Sungai Banyuasin. *Maspari Journal*, 7(2):1–10.
- Sinaga, B.B., Suteja, Y., & Bagus, I.G.D.S. 2020. Fluktuasi Total Padatan Tersuspensi (Total Suspended Solid) dan Kekeruhan di Selat

- Lombok. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2):238–245.
- 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*, 1(1):30–38. doi: 10.33086/atcsj.v1i1.8
- Suharyo, O.S., & Hidayah, Z. 2019. Pemanfaatan Citra Satelit Resolusi Tinggi Untuk Identifikasi Perubahan Garis Pantai Pesisir Utara Surabaya. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 12(1):89-96. doi: 10.21107/jk.v12i1.5084
- Surbakti, H., Ulqodry, T.Z. & Sugihan, M. 2018. Karakteristik Massa Air dan Tipe Estuari di Perairan Muara Sugihan Provinsi Sumatera Selatan. *Maspari Journal*, 10(2): 169–178.
- Syafarina, R., Widodo, R., & Pertiwi, N.T.M. 2018. Struktur Komunitas Fitoplankton di Perairan Muara Sungai Bengawan Solo Ujung Pangkah Jawa Timur. *Biospecies*, 11(1):19–36.
- Tejakusuma, I.G. 2005. Geologi Lingkungan Estuaria. *Alami*, 10(3):35–39.