

Pelacakan Mundur Partikel Sampah Laut dengan Metode Euler-Lagrange di Pelabuhan Ratu

Ivonne Milichristi Radjawane^{1,2*}, Ilyas Nurfadhil Basuki^{3,4}, Gandhi Napitupulu^{1,5}

¹Kelompok Keahlian Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, ITB, Bandung, Indonesia

²Korea-Indonesia Marine Technology Cooperation Research Center, ITB, Cirebon, Indonesia

³Alumni Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, ITB, Bandung, Indonesia

⁴Sekolah Pascasarjana Sains dan Teknologi, Kumamoto University, Kumamoto, Jepang

⁵Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, ITB, Cirebon, Indonesia

e-mail: ivonnemr@itb.ac.id

Diajukan: 22 Agustus 2023, Diperbaiki: 11 Nopember 2023, Diterima: 17 Nopember 2023

Abstrak

Masalah yang sering dijumpai pada daerah pesisir adalah banyaknya sampah terapung. Salah satu Kawasan pesisir yang akan menjadi daerah kajian studi ini adalah daerah pariwisata Pelabuhan Ratu yang terletak di bagian Barat Daya pulau Jawa. Tujuan studi ini adalah untuk melakukan pelacakan mundur untuk mencari sumber sampah laut yang berada di Teluk Pelabuhan Ratu. Model hidrodinamika 2 dimensi horizontal digunakan untuk simulasi arus laut dan melacak masing-masing sampah laut sebagai partikel secara mundur terhadap waktu dengan metode Euler-Lagrange. Data input model berupa data batimetri, posisi sampah, kecepatan angin, dan elevasi pasang surut. Hasil trayektori (lintasan) menunjukkan kesesuaian antara hasil pelacakan maju dan pelacakan mundur di mana sebagian besar partikel yang dilacak mundur berakhir di posisi yang dekat dengan posisi awal pelacakan maju. Hasil simulasi juga menunjukkan kesesuaian dalam perpindahan partikel dengan perhitungan manual dan pola trayektori partikel yang berbentuk elips juga sesuai dengan teori arus pasang surut (pasut). Hasil pelacakan mundur partikel di dalam Teluk Pelabuhan Ratu menghasilkan trayektori yang sangat pendek akibat arus yang sangat kecil yang mengindikasikan sampah di dalam teluk berasal dari daerah pesisir teluk. Partikel yang bergerak ke arah timur akan diperpanjang trayektorinya pada musim barat dan pada musim timur, partikel yang bergerak ke arah barat diperpanjang trayektorinya.

Kata Kunci: Metode Euler-Lagrange, Model hidrodinamika dua dimensi, Pelacakan mundur partikel, Sampah laut

Abstract

The problem that is often found in coastal areas is the amount of floating garbage. One of the coastal areas that will be the study area of this study is the Pelabuhan Ratu tourism area located in the southwestern part of the island of Java. The purpose of this study is to conduct backward tracking to find the source of marine debris in Pelabuhan Ratu Bay. A horizontal 2-dimensional hydrodynamics model is used to simulate ocean currents and track individual marine debris as particles backward in time using the Euler-Lagrange method. Model input data included bathymetry, debris position, wind speed and tidal elevation. The trajectory results showed agreement between the forward tracking and backward tracking results where most of the backward tracked particles ended up in positions close to the forward tracking starting position. The simulation results also show agreement in particle displacement with manual calculations and the elliptical pattern of particle trajectories is also consistent with tidal current theory. The results of backward tracking of particles in Pelabuhan Ratu Bay produce very short trajectories due to very small currents which indicate that the garbage in the bay comes from the coastal area of the bay. Particles moving

eastward will have their trajectory extended in the west season and in the east season, particles moving westward have their trajectory extended.

Keywords: Euler-Lagrange method, Marine debris, Particle backward tracking, Two dimensional hydrodynamics model

1 Pendahuluan

Masalah yang bisa ditinjau dengan pelacakan mundur adalah masalah sampah. Sampah laut, yang disebut juga marine debris, merupakan masalah yang dialami banyak daerah di Indonesia, seperti di Kuta, Bali [1] dan Teluk Ambon [2]. Indonesia sendiri merupakan penyumbang sampah plastik terbesar kedua di dunia, dengan Cina di peringkat pertama [3]. Dampak sampah laut tidak hanya terbatas pada air yang kotor dan tidak layak untuk berenang. Adanya sampah laut di suatu tempat bisa merusak lingkungan secara perlahan, baik dengan mengurangi kualitas air sehingga hewan tidak dapat hidup di air tersebut dan terpaksa mencari tempat hidup lain, maupun dengan merusak tanaman yang merupakan sumber oksigen dan habitat bagi beberapa hewan [4]. Kumpulan sampah laut yang terlalu banyak juga dapat membunuh hewan karena racun yang ada di bahan seperti plastik.

Salah satu tempat yang memiliki masalah sampah, yang ingin ditinjau dalam studi ini, adalah Perairan Pelabuhan Ratu di Jawa Barat. Pelabuhan Ratu merupakan tempat wisata yang cukup terkenal dan sering dikunjungi. Namun, Pelabuhan Ratu menghadapi masalah sampah yang cukup memprihatinkan. Sepanjang garis pantai Pelabuhan Ratu, ditemukan sampah seperti bekas pepohonan, botol bekas, plastik sisa makanan, dan sampah lainnya [5].

Dalam pergerakan sebuah partikel sampah, akan terbentuk sebuah jalur yang dilewatinya. Sehingga, kita bisa melacak pergerakan dan asal dari partikel sampah. Pelacakan pergerakan partikel sampah dengan sumber yang telah diketahui posisinya menggunakan metode numerik telah dilakukan di Perairan Pelabuhan Ratu [6]. Sedangkan pelacakan asal sumber sampah di Pelabuhan Ratu belum pernah dilakukan. Salah satu cara untuk melacak kemungkinan daerah sumber adalah dengan menggunakan *backwards trajectory*, yaitu pelacakan mundur. Dengan pelacakan mundur, kita bisa memilih partikel di suatu ruang pada waktu tertentu dan mencari asalnya [7]. Pelacakan mundur dapat diaplikasikan untuk berbagai hal dan dalam berbagai bidang, contohnya adalah pencarian solusi aliran viskoelastik [8], simulasi pergerakan air tanah [9], dan interpretasi bahan atmosfer [10].

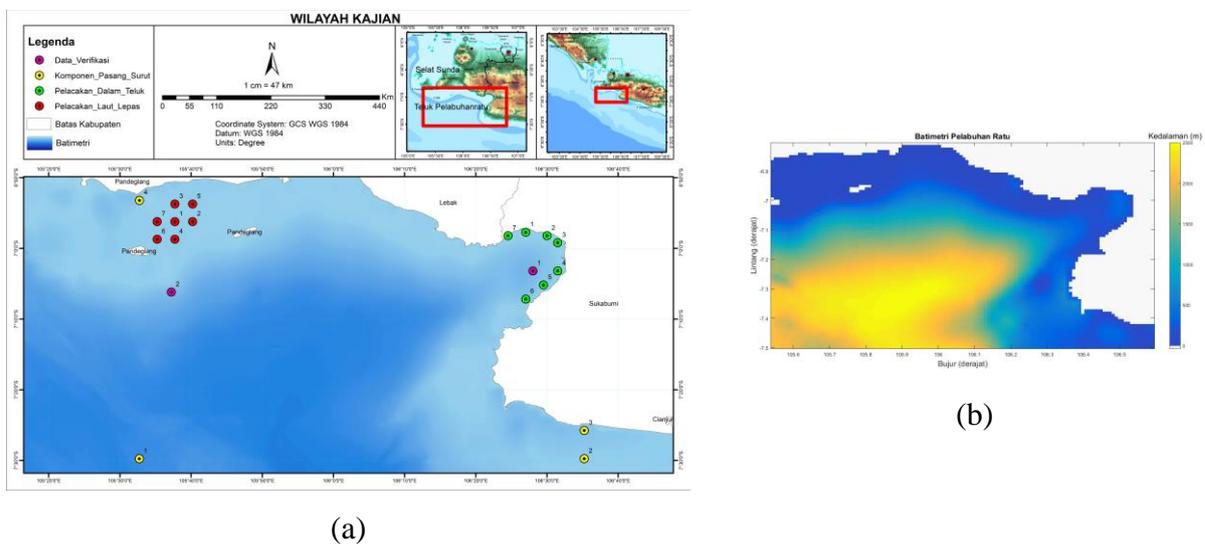
Dalam pelacakan mundur, ada banyak metode yang dapat digunakan, seperti persamaan Kolmogorov [11], Eulerian dan Lagrangian, *streamline* mundur, estimasi posisi partikel, dan pendekatan Bayesian [12]. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda. Dalam penelitian ini, yang digunakan adalah metode Lagrange untuk pelacakan partikel

serta metode Euler untuk perhitungan hidrodinamika. Metode Lagrange dipilih untuk pelacakan partikel karena masing-masing partikel akan diikuti dan dicatat pergerakannya, sesuai dengan prinsip Lagrange yang meninjau pergerakan suatu partikel tanpa memperhitungkan sekitarnya. Sedangkan medan arus dihitung dengan metode Euler karena prinsip dari perubahan kecepatan arus dan elevasi adalah perubahan terhadap ruang dan waktu yang terjadi dalam suatu kontrol volume [13]. Sehingga, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan pergerakan sampah di Pelabuhan Ratu dan mencari sumber sampah tersebut. Simulasi menggunakan model hidrodinamika 2 dimensi dengan metode Euler-Lagrange. Sampah yang akan dimodelkan dalam penelitian ini adalah sampah laut yang mengapung di Pelabuhan Ratu.

2 Metode Penelitian

2.1 Daerah Kajian

Daerah kajian pada penelitian ini adalah perairan Pelabuhan Ratu, terutama teluknya dan perairan di sekitarnya yaitu perairan Samudera Hindia, yang bisa dilihat dari Gambar 1a. Gambar 1b memperlihatkan batimetri perairan. Daerah ini dipilih karena adanya masalah sampah yang bisa ditinjau dengan cara melacak mundur sampahnya. Teluk Pelabuhan Ratu terletak pada $6^{\circ} 57'$ sampai $7^{\circ} 7'$ LS dan $106^{\circ} 23'$ sampai $106^{\circ} 32'$ BT.



Gambar 1. (a) Daerah kajian dan (b) input batimetri model pada Teluk Pelabuhan Ratu

Pelabuhan Ratu terletak di pulau Jawa sebelah Barat Daya dan pola arusnya paling dipengaruhi oleh adanya pasang surut. Saat pasang, arus bergerak ke arah teluk dan saat surut, arus bergerak ke arah laut lepas. Kondisi pasang surut di Pelabuhan Ratu merupakan perambatan dari pengaruh pasut di Samudera Indonesia karena berhubungan langsung dengan perairan Samudera Hindia [14].

2.2 Model

Model yang akan digunakan adalah model pelacakan mundur yang dibuat dengan bahasa pemrograman Fortran yang menghitung kondisi hidrodinamika dengan persamaan Navier-Stokes lalu melacak mundur partikel [7]. Pelacakan mundur menggunakan metode yang terinspirasi oleh *Backward Particle Tracking Algorithm* yang dikembangkan oleh Nahum dan Seifert (2006) [7].

Persamaan yang digunakan untuk menghitung posisi sebuah partikel secara mundur [7] adalah

$$x^{n+1} = x^n - V(x^{n+1}, t^{n+1}) dt_n \quad (1)$$

dengan x menunjukkan posisi, V menunjukkan kecepatan total, dan dt merupakan interval waktu.

Posisi partikel diestimasi dengan persamaan

$$(x^{n+1})^* = x^n - V(x^{n+1}, t^{n+1}) dt_i \quad (2)$$

dengan $*$ menunjukkan estimasi posisi partikel sebelumnya.

Pada metode *Backward Particle Tracking Algorithm*, setelah mendapatkan estimasi posisi, dilakukan korelasi dengan cara membuat *mesh* (jaring) interpolasi di sekitar posisi estimasi, serta dua matriks yang tujuannya mencari nilai korelasi terbesar antara nilai vektor kecepatan di *mesh* interpolasi dengan nilai vektor kecepatan bayangan yang merupakan kecepatan yang diperlukan partikel untuk mencapai posisi sebelumnya [15], [16].

Pelacakan mundur partikel yang mirip dengan *Backward Particle Tracking Algorithm* menggunakan Fortran. Seperti *Backward Particle Tracking Algorithm*, dibuat *mesh* interpolasi yang menginterpolasi vektor kecepatan di setiap grid. Namun, tidak dibuat dua matriks baru, melainkan menghitung langsung setiap estimasi posisi partikel berdasarkan nilai kecepatan yang diinterpolasi. Estimasi posisi yang paling mendekati posisi awal yang diketahui akan digunakan sebagai posisi partikel sebelumnya, yaitu posisi partikel selanjutnya dalam model karena model berjalan mundur.

Model pelacakan mundur juga diverifikasi dengan membandingkannya dengan model pelacakan maju. Pelacakan dengan cara maju hanya dapat dilakukan apabila medan aliran Euler sudah memiliki nilai untuk setiap ruang pada setiap waktu [7]. Untuk melacak partikel dalam aliran, digunakan persamaan (3a) dengan kondisi awal (3b) [7], yaitu:

$$x(t) = V(x(t), t) \quad (3a)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (3b)$$

dengan $x(t)$ adalah vektor posisi partikel (m) sebagai fungsi waktu, dan $V(x(t), t)$ adalah medan aliran Euler (m/det). Persamaan di atas dapat diintegrasikan dalam waktu untuk mendapatkan solusi, yaitu

$$x(t_e) = \int_{t_0}^{t_e} V(x(t))dt + x(t_0) \quad (4)$$

di mana t_0 adalah waktu awal (detik) dan t_e adalah waktu sekarang. Persamaan 4 dapat diselesaikan secara numerik, dengan metode eksplisit Euler sebagai berikut

$$x_{k+1} = x_k + V(x_k, t_k)dt_i \quad (5)$$

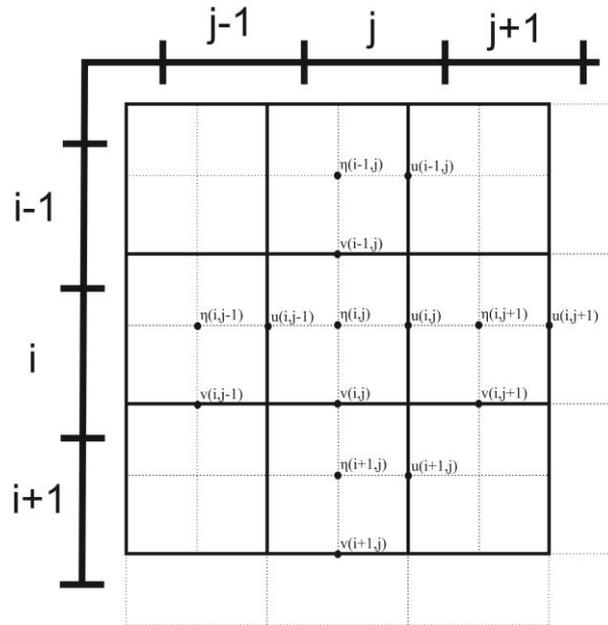
dengan k adalah langkah waktu pada waktu t_k .

Dilakukan tiga langkah untuk mendapatkan algoritma pelacakan, yaitu penentuan interval waktu, interpolasi kecepatan partikel terhadap ruang dan waktu, dan perhitungan perpindahan partikel. Untuk menentukan interval waktu, diperlukan interval yang cukup kecil sehingga medan aliran tidak berubah secara signifikan di antara dua waktu. Partikel juga tidak boleh berpindah ruang melewati gradien kecepatan yang besar. Dengan penentuan interval waktu yang baik, tidak akan ada perbedaan matematis antara aliran laminar dan turbulen karena aliran turbulen akan menyerupai aliran laminar secara lokal. Pada model menggunakan Fortran, interval waktu ditentukan dari awal dan dianggap konstan untuk semua langkah waktu.

Kecepatan partikel diinterpolasi dalam ruang dan waktu dari medan aliran Euler. Metode interpolasi bisa linear, kotak, atau metode lainnya. Interpolasi linear membuat titik data baru di antara set titik data yang sudah diketahui [17], [18]. Interpolasi kotak membuat kurva yang paling mendekati titik data dengan jumlah yang banyak.

Perpindahan partikel dari kecepatan yang sudah diinterpolasi dihitung dengan menggunakan persamaan 5. Setelah mendapatkan posisi baru untuk partikel, algoritma diulang dari awal untuk langkah waktu berikutnya dengan posisi baru sebagai posisi awal.

Model hidrodinamika menggunakan koordinat kartesian dan *staggered grid*, yaitu grid di mana nilai skalar seperti kedalaman dan elevasi berada di titik yang berbeda dengan nilai vektor seperti kecepatan sumbu x dan kecepatan sumbu y . Bisa dikatakan bahwa nilai skalar dan masing-masing nilai vektor memiliki grid sendiri yang berbeda dengan grid untuk nilai lainnya. Tujuan menggunakan *staggered grid* adalah untuk mengurangi masalah pada grid *unstaggered* seperti perhitungan nilai suatu variabel berdasarkan nilai variabel di grid yang tidak bersebelahan namun berselang-seling [19]. Jenis *staggered grid* yang digunakan di model ini adalah grid Arakawa- C.



Gambar 2. Arakawa-C Staggered grid [20]

Persamaan hidrodinamika yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes untuk fluida yang inkompresibel (tak-termampatkan) menggunakan Fortran. Fluida di model ini dianggap inkompresibel karena air laut secara umum memiliki gradien tekanan yang tidak terlalu besar, apalagi di lapisan paling atas seperti yang ingin dimodelkan, sehingga dianggap densitas fluida konstan dan tidak akan berubah walaupun ada tekanan yang bekerja padanya.

Pada model ini, faktor penyebab arus yang diperhitungkan adalah adveksi, gradien tekanan, gaya gesek angin dan dasar, gaya Coriolis, dan difusi momentum [21]. Dengan memperhitungkan faktor-faktor tersebut, persamaan momentum 2 dimensi untuk masing-masing sumbu yang digunakan adalah

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x} + A_H \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) + \frac{\delta \tau_{zx}}{\delta z} \quad (6)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y} + A_H \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau_{zy}}{\delta z} \quad (7)$$

dan persamaan kontinuitas

$$\frac{\delta \eta}{\delta t} + \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta V}{\delta y} = 0 \quad (8)$$

dengan u dan v adalah kecepatan arus pada sumbu x dan sumbu y (m/det), U dan V adalah transpor total pada sumbu x dan y (m²/det), f adalah parameter Coriolis (det⁻¹), P adalah tekanan hidrostatik (Pa), ρ adalah densitas air (kg/m³), A_H adalah koefisien *Eddy viscosity* lateral (m²/det), r_{zx} dan r_{zy} adalah stres pada arah sumbu x dan y (m²/det²), η adalah elevasi muka air laut (m).

2.3 Diskritisasi

Diskritisasi adalah pengubahan fungsi kontinu menjadi diskrit agar lebih mudah digunakan dalam perhitungan numerik. Misalkan sebuah fungsi yang berubah secara kontinu terhadap perubahan x . Untuk mendiskritisasi fungsi ini, ditentukan perubahan x yang cukup kecil sehingga perubahan fungsi yang konstan antara kedua nilai x bisa diasumsi sama dengan perubahan kontinu yang terjadi. Diskritisasi juga dalam bentuk dari deret Taylor sebagai berikut

$$\frac{\delta f(x)}{\delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (9)$$

Diskritisasi juga bisa dilihat dari deret Taylor, yang memiliki persamaan

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \sum_{n=1}^N \frac{\delta^n f(x)}{\delta x^n} \frac{\Delta x^n}{n!} \quad (10)$$

Hasil diskritisasi untuk persamaan momentum dan persamaan kontinuitas adalah

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} = & \left(u_{i,j}^n - g * \frac{\Delta t}{\Delta x} * (\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j}^n) - (u_{i,j}^n) * \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n) - (v^*) * \frac{\Delta t}{\Delta y} * \right. \\ & \left. (u_{i+1/2,j}^n - u_{i-1/2,j}^n) + \Delta t * A_H * \left(\frac{u_{i,j+1}^n - 2 * u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i+1,j}^n - 2 * u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta y^2} \right) + \Delta t * f * \right. \\ & \left. v^* + \frac{\Delta t * \rho_{udara} * C_D * w_x * \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho * H} \right) * \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta t * r * \sqrt{(u_{i,j}^n)^2 + (v^*)^2}}{H}} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{i,j}^{n+1} = & \left(v_{i,j}^n - g * \frac{\Delta t}{\Delta y} * (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i,j}^n) - (u^*) * \frac{\Delta t}{\Delta x} * (v_{i,j+1/2}^n - v_{i,j-1/2}^n) - (v_{i,j}^n) * \frac{\Delta t}{\Delta y} * \right. \\ & \left. (v_{i+1/2,j}^n - v_{i-1/2,j}^n) + \Delta t * A_H * \left(\frac{v_{i,j+1}^n - 2 * v_{i,j}^n + v_{i,j-1}^n}{\Delta x^2} + \frac{v_{i+1,j}^n - 2 * v_{i,j}^n + v_{i-1,j}^n}{\Delta y^2} \right) - \Delta t * f * \right. \\ & \left. u^* + \frac{\Delta t * \rho_{udara} * C_D * w_y * \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho * H} \right) * \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta t * r * \sqrt{(u^*)^2 + (v_{i,j}^n)^2}}{H}} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i,j}^n - \Delta t * \left(\frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta x} + \frac{V_{i,j}^n - V_{i-1,j}^n}{\Delta y} \right) \quad (13)$$

dengan rumus tambahan

$$u^* = u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n + u_{i+1,j}^n + u_{i+1,j-1}^n \quad (14)$$

$$v^* = v_{i,j}^n + v_{i,j+1}^n + v_{i-1,j}^n + v_{i-1,j+1}^n \quad (15)$$

dengan ρ_u adalah densitas udara (kg/m^3), C_D adalah koefisien geser angin (tidak berdimensi), r adalah koefisien gesek dasar (tidak berdimensi), H adalah kedalaman total (m), w_x dan w_y adalah kecepatan angin pada sumbu x dan sumbu y (m/det), v^* adalah kecepatan sumbu y pada titik u_n (m/det), u^* adalah kecepatan sumbu x pada titik v_n (m/det).

2.4 Desain Model

Model dijalankan untuk mengetahui sumber asal sampah yang ada di pantai Pelabuhan Ratu, dengan melihat arus di perairan sekitar Pelabuhan Ratu yang dipengaruhi oleh angin dan pasang surut. Waktu simulasi utama adalah bulan Desember 2016, yang terjadi pada musim Barat. Waktu tersebut dipilih karena pada musim Barat, terjadi penumpukan sampah yang lebih banyak di pantai Pelabuhan Ratu. Pada 10 hari pertama simulasi, tidak dilakukan pelacakan karena waktu tersebut digunakan untuk menstabilkan model dan memastikan tidak terjadi *blowup* (meledak). Pelacakan baru dimulai pada hari ke-11. Simulasi juga dilakukan pada bulan Juli 2016 untuk melihat pengaruh angin Timur (musim Timur) terhadap pergerakan partikel, dengan panjang simulasi dan pelacakan yang sama.

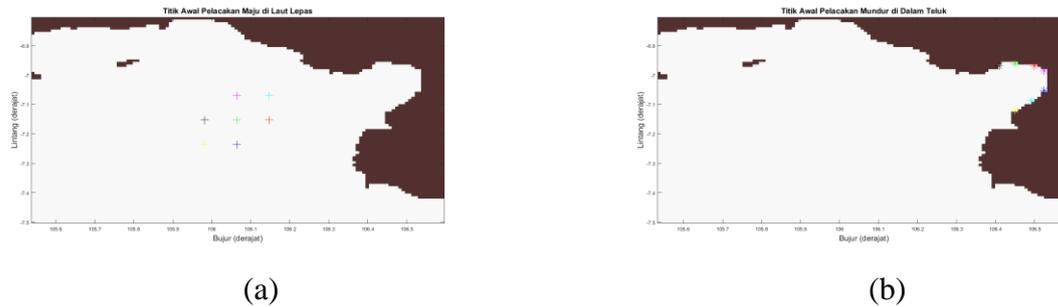
Output utama yang diharapkan dari model adalah trayektori mundur partikel yang titik mulainya di pantai Pelabuhan Ratu. Output lain yang dihasilkan adalah pola arus serta pola pasang surut yang dapat digunakan untuk verifikasi model. Interval dari grid yang digunakan sebesar 925 m dan interval waktu adalah 20 det. Interval waktu tersebut diambil dari syarat Courant-Friedrichs-Lewis (CFL) yang menyatakan bahwa interval waktu suatu simulasi harus kurang dari waktu yang diperlukan gelombang untuk melewati suatu grid di simulasi apabila ingin mendapatkan hasil yang bisa dianggap benar. Kondisi *CFL* bisa ditulis sebagai

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} + \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta y} \leq C_{maks} \quad (16)$$

dengan C_{maks} adalah nilai maksimum yang bisa diterima, dengan nilai sebesar 1. Kondisi ini dihitung untuk setiap grid pada setiap waktu untuk menentukan apakah nilai kecepatan dan elevasi pada grid dan waktu tersebut bisa diterima.

Ada lima skenario yang akan dilakukan dengan simulasi model. Skenario pertama adalah skenario sirkulasi arus di laut lepas yang tidak memperhitungkan pengaruh angin, hanya memperhitungkan pengaruh pasang surut. Skenario kedua dan ketiga tetap di laut lepas dan memperhitungkan angin pada saat musim Barat dan Timur. Skenario keempat menggunakan model trayektori atau model pelacakan mundur partikel di dalam teluk tanpa memperhitungkan angin. Skenario kelima melacak mundur partikel di dalam teluk dengan adanya angin musim Barat. Kelima skenario disimulasi selama satu bulan, dengan simulasi dengan angin Barat dan tanpa angin dilakukan pada bulan Desember 2016 dan simulasi dengan angin Timur dilakukan pada bulan Juli 2016. Pelacakan partikel dilakukan dari tanggal 11 Desember atau Juli sampai tanggal 31 untuk pelacakan maju dan dari tanggal 31 Desember atau Juli sampai tanggal 11 untuk pelacakan mundur. Pada 10 hari pertama untuk setiap simulasi, tidak dilakukan pelacakan karena waktu tersebut digunakan untuk menstabilkan model dan memastikan tidak ada *blowup* yang

terjadi. Titik awal partikel di laut lepas dan di dalam teluk ada pada Gambar 3 dan perbedaan antara keduanya dijelaskan pada Tabel 1.



Gambar 3. Posisi awal partikel pada skenario di (a) laut lepas dan (b) dalam teluk

Tabel 1. Perbedaan parameter pelacakan di laut lepas dengan dalam teluk.

Parameter	Pelacakan Laut Lepas	Pelacakan Dalam Teluk
Panjang domain (x)	116,550 m	116,550 m
Lebar domain (y)	76,775 m	76,775 m
Panjang interval grid	925 m	925 m
Lebar interval grid	925 m	925 m
Jumlah grid ($n_x \times n_y$)	126 x 83	126 x 83
Waktu simulasi	31 hari	31 hari
Waktu pelacakan	20 hari	20 hari
Interval waktu	20 det	20 det
Jumlah <i>time step</i>	263520	263520
Koordinat partikel 1	105°35'14" BT; 6°56'13" LS	106°24'32" BT; 6°58'13" LS
Koordinat partikel 2	105°37'44" BT; 6°56'13" LS	106°27'2" BT; 6°57'43" LS
Koordinat partikel 3	105°40'13" BT; 6°56'13" LS	106°30'1" BT; 6°58'13" LS
Koordinat partikel 4	105°37'44" BT; 6°53'44" LS	106°31'31" BT; 6°59'12" LS
Koordinat partikel 5	105°37'44" BT; 6°58'43" LS	106°31'31" BT; 7°3'11" LS
Koordinat partikel 6	105°40'13" BT; 6°53'44" LS	106°29'31" BT; 7°5'11" LS
Koordinat partikel 7	105°35'14" BT; 6°58'43" LS	106°27'2" BT; 7°7'11" LS
Waktu awal pelacakan bulan Desember	11 Desember 2016 00:00 (maju)	31 Desember 2016 00:00 (mundur)
Waktu awal pelacakan bulan Juli	11 Juli 2016 00:00 (maju)	-

Data batimetri untuk simulasi diambil dari GEBCO 30 det dan ditampilkan pada Gambar 1. Data yang diambil berupa nilai-nilai kedalaman yang masing-masing berada pada lintang dan bujur tertentu. Data GEBCO digunakan untuk kedua skenario. Karena simulasi model hanya pada pergerakan arus yang dipengaruhi angin di lapisan atas laut, nilai batimetri yang melebihi kedalaman Ekman diasumsi sama dengan nilai kedalaman Ekman untuk menghindari terbentuknya lapisan fluida yang terlalu besar yang bisa menyebabkan *blowup* pada model. Asumsi nilai kedalaman Ekman konstan, yaitu 100 m. Pada batimetri terlihat ada dua pulau kecil. Kedua pulau tersebut dianggap sama seperti darat dan diberi syarat batas yang sama.

Data pasang surut (pasut) untuk input model diambil dari TMD (*Tide Model Driver*) [22]. Nilai amplitudo dan fase dari komponen-komponen M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , P_1 , K_2 , dan Q_1 diambil untuk dimasukkan ke dalam model. Nilai komponen amplitudo diambil dari 4 titik yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 2. Koordinat data komponen pasang surut di daerah batas model

Titik	Lintang	Bujur
Pasut 1	6°53'13" LS	105°32'45" BT
Pasut 2	7°29'45" LS	105°32'44" BT
Pasut 3	7°29'45" LS	106°35'15" BT
Pasut 4	7°25'46" LS	106°35'15" BT

Data angin diambil dari situs apps.ecmwf.int. Data yang diambil berupa data kecepatan angin pada arah Utara-Selatan dan Barat-Timur untuk setiap hari pada pukul 00:00 dari 1 Desember 2016 sampai 31 Desember 2016 dan dari 1 Juli 2016 sampai 31 Juli 2016 dengan daerah kajian sama dengan daerah kajian model. Data angin dirata-ratakan secara spasial untuk mendapatkan satu nilai kecepatan rata-rata untuk setiap hari yang lalu dimasukkan ke model.

Ada dua syarat batas yang digunakan, yaitu syarat batas terbuka dan syarat batas tertutup. Syarat batas terbuka adalah syarat batas di mana gelombang dari model dapat keluar dari domain model tanpa mempengaruhi sifat model itu sendiri. Contoh syarat terbuka adalah batas model yang bertepatan dengan laut lepas. Sedangkan syarat batas tertutup adalah syarat di mana tidak ada pergerakan fluida melalui batas, sehingga dianggap kecepatan fluida sama dengan nol di batas. Contoh syarat batas tertutup adalah darat.

Pada model ini, syarat batas terbuka digunakan untuk menghitung nilai elevasi dan kecepatan di batas model. Data pasut digunakan untuk menghitung nilai elevasi di batas sedangkan nilai kecepatan di batas dihitung dengan cara *zero gradient* yaitu asumsi bahwa nilai kecepatan dekat batas tidak berubah terhadap ruang sehingga nilai kecepatan di batas disamakan dengan nilai kecepatan di grid sebelahnya. Misalkan sebuah syarat batas terbuka di sisi kanan dengan grid paling kanan dilambangkan dengan nx . Persamaan untuk kecepatan sumbu x dan sumbu y akan menjadi

$$u_{i,nx}^n = u_{i,nx-1}^n \quad (17a)$$

$$v_{i,nx}^n = v_{i,nx-1}^n \quad (17b)$$

Nilai awal kecepatan model ini diasumsikan sama dengan nol. Nilai kedalaman disamakan dengan nilai batimetri yang disesuaikan dengan kedalaman Ekman dan nilai elevasi pada batas disamakan dengan nilai elevasi pasut, sedangkan nilai elevasi di grid lainnya sama dengan nol.

2.5 Verifikasi Hasil Model

Sebuah model merupakan gambaran suatu fenomena yang terjadi di alam. Karena gambaran belum tentu sesuai dengan kenyataan, perlu dilakukan verifikasi untuk menentukan apakah model dapat dipercaya untuk menggambarkan kondisi sebenarnya. Untuk model ini, data yang diverifikasi adalah nilai pasut. Data pasut dari model dibandingkan dengan nilai pasut dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang merupakan data prediksi pasang surut yang diperoleh dari situs <http://tides.big.co.id>. Perbandingan yang dilakukan adalah perhitungan nilai *RMSE* (*Root Mean Squared Error*) dan (R^2) *R-Squared* dari kedua set data di suatu titik tertentu, serta mencari nilai residu antara kedua set data. Verifikasi pasut dilakukan pada dua titik tertentu, satu di laut lepas dan satu di dalam teluk. Rincian data verifikasi ada pada Tabel 3 dan Gambar 1. Selain itu, juga dilakukan perbandingan perhitungan di model dan perhitungan manual serta perbandingan trayektori partikel untuk satu hari dengan teori pergerakan partikel akibat arus pasut.

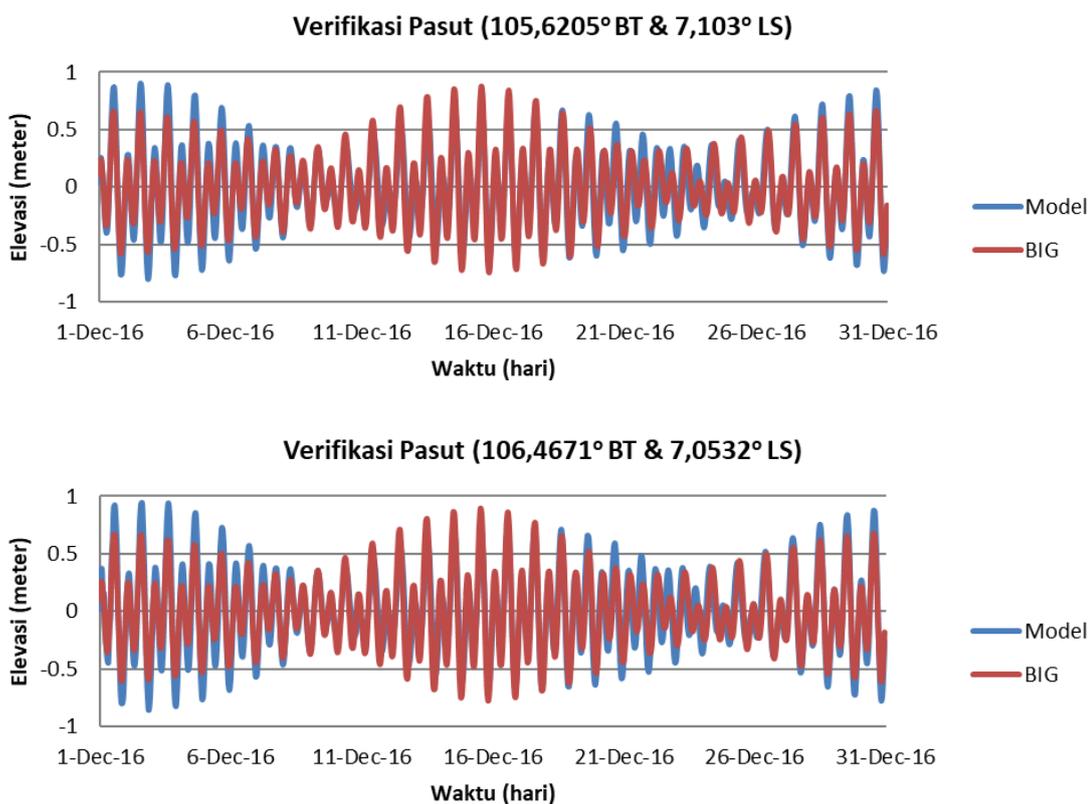
Tabel 3. Rincian data verifikasi

Parameter	Titik 1	Titik 2
Koordinat	105°37'13,8" BT; 7°6'10,8" LS	106°28'1,56" BT; 7°3'11,52" LS
Waktu verifikasi	1-30 Desember 2016	1-30 Desember 2016
Interval waktu	60 menit	60 menit

3 Hasil dan Pembahasan

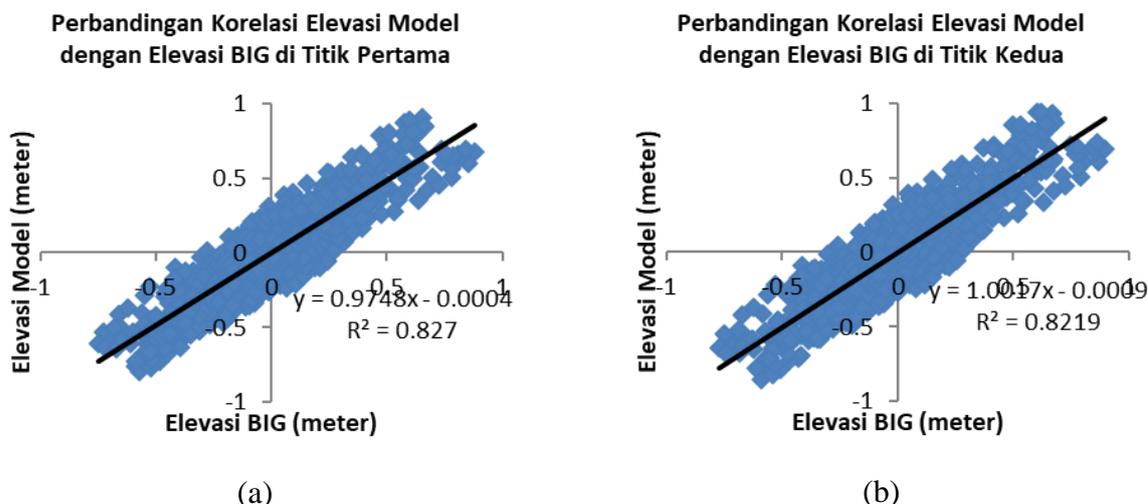
3.1 Verifikasi Hasil Model

Verifikasi untuk pasang surut dilakukan dengan membandingkan elevasi muka air laut dari model dengan prediksi pasut yang dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada bulan Desember 2016. Verifikasi dilakukan di dua titik (Gambar 4). Hasil elevasi model memiliki pola yang sama dengan nilai elevasi dari BIG, namun besar elevasinya berbeda. Pasang purnama pada model terjadi pada tanggal 2 Desember untuk kedua titik namun pada nilai elevasi BIG terjadi pada 15 Desember 2016. Untuk pasang perbani terjadi hal yang serupa, dengan pasang perbani terjadi di model pada tanggal 9 Desember 2016 namun terjadi pada nilai BIG pada tanggal 22 Desember 2016.



Gambar 4. Perbandingan elevasi model dengan elevasi BIG titik pertama (atas) dan kedua (bawah)

Nilai R^2 (Gambar 5) dan $RMSE$ untuk kedua titik hampir sama, dengan titik pertama memiliki nilai R^2 sebesar 0,83 dan $RMSE$ sebesar 0,14 m dan titik kedua memiliki nilai R^2 sebesar 0,82 dan $RMSE$ sebesar 0,15 m. Nilai R^2 untuk kedua titik bisa dinilai cukup bagus karena mendekati 1 sedangkan $RMSE$ cukup kecil.



Gambar 5. Grafik R^2 untuk titik verifikasi (a) pertama (b) kedua.

Verifikasi berikutnya adalah perbandingan perpindahan partikel dalam model dan perpindahan partikel yang dihitung secara manual dengan menggunakan kecepatan rata-rata arus.

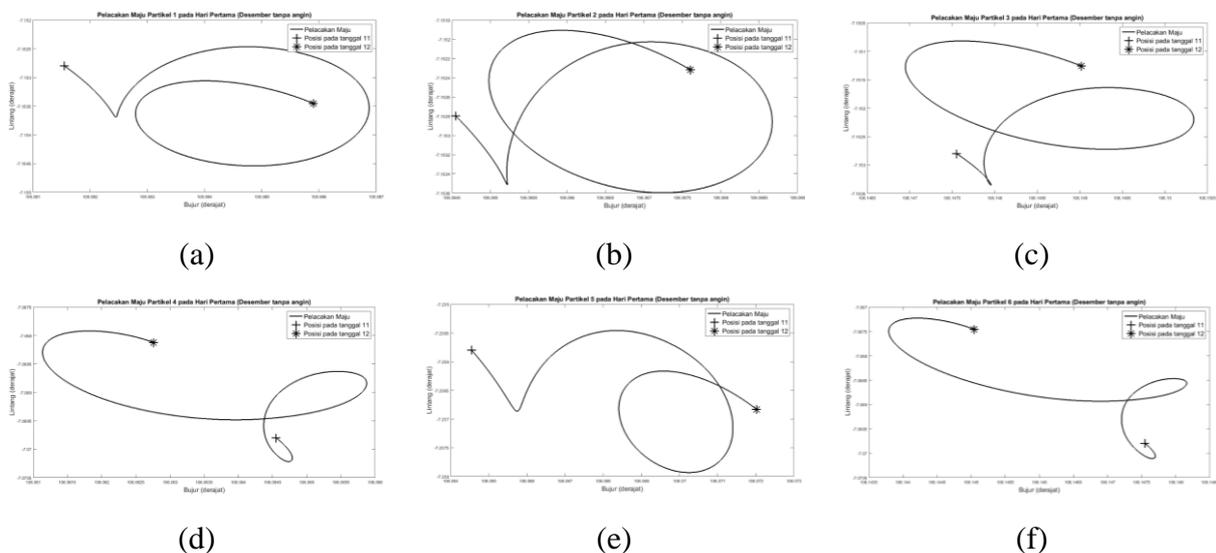
Partikel yang ditinjau adalah partikel 1 pada kondisi ada angin Barat. Perbandingan kedua hasil ada di Tabel 4 berikut ini.

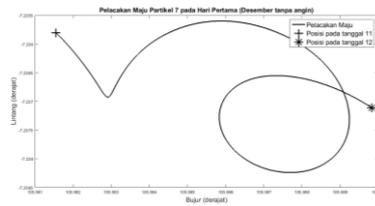
Tabel 4. Perbandingan hasil simulasi dengan perhitungan manual.

Waktu (jam) 1 Desember 2016 (GMT+7)	Perpindahan (m)		Selisih Perpindahan (m)	Selisih Perpindahan (%)
	Program	Manual		
0:00	0,82	1,16	0,35	43
6:00	199,75	419,53	219,77	110
12:00	686,07	838,66	152,60	22
18:00	1175,53	1257,80	82,27	7
23:59	1642,34	1676,55	34,21	2

Dilihat dari tabel, pada awal skenario perbedaan antara program dengan perhitungan manual masih cukup besar namun setelah satu hari sudah hampir mendekati, dengan selisih antar hasil program dan perhitungan manual hanya 2% dari hasil program. Hal ini menunjukkan konvergensi nilai setelah satu hari yang berarti hasil dari program bisa dikatakan sesuai dengan perhitungan langsung.

Verifikasi terakhir adalah pergerakan partikel yang hanya dipengaruhi oleh pasut yang dilepaskan di tengah laut lepas. Pasut bersifat periodik sehingga secara teori partikel yang hanya dipengaruhi oleh pasut akan menghasilkan trayektori yang berbentuk lingkaran atau elips. Hasil trayektori untuk masing-masing partikel pada hari pelacakan pertama dapat dilihat pada Gambar 6. Dari ketujuh hasil tersebut, terlihat bahwa semuanya memiliki trayektori yang berbentuk melingkar pada hari pertama. Ini sesuai dengan teori pergerakan partikel yang hanya dipengaruhi oleh arus pasut.



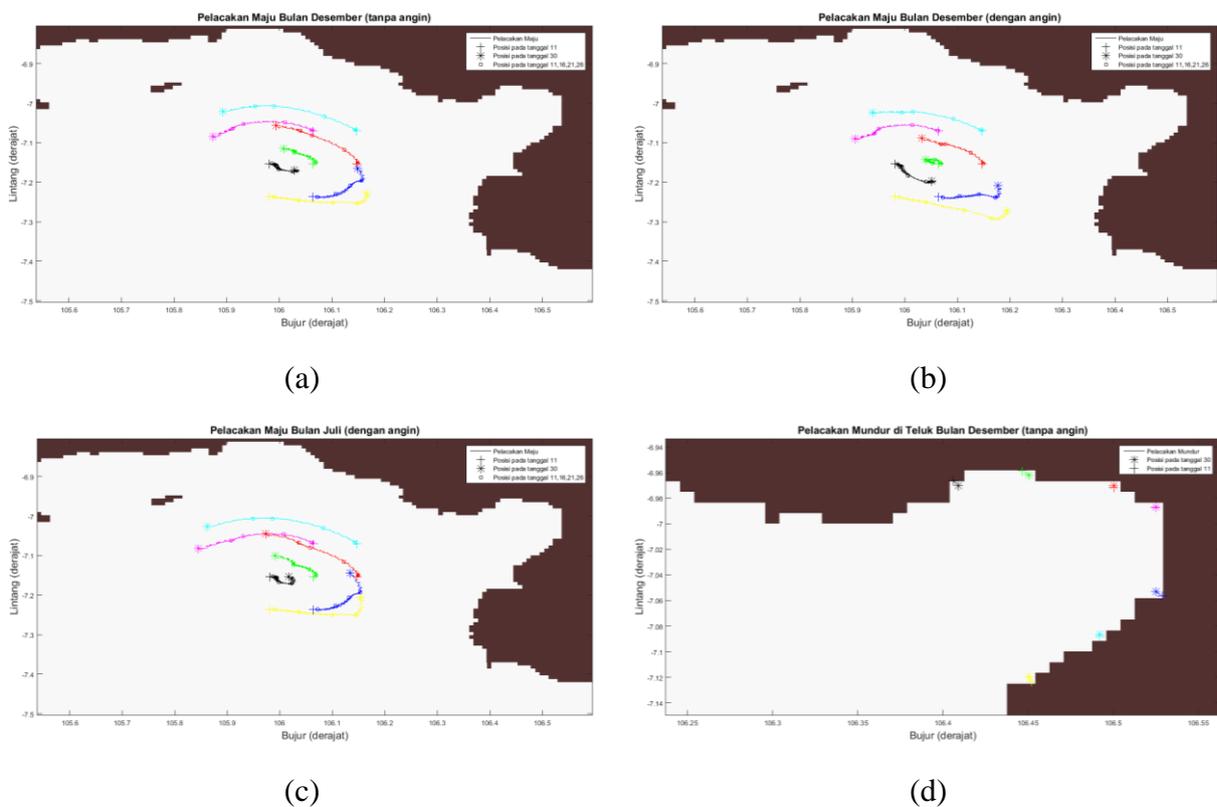


(g)

Gambar 6. Pergerakan partikel 1 hingga 7 (gambar a sampai g) pada hari pertama simulasi (1 Desember 2016), tanpa input dari angin (skenario 1). Setiap partikel menunjukkan pola berbalik arah, yang sesuai dengan pola harmonik pasang surut.

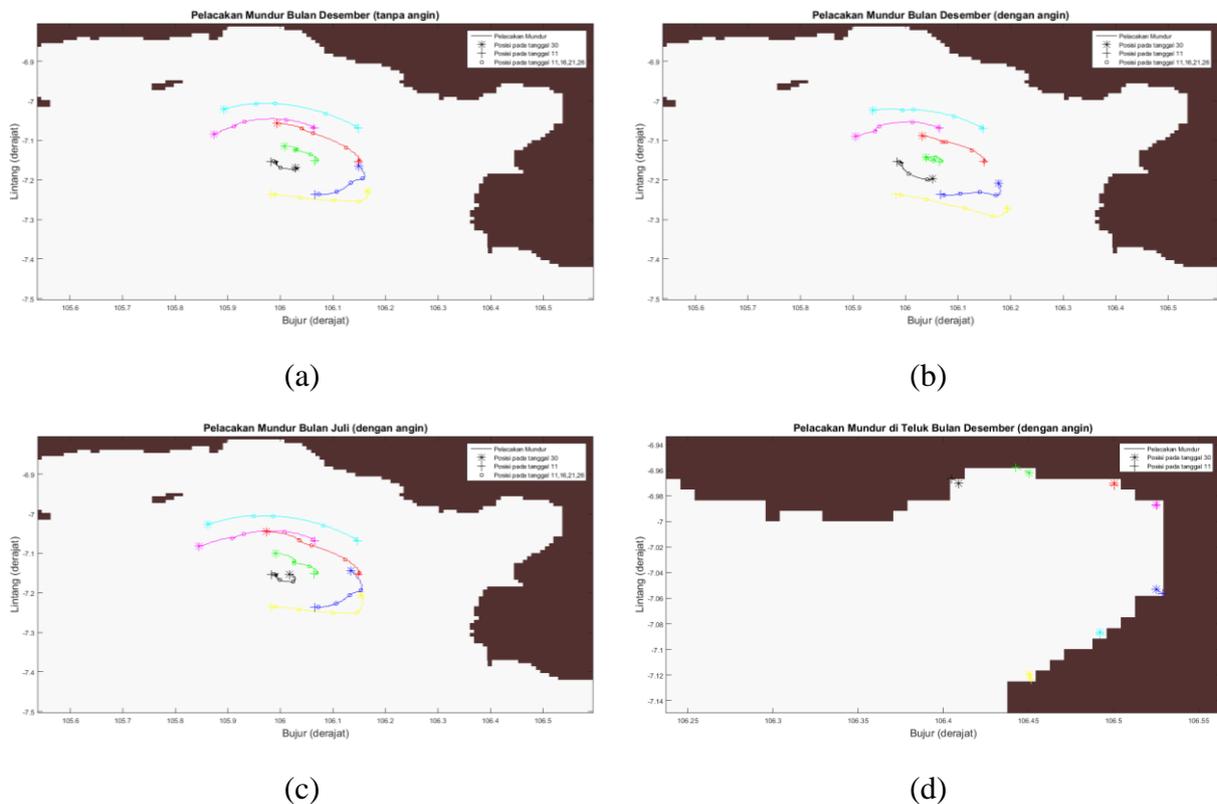
3.2 Hasil Trayektori Sampah

Trayektori sampah pada Skenario 1 sampai Skenario 4 ditunjukkan pada Gambar 7, tujuh partikel dikeluarkan di tengah laut pada tanggal 11 Desember dan dilacak selama 20 hari. Posisi akhir pada pelacakan maju digunakan sebagai posisi awal untuk pelacakan mundur yang mulai pada tanggal 30 Desember. Tanggal mulai pelacakan mundur di laut adalah 30 Desember dan pelacakan mundur dilakukan selama 20 hari. Dari ketujuh partikel tersebut, tidak ada partikel yang masuk ke dalam teluk Pelabuhan Ratu.



Gambar 7. Trayektori sampah pelacakan maju pada (a) skenario 1, (b) skenario 2, (c) skenario 3, dan (d) skenario 4.

Pada pelacakan mundur (Gambar 8), jarak terjauh partikel adalah 28896,04 m dan jarak terdekat adalah 5643,109 m. Perpindahan terjauh adalah 30868,43 m dan perpindahan terdekat adalah 14473,69 m.



Gambar 8. Trayektori sampah pelacakan mundur pada (a) skenario 1, (b) skenario 2, (c) skenario 3, dan (d) skenario 4.

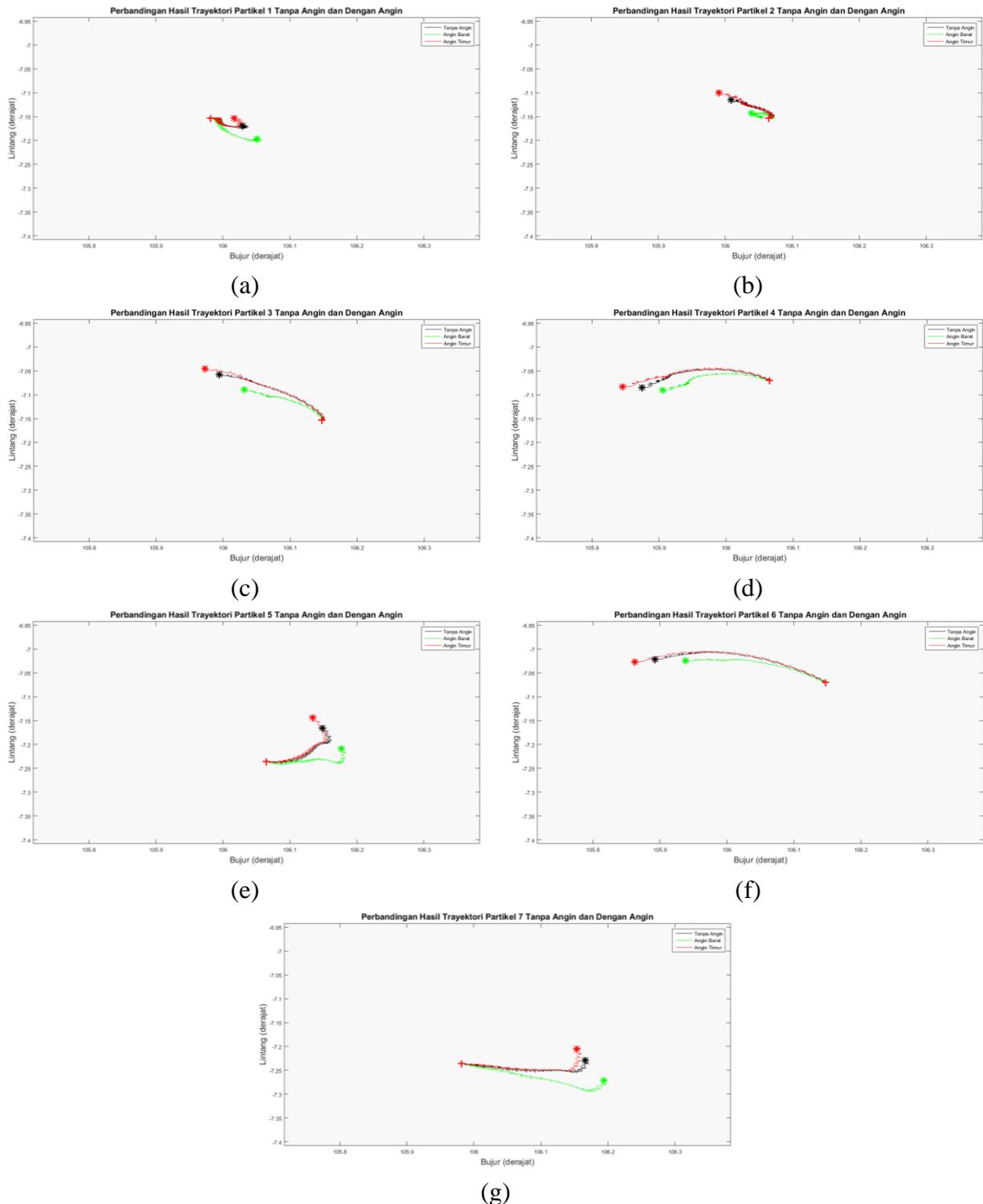
Jika hasil kedua pelacakan dibandingkan, bisa dikatakan bahwa hasil pelacakan mundur di laut lepas cukup mirip dengan hasil pelacakan majunya. Ketujuh partikel memiliki perbedaan yang cukup kecil, bahkan jauh lebih kecil daripada besar satu grid, antara posisi partikel tanggal 11 Desember pada pelacakan maju dan posisi partikel tanggal 11 Desember pada pelacakan mundur.

Secara umum, partikel lebih jauh perpindahannya saat dilacak maju daripada saat dilacak mundur. Ini dikarenakan data arus yang digunakan untuk pelacakan mundur merupakan rata-rata setengah hari, sehingga perubahan kecepatan yang terjadi pada waktu kurang dari setengah hari, seperti arus yang dipengaruhi pasut, tidak di perhitungkan. Namun, partikel lebih jauh jaraknya pada pelacakan mundur karena perubahan kecepatan tersebut tidak terhitung sehingga trayektori partikel relatif lurus.

3.3 Pengaruh Angin Terhadap Trayektori Partikel

Pengaruh angin terhadap trayektori partikel, pengaruh terhadap arahnya maupun jaraknya, dari hasil skenario 1, 2, dan 3 dapat dilihat dari Gambar 9. Pengaruh angin mengakibatkan

perbedaan trayektori pada masing-masing kondisi untuk setiap partikel. Perbedaan jarak antar kondisi angin ditampilkan pada Tabel 5.



Gambar 9. Perbandingan trayektori partikel 1 hingga 7 (gambar a sampai g) di laut lepas. Garis hitam menunjukkan trayektori tanpa pengaruh angin (skenario 1). Garis hijau menunjukkan trayektori dengan pengaruh angin Barat (skenario 2). Garis merah menunjukkan trayektori dengan pengaruh angin Timur (skenario 3).

Berdasarkan Gambar 9 dan Tabel 5, terlihat bahwa ada perbedaan jarak dan perpindahan pada masing-masing kondisi angin. Untuk partikel 1, 5, dan 7, jarak dan perpindahan partikel paling besar pada saat kondisi angin Barat. Ketiga partikel tersebut secara umum bergerak ke arah Timur, sama dengan arah gerak angin pada musim Barat.

Tabel 5. Perbedaan jarak dan perpindahan pada kondisi angin tanpa dan dengan angin.

Partikel	Skema Maju	Tanpa Angin	Angin Barat	Angin Timur
1	Jarak x (m)	5344,83	7732,26	3918,36
	Jarak y (m)	1810,38	4791,91	16,16
	Jarak total (m)	5643,11	9096,72	3918,39
	Perpindahan (m)	51733,51	51853,62	51877,17
2	Jarak x (m)	6255,94	2830,54	8224,03
	Jarak y (m)	4299,6	1119,98	5928,31
	Jarak total (m)	7591,00	3044,06	10138,02
	Perpindahan (m)	45857,83	45440,25	46268,38
3	Jarak x (m)	17108,08	12912,58	19446,55
	Jarak y (m)	10657,72	7158,77	11977,76
	Jarak total (m)	20156,22	14764,24	22839,33
	Perpindahan (m)	42260,84	40475,38	43127,28
4	Jarak x (m)	21200,21	17739,39	24411,21
	Jarak y (m)	1617,36	2211,95	1391,16
	Jarak total (m)	21261,81	17876,76	24450,82
	Perpindahan (m)	48212,06	45709,51	49171,56
5	Jarak x (m)	9400,06	12560,76	7758,52
	Jarak y (m)	7886,99	3038,88	10312,75
	Jarak total (m)	12270,52	12923,14	12905,33
	Perpindahan (m)	48581,73	49240,04	48971,41
6	Jarak x (m)	28378,46	23331,18	31781,48
	Jarak y (m)	5444,66	5150,47	4837,8
	Jarak total (m)	28896,04	23892,91	32147,58
	Perpindahan (m)	43841,03	40397,03	45434,21
7	Jarak x (m)	20574,94	23677,21	19194,75
	Jarak y (m)	805,22	3946,5	4837,8
	Jarak total (m)	20590,69	24003,86	19795,02
	Perpindahan (m)	56424,95	58878,96	56301,37

Sedangkan untuk partikel 2,3,4, dan 6, jarak dan perpindahan partikel paling besar pada saat kondisi angin Timur. Dilihat dari Gambar 9, keempat partikel tersebut secara umum bergerak ke arah Barat, sama dengan arah gerak angin pada musim Timur. Dari hasil perbandingan di atas, bisa dikatakan bahwa angin memperkuat pergerakan dan memperpanjang trayektori untuk partikel yang memiliki arah gerak yang sama dengan arah gerak angin dan sebaliknya memperlambat pergerakan dan memperkecil trayektori untuk partikel yang memiliki arah gerak yang berbalik dengan arah gerak angin.

4 Simpulan dan Saran

4.1 Simpulan

Dalam penelitian ini, hasil verifikasi pasut yang dilakukan baik di laut lepas maupun di dalam teluk menunjukkan tingkat kesesuaian yang signifikan. Hasil evaluasi statistik menghasilkan nilai R^2 yang cukup tinggi, yaitu 0,83 dan 0,82 untuk titik verifikasi laut lepas dan teluk secara berturut-turut, dengan *RMSE* yang relatif rendah, yakni 0,14 m dan 0,15 m. Validitas hasil verifikasi trayektori juga terkonfirmasi sesuai dengan teori arus pasut, dan perpindahan partikel yang diamati dalam program konsisten dengan perhitungan manual. Model pelacakan mundur yang diterapkan menunjukkan performa yang memuaskan, terutama apabila dibandingkan dengan pelacakan maju. Dalam konteks ini, sebagian besar partikel yang dilacak secara mundur mengalami konvergensi ke posisi yang mendekati titik awal pelacakan maju. Hasil analisis juga menegaskan dominansi pengaruh pasang surut sebagai faktor utama dalam pembentukan arus, yang mengakibatkan bentuk trayektori partikel menyerupai elips. Selain itu, pada musim Barat, terdapat kecenderungan perpanjangan trayektori partikel yang bergerak ke arah Timur, sedangkan pada musim Timur, perpanjangan serupa terjadi pada partikel yang bergerak ke arah Barat. Melalui analisis ini, dapat disimpulkan bahwa partikel sampah yang ditemukan di Teluk Pelabuhan Ratu sebagian besar berasal dari dalam teluk itu sendiri, dikarenakan adanya arus yang minim di dalam wilayah teluk tersebut. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang dinamika pergerakan partikel sampah terapung di Pelabuhan Ratu dan memperkaya pemahaman kita mengenai interaksi antara arus, pasang surut, dan pergerakan partikel.

4.2 Saran

Untuk penelitian berikutnya, guna meningkatkan kualitas dan akurasi model yang digunakan maka dapat disarankan beberapa hal. Pertama, dapat dilakukan penambahan data verifikasi yang lebih luas untuk memperbaiki ketelitian model dan mendapatkan hasil yang lebih sesuai dengan kondisi lapangan. Selanjutnya, mempertimbangkan faktor nodal dan astronomik dalam perhitungan pasang surut akan meningkatkan akurasi prediksi, dengan fokus pada nilai yang lebih mendekati keadaan sebenarnya. Penggunaan model tiga dimensi menjadi pilihan yang produktif untuk menggambarkan pengaruh vertikal, termasuk fenomena seperti upwelling Ekman, viskositas vertikal, dan perbedaan tekanan akibat variabilitas densitas. Selain itu, memasukkan faktor-faktor baru pada partikel sampah, seperti peluruhan dan dispersi, akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang pergerakan partikel dalam lingkungan yang dinamis. Penelitian ini juga dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah partikel yang dilibatkan dalam simulasi, sehingga

dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang distribusi dan perilaku partikel sampah dalam lingkungan pelabuhan yang diteliti.

5 Ucapan Terima Kasih

Bagian dari paper ini didanai oleh Dana Riset BP-PTNBH 2019 dari Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan judul ‘Kajian Spatio-Temporal Sumber, Sebaran Dan Pergerakan Sampah Laut Di Pesisir Dan Pulau-Pulau Kecil Destinasi Wisata Bahari’ (Peneliti Utama Ivonne M. Radjawane). G.N. adalah penerima beasiswa dari MTCRC (*Marine Technology Cooperation Research Center*). *This research also is part of projects titled “Korea-Indonesia Marine Technology Cooperation Research Center (20220512)” and “Ocean and Coastal Basic Survey and Capacity Enhancement in Cirebon, Indonesia (PG53340)” which are funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.*

6 Daftar Pustaka

- [1] I. P. R. Fajar Maharta, I. M. Radjawane, T. Suprijo, H. Park, and I. G. Hendrawan, “Identification of Marine Debris Sources in Kuta Beach, Bali, Indonesia,” *J Coast Res*, vol. 114, no. SI, pp. 594–598, Sep. 2021, doi: 10.2112/JCR-SI114-120.1.
- [2] Y. Noya, J. T.-J. P. Sains, and undefined 2021, “Kepadatan dan pola transport sampah laut terapung di pesisir barat perairan Teluk Ambon Luar,” *ejurnal.mipa.unsri.ac.id*, vol. 23, no. 1, pp. 19–27, 2021, Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <http://ejurnal.mipa.unsri.ac.id/index.php/jps/article/view/594>
- [3] J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science (1979)*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, Feb. 2015, doi: 10.1126/SCIENCE.1260352/SUPPL_FILE/JAMBECK.SM.PDF.
- [4] S. Lincoln *et al.*, “Marine litter and climate change: Inextricably connected threats to the world’s oceans,” *Science of The Total Environment*, vol. 837, p. 155709, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.155709.
- [5] I. Yani Zaini, S. Hariyadi, D. Manajemen Sumberdaya Perairan, and F. Perikanan dan Ilmu Kelautan, “Marine Debris Generation in The Cimandiri Estuarine Area River Flow, Palabuhanratu Bay,” *journal.ipb.ac.id*, vol. 06, p. 1, 2022, Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnalppt/article/view/42120>
- [6] M. Juliandri, I. Radjawane, A. T.-A. Bioflux, and undefined 2020, “Modeling the distribution of floating marine debris movement in tourism area in pelabuhan Ratu bay,

- West Java,” *bioflux.com.roMR Juliandri, IM Radjawane, A TaryaACL Bioflux, 2020•bioflux.com.ro*, vol. 13, 2020, Accessed: Nov. 19, 2023. [Online]. Available: <http://bioflux.com.ro/docs/2020.3105-3116.pdf>
- [7] A. Nahum and A. Seifert, “Technique for backward particle tracking in a flow field,” *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 74, no. 1, p. 016701, Jul. 2006, doi: 10.1103/PHYSREVE.74.016701/FIGURES/15/MEDIUM.
- [8] P. Wapperom, R. Keunings, and V. Legat, “The backward-tracking Lagrangian particle method for transient viscoelastic flows,” *J Nonnewton Fluid Mech*, vol. 91, no. 2–3, pp. 273–295, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0377-0257(99)00095-6.
- [9] M. A. Gusyev, D. Abrams, M. W. Toews, U. Morgenstern, and M. K. Stewart, “A comparison of particle-tracking and solute transport methods for simulation of tritium concentrations and groundwater transit times in river water,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 18, no. 8, pp. 3109–3119, Aug. 2014, doi: 10.5194/HESS-18-3109-2014.
- [10] A. Stohl, S. Eckhardt, C. Forster, P. James, N. Spichtinger, and P. Seibert, “A replacement for simple back trajectory calculations in the interpretation of atmospheric trace substance measurements,” *Atmos Environ*, vol. 36, no. 29, pp. 4635–4648, Oct. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00416-8.
- [11] J. Fang, L. Tacher, and A. Parriaux, “Backward simulation of the probability of a trace particle reaching a given region,” *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 20, no. 1, pp. 97–101, Jan. 2005, doi: 10.1016/J.PROBENGMECH.2004.07.001.
- [12] U. H. Thygesen, “How to reverse time in stochastic particle tracking models,” *Journal of Marine Systems*, vol. 88, no. 2, pp. 159–168, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.JMARSYS.2011.03.009.
- [13] L. Long, X. Liu, C. Zhao, Z. Wang, and H. Sun, “Numerical Investigation of the Water-Drop Impact on Low-Drag Airfoil Using the Euler–Euler Approach and Eulerian Wall Film Model,” *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 7743*, vol. 13, no. 13, p. 7743, Jun. 2023, doi: 10.3390/APP13137743.
- [14] M. A. Fathurahman *et al.*, “Studi karakteristik dan distribusi co-range pasang surut di perairan Teluk Pelabuhan Ratu Sukabumi,” *ejournal2.undip.ac.id*, 2021, Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce/article/view/9701>
- [15] B. G. Hatcher, “Dynamics of marine ecosystems Biological-physical interactions in the oceans,” *Botanica Marina*, vol. 49, no. 3, Jul. 2006, doi: 10.1515/BOT.2006.033/HTML.

- [16] J. Kämpf, *Ocean modelling for beginners: using open-source software*. 2009. doi: 10.1007/978-3-642-00820-7.
- [17] H. P. Batchelder, “Forward-in-Time-/Backward-in-Time-Trajectory (FITT/BITT) Modeling of Particles and Organisms in the Coastal Ocean,” *J Atmos Ocean Technol*, vol. 23, no. 5, pp. 727–741, May 2006, doi: 10.1175/JTECH1874.1.
- [18] E. Lu *et al.*, “Adaptive backstepping control of tracked robot running trajectory based on real-time slip parameter estimation,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 178–187, Aug. 2020, doi: 10.25165/IJABE.V13I4.5739.
- [19] D. Adhikari, B. J. Gemmell, M. P. Hallberg, E. K. Longmire, and E. J. Buskey, “Simultaneous measurement of 3D zooplankton trajectories and surrounding fluid velocity field in complex flows,” *journals.biologists.com* D Adhikari, BJ Gemmell, MP Hallberg, EK Longmire, EJ Buskey *Journal of Experimental Biology*, 2015 • *journals.biologists.com*, 2015, doi: 10.1242/jeb.121707.
- [20] H. Nakano, M. B. Alfonso, S. Jandang, K. Imai, and H. Arakawa, “Microplastic pollution indexes in the coastal and open ocean areas around Japan,” *Reg Stud Mar Sci*, p. 103287, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.RSMA.2023.103287.
- [21] V. Ekman, *Eddy-viscosity and skin-friction in the dynamics of winds and ocean-currents*. 1928. Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: http://faculty.eas.ualberta.ca/jdwilson/EAS372_13/ekman_mem2.pdf
- [22] Chad A. Greene, Svetlana Erofeeva, Laurie Padman, Susan Howard, Tyler Sutterley, and Gary Egbert, “Tide Model Driver (TMD) Manual,” 2023, [Online]. Available: <http://www.coas.oregonstate.edu/research/po/research/tide/region.html>.